Dottorato di Ricerca in Architettura XXXV ciclo
Architecture: Teory and Design

ABSTRACT ITA

La ricerca si inquadra nell'ambito delle tematiche relative alla valutazione delle prestazioni dell'involucro edilizio, in riferimento al mantenimento delle caratteristiche prestazionali dopo una sollecitazione esterna causata dai diversi effetti dei cambiamenti climatici. La motivazione che spinge ad analizzare il funzionamento degli involucri e, in particolare dei sistemi di facciata continua, in risposta alle variabili climatiche è dettata dai trend in crescita del settore e dalla necessità di aggiornare la normativa tecnica relativa alle procedure di prova a cui devono essere sottoposte per l'immissione sul mercato. In ambito sperimentale, l'obiettivo si concretizza nella strutturazione di una nuova procedura di valutazione per misurare in termini reali le prestazioni di un sistema di facciata continua quando sottoposto agli effetti estremi del cambiamento climatico per uno specifico contesto climatico, ovvero la Regione Mediterranea. Questa metodologia di prova intende quindi promuovere un nuovo "protocollo metodologico e sperimentale" che contribuisca ad accrescere le competenze sull'innovazione tecnologica dei sistemi di facciata continua, con una forte enfasi sull'implementazione di "simulazioni dal vero" nei processi di valutazione del comportamento prestazionale per gli eventi estremi della Regione Mediterranea.

ABSTRACT ENG

The research is framed within the topics related to the evaluation of building envelope performance, about the maintenance of performance characteristics after external stress caused by the various effects of climate change. The motivation for analyzing the performance of building envelopes and, in particular, curtain wall systems, in response to climatic variables is due to the growing trends in the sector and the need to update the technical regulations relating to the test procedures to which they must be subjected to be placed on the market. In an experimental context, the objective is to structure a new evaluation procedure to measure in real terms the performance of a curtain wall system when subjected to the extreme effects of climate change for a specific climatic context, that is, the Mediterranean Region. This test methodology, therefore, intends to promote a new "methodological and experimental protocol" that contributes to increasing expertise on the technological innovation of curtain wall systems, with a strong emphasis on the implementation of "real simulations" in the processes of assessing performance behavior during extreme events in the Mediterranean Region.



Evelyn Grillo

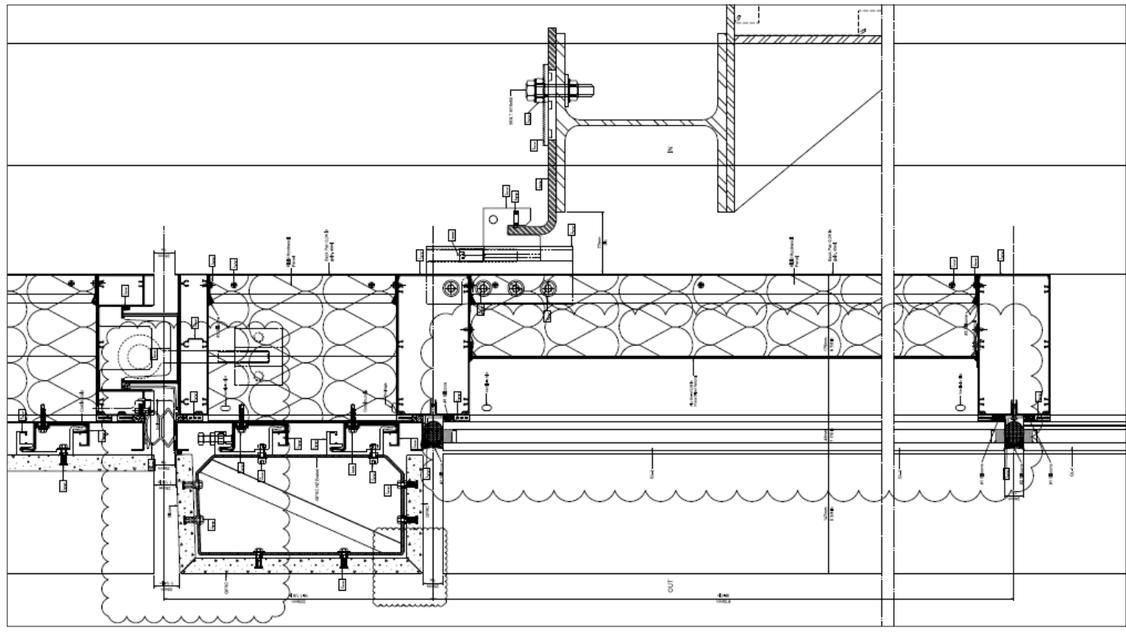
Valutazione prestazionale adattiva per gli involucri edilizi
in regime di cambiamento climatico

dArch Dottorato di Ricerca in Architettura

Evelyn Grillo

VALUTAZIONE PRESTAZIONALE ADATTIVA PER GLI INVOLUCRI EDILIZI IN REGIME DI CAMBIAMENTO CLIMATICO

Azioni di simulazione e testing su un mock-up di facciata continua



Scuola di Dottorato · PAU · dArTe

SCUOLA di DOTTORATO

Dottorato in Architettura
Dottorato in Diritto ed Economia
Dottorato in Ingegneria dell'Informazione
Dottorato in Scienze Agrarie, Alimentari e Forestali

coordinatore
prof. Paolo Fuschi

Collegio dei docenti
Dottorato di Ricerca in Architettura
XXXV ciclo

Concetta Fallanca (coordinatore)
Aragona Stefano
Arena Marinella
Barresi Alessandra
Barrile Vincenzo
Bevilacqua Carmelina
Bonsignore Carmelo Peter
Calabrò Francesco
Cardullo Francesco
Carrà Natalina
Colistra Daniele
De Capua Alberto
Della Spina Lucia
Fallanca Concetta
Fatta Francesca
Fuschi Paolo
Gattuso Domenico
Giglio Francesca
Ginex Gaetano
Gioffrè Vincenzo
Hopkins Andrew James
Impollonia Nicola
Lauria Massimo
Lucarelli Maria Teresa
Manfredi Tommaso
Marcianò Claudio
Marino Domenico
Martinelli Flavia
Martorano Francesca
Massimo Domenico Enrico
Mediati Domenico
Milardi Martino
Mistretta Marina
Molica Bisci Giovanni
Morabito Valerio Alberto
Moraci Francesca
Musolino Mariangela
Nava Consuelo
Neri Gianfranco
Passalacqua Francesca
Pisano Aurora Angela
Prampolini Franco
Pucinotti Raffaele
Pultrone Gabriella
Raffa Venera Paola
Rocca Ettore
Russo Antonello
Santini Adolfo
Sarlo Antonella Blandina Maria
Scamardì Giuseppina
Sofi Alba
Taccone Antonio
Tornatora Rosa Marina
Trombetta Corrado
Villari Alessandro
Garcia Fuentes Josep Maria
Garcia Nofuentes Juan Francisco
Jakob Michael
Janeiro Pedro Antònio
Martìnez Ramos Maria Roser
Olivieri Francesca

In copertina
Sezione orizzontale del mock-up sottoposto a sperimentazione

SCUOLA DI DOTTORATO
Università Mediterranea di Reggio Calabria

DIPARTIMENTO
Architettura e Territorio

DOTTORATO DI RICERCA
Architettura
Architecture: Theory and Design

S.S.D. ICAR/12
XXXV CICLO

VALUTAZIONE PRESTAZIONALE ADATTIVA PER GLI INVOLUCRI EDILIZI IN REGIME DI CAMBIAMENTO CLIMATICO

Azioni di simulazione e testing su un mock-up di facciata continua

Dottoranda
Evelyn Grillo

Tutor
prof. Martino Milardi
prof. ssa Francesca Olivieri

Coordinatore del dottorato
prof. ssa Concetta Fallanca

Desidero ringraziare tutti coloro che hanno contribuito al raggiungimento di questo importante traguardo.
Un doveroso ringraziamento ai miei Tutor, i Professori Martino Milardi e Francesca Olivieri per le conoscenze trasmesse, per gli stimoli costruttivi e per il supporto scientifico.
Ringrazio la Prof. ssa Francesca Giglio per la sua disponibilità a dispensare preziosi consigli.
Ringrazio l'ufficio tecnico dell'Azienda Cianciolo, in particolar modo l'Ing. Salvatore Rocco per avermi dato la possibilità di confrontarmi con il mondo industriale.
Ringrazio Katia Foti, Responsabile di IRCCOS srl, dove ho svolto lo stage, che mi ha permesso di fare un'esperienza importante per il mio futuro e i tecnici di laboratorio Andrea Cadei e Stefano Galli per le skills acquisite sul campo.
Ringrazio PhD Graziano E. Marchesani per i miei primi passi verso i software di simulazione.
Ringrazio Mariateresa Mandaglio per gli indispensabili insegnamenti e il costante sostegno.
Ringrazio i colleghi ed amici Antonino, Cosimo, Alessandro, Andrea, Danilo, Katia e Giuseppe per le esperienze vissute e per aver alleggerito questo percorso accademico.
Un ringraziamento speciale a Sara, la migliore compagna di banco che si potesse desiderare.
Un infinito ringraziamento ai miei genitori e a mia sorella per essere i miei punti di riferimento e per appoggiarmi in ogni mia scelta e, a mio marito Rocco per aver sempre creduto in me e per avermi trasmesso la forza e il coraggio per il conseguimento di questo obiettivo.

Note biografiche



Evelyn Grillo, architetto. Svolge attività di ricerca nel SSD ICAR/12, sviluppando particolare interesse nell'ambito delle prestazioni tecnologiche dell'involucro edilizio, indagando il suo potenziale per l'adattamento ai cambiamenti climatici. Tematica approfondita durante il periodo estero svolto presso il DCTA *Departamento de Construcción y Tecnologías Arquitectónicas* dell'Università Politecnica di Madrid. Afferisce al gruppo di ricerca della *Sezione TCLab* del Building Future Lab, laboratorio di testing e sperimentazione avanzata sugli involucri edilizi.

Evelyn Grillo

VALUTAZIONE PRESTAZIONALE ADATTIVA PER GLI INVOLUCRI EDILIZI IN REGIME DI CAMBIAMENTO CLIMATICO

Azioni di simulazione e testing su un mock-up di facciata continua

Indice

11 Abstract

13 Presentazione

15 Introduzione

PARTE PRIMA: Le interconnessioni scalari e disciplinari dello stato dell'arte
I cambiamenti climatici: un nuovo campo di indagine per il progetto architettonico

31 Capitolo 1 *Quadro di riferimento_* I cambiamenti climatici: cause, impatti e strategie di intervento

1.1 La situazione globale in tema di cambiamenti climatici: I fondamenti scientifici

1.2 Le risposte all'azione climatica: una nuova visione delle strategie di mitigazione e adattamento

1.3 Valutazioni critiche: Le implicazioni del cambiamento climatico nel progetto di architettura

References

65 Capitolo 2 *Condizioni climatiche di riferimento_* L'area Mediterranea: scenari climatici ed eventi estremi

2.1 Il cambiamento climatico in Area Mediterranea: la conoscenza scientifica

2.2 Previsione dei dati climatici futuri e intensificazione dei fenomeni estremi

2.2.1 Italia: scenari climatici futuri rispetto a temperatura, precipitazioni, vento

2.2.2 Spagna: scenari climatici futuri rispetto a temperatura, precipitazioni, vento

2.3 Valutazioni critiche: Quadro di confronto

References

103 Capitolo 3 *Il problema scientifico_* Cambiamenti climatici ed involucro edilizio

3.1 Cosa significa il cambiamento climatico per il futuro del settore delle costruzioni?

3.2 Una lettura *dinamica* del cambiamento climatico e l'involucro edilizio

3.2.1 Climate change *versus* Building envelope

3.2.2 Building envelope versus Climate change

3.3 Valutazioni critiche: Verso l'adattamento al clima

References

Allegato 1

Inquadramento della I Parte della Ricerca all'interno del Technology Readness Levels TRLs

Note per l'introduzione alla II Parte della Ricerca

PARTE SECONDA: Le interconnessioni scalari e disciplinari dello stato dell'arte
L'innovazione dei sistemi tecnologici dell'involucro edilizio

147 Capitolo 4 *Lo sfondo consolidato_* L'involucro edilizio: definizioni, prestazioni e requisiti

4.1 Una reinterpretazione critica sulle prestazioni dell'involucro edilizio

4.2 *Discussione* sull'adattività dell'involucro edilizio

4.3 I materiali per l'adattività: analisi sui casi studio

4.3.1 Shape Memory Hybrid

4.3.2 Shape Memory Alloy

4.3.3 Shape Memory Polymers

4.3.4 Electro-Active Polymers

4.4 Valutazioni critiche

References

Allegato 2

185 Capitolo 5 *Il tema specifico_* Le facciate continue e la scelta del caso studio

Introduzione

5.1 *Discussione* sugli aspetti tecnici-normativi della facciata continua

5.1.1 Sistemi di facciata continua: tipologie e componenti

5.1.2 Sistemi di facciata continua: trend nel mercato e prospettive di crescita

5.2 Revisione critica: analisi di deficit e limiti prestazionali delle facciate continue

5.3 Le attività di testing su sistemi di facciata continua

5.4 Criterio di scelta del caso studio

Conclusioni

References

Allegato 3

Inquadramento della II Parte della Ricerca all'interno del Technology Readness Levels TRLs

Note per l'introduzione alla III Parte della Ricerca

PARTE TERZA: L'attività sperimentale
La valutazione prestazionale del mock-up in regime di cambiamento climatico

251 Capitolo 6 *Analisi Simulativa_* Dal design del mock-up alla simulazione su software parametrico

Introduzione

6.1 Il processo di design per il mock-up

6.2 La caratterizzazione tecnologica del mock-up

6.3 I tools di supporto per le azioni di simulazione

6.3.1 Work-flow metodologico: Modellazione e simulazione del mock-up

6.4 Valutazioni critiche dei risultati ottenuti

Conclusioni

References

Allegato 4

297 Capitolo 7 *Analisi Sperimentale_* Azioni di testing finalizzate alla verifica prestazionale

Introduzione

7.1 Strumenti adottati per il testing

7.2 Fase preliminare: installazione del mock-up nella camera di prova

7.3 Verso la definizione della metodologia di prova per le azioni di testing

7.4 Il *protocollo metodologico e sperimentale* su misura per il mock-up

7.5 La misurazione reale delle performance del mock-up

7.6 Quadro di sintesi prestazionale del mock-up

7.7 Valutazioni critiche: attività di simulazione versus attività di testing

Conclusioni

References

Inquadramento della III Parte della Ricerca all'interno del Technology Readness Levels TRLs

PARTE QUARTA: *Discussione* intorno alle conclusioni
Settori di innovazione per la ricerca e riferimenti

343 Conclusioni: Risultati ottenuti, Limiti della ricerca e possibili prospettive future

Connessioni della ricerca al settore di Innovazione S3 Smart Specialization Strategy Calabria

Connessioni della ricerca al Progetto Metabuilding Labs (Horizon 2020)

355 Bibliografia

Riferimenti bibliografici

Riferimenti sitografici

Riferimenti tecnico-normativi

375 Glossario

378 Credits

Abstract

The research is framed within the topics of building envelope performance assessment, characterized by the difficulty of dynamically interpreting the interaction between the envelope and its climatic context, especially because of the current climate change.
In the research, this *intent* is realized through a deductive methodological approach characterized by a preliminary phase and an application phase with the design and experimental verification of a curtain wall mock-up through simulation and testing activities.
In reviewing the research's state-of-the-art, the expected effects of climate change present a set of primary challenges for building envelopes about maintaining performance characteristics after external stress.
This aspect indicates that the building envelope, on the one hand, suffers from the effects (e.g. heat waves and islands, water bombs, wind storms, hurricanes, and also disasters such as seismic events) and, on the other hand, underlines the building envelope's central role in responding to the increasing and pressing environmental challenges.
Research studies focus on the building envelope's adaptive aspect, being equipped with elements, components, and materials that can respond adaptively to specific external stresses. The scientific background shows the difficulty to evaluate the performance of adaptive envelopes, as it is not supported by any regulatory apparatus.
In addition, envelope technologies are applied in most cases on transparent surfaces, raising the need to advance knowledge of the impacts of extreme events, specifically for the Mediterranean Region, on curtain wall systems. The curtain wall design and construction is an interesting field of innovation marked by a growing trend, while at the same time, there is a need to update the technical regulations concerning the test procedures they must undergo to validate their performance and certify their conformity to European and American regulatory standards, to be placed on the market.
The research's specific theme is thus identified, characterized by an investigation and an exploration of issues related to the concept of curtain wall performance's adaptive functioning to climate change stresses. The motivation for understanding and evaluating the curtain wall systems' performance characteristics in response to changing climatic variables is dictated by the fact that there are still few studies on performance failures and deficits or these are limited to specific contextual areas.
In addition, the guidelines for designing a curtain wall system that considers all the necessary criteria for environmental quality are not adequate for the new performance requirements dictated by climate change, making a sequence of iterative actions indispensable to define the minimum characteristics and performance that these types of systems must guarantee to ensure their operation following increasingly severe and sudden events.
The opportunity to investigate and advance knowledge on the performance characteristics of curtain walls underlines the research's experimental nature thanks to the support of *Cianciolo Group s.r.l*, a company specialized in the design of curtain wall systems, and the *TCLab section* of the Building Future Lab, a laboratory for advanced testing of building envelopes.
Due to the criticalities highlighted by the state-of-the-art analysis, the research starts an experimental activity - through simulation activities with Grasshopper software and testing

activities - in the field of curtain wall systems, specifically, the unitized system to verify its real performance to specific extreme events identified for the Mediterranean Region such as extreme temperatures, intense rainfall, and wind.
The research's general objective is to advance knowledge to promote the activation of processes related to the design of curtain wall systems by identifying new performance indicators that will guide stakeholders in the sector to propose new technological solutions that can respond adaptively to climate change.
The specific objective materializes in structuring a new methodological test procedure concerning tests in the American standards framework to measure in real terms the performance of mock-up when subjected to extreme climate change effects for the Mediterranean Region.
The test procedure is applied to the curtain wall mock-up to verify the level of performance adaptation to extreme events specific to the Mediterranean area and to facilitate designers and manufacturers to reduce malfunctions, time, and costs in the construction phase.
Therefore, this methodology intends to promote a new 'methodological and experimental protocol' contributing to an increase in expertise on the technological innovation of curtain wall systems, with a strong emphasis on the implementation of 'real simulations' in the processes of performance assessment under climate change for the Mediterranean Region.

Presentazione

La ricerca "*Valutazione prestazionale adattiva per gli involucri edilizi in regime di cambiamento climatico. Azioni di simulazione e testing su un mock-up di facciata continua*",
è sviluppata nell'ambito del XXXV Ciclo del Dottorato di Ricerca in Architettura dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria.
La ricerca si inquadra all'interno delle tematiche relative alla valutazione prestazionale degli involucri edilizi, caratterizzata dalla difficoltà di leggere in modo *dinamico* l'interazione che si instaura tra involucro e contesto climatico di appartenenza, soprattutto in considerazione dei cambiamenti climatici in atto. Nella ricerca, questo intento, si realizza attraverso un'approfondita fase istruttoria e successivamente con la progettazione e la verifica sperimentale di un mock-up di facciata continua, mediante attività di simulazione e testing.
La ricerca, finanziata da una borsa di studio su fondi POR Calabria FESR/FSE 2014-2020, traccia le sue interconnessioni all'interno della traiettoria *Edilizia Sostenibile* in riferimento al settore strategico del Polo di Innovazione regionale *S3 Smart Specialization Strategy Calabria*[1] (a cui si rimanda nella IV parte della tesi per ulteriori specifiche), che poggia le sue richieste sullo sviluppo di *elementi* di competitività e innovazione nel settore delle costruzioni. La competitività della ricerca, risiede nella connessione tra *mondo accademico e industriale*, mettendo a punto un processo volto alla possibilità di innovazione tecnologica e avanzamento delle conoscenze nel campo delle prestazioni delle facciate continue, in grado di gestire e reagire a sollecitazioni climatiche.
Questo aspetto si delinea dal fatto che le attività operative e applicative della ricerca si sono svolte in sinergia con l'azienda *Cianciolo Group s.r.l.* – azienda leader specializzata nella progettazione di facciate continue – e con lo strategico supporto della *Sezione TCLab* del Building Future Lab, laboratorio specializzato nei processi di valutazione prestazionale degli involucri edilizi e componenti, mediante attività di testing avanzato basate su specifiche procedure normate.
In linea con il campo disciplinare della tecnologia dell'architettura, la ricerca indaga e analizza il concetto di *adattività* degli involucri edilizi, con un focus sulle potenzialità offerte dagli *smart materials* e fornisce una revisione sistematica dei principali fallimenti e degradi delle facciate continue dovuti agli impatti del cambiamento climatico, che possono compromettere le prestazioni 'a lungo termine' di questi sistemi tecnologici.
Si riconosce così il carattere interdisciplinare della ricerca, in quanto si avvale, in maniera trasversale, del contributo scientifico di altre discipline quali l'ingegneria dei materiali e delle nanotecnologie, la climatologia e la fisica tecnica ambientale, occupandosi a costruire processi innovativi necessari a sviluppare rigorose e complete analisi e verifiche prestazionali delle facciate continue.
La tesi, riallacciandosi al filone degli studi internazionali, affronta quindi la problematica relativa alla *misurazione* del funzionamento prestazionale e flessibile delle facciate continue, quando queste sono sottoposte ad eventi estremi di cambiamento climatico, di cui vengono forniti scenari climatici futuri per la Regione del Mediterraneo.
L'approccio metodologico di tipo deduttivo della ricerca è stato finalizzato al raggiungimento del risultato e ha permesso di strutturare le sue attività in sezioni teoriche-applicative consequenziali, identificando il carattere sperimentale della ricerca.

La tesi di dottorato si distingue dall'adozione di una *metodologia* capace di affiancare al momento teorico di indagine una fase propositiva e sperimentale attraverso la messa a sistema di un mock-up di facciata continua della tipologia a cellula, con il supporto dell'azienda Cianciolo Group s.r.l., le cui prestazioni in relazione agli eventi estremi di cambiamento climatico, sono state verificate attraverso l'utilizzo di strumenti di simulazione e azioni di testing.
La volontà della ricerca di avvalersi di azioni simulative e di testing risiede nell'intento di attuare un confronto in parallelo tra i due metodi adottati, al fine determinare lo strumento più efficace nel facilitare la valutazione prestazionali dei sistemi di facciata continua.
L'importanza delle attività di simulazione e testing, sempre più interconnesse e utilizzate in modo sistematico, risiede nell'offrire a progettisti e tecnici del settore delle costruzioni, garanzie sull'affidabilità e conformità dei dati e risultati, con potenzialità e ricadute importanti in campo industriale, con specifico riferimento al settore di *Ricerca&Sviluppo*.
I risultati della ricerca, legati alla necessità di definire una procedura di valutazione che permettesse di misurare, in termini *reali*, le prestazioni adattive del mock-up sottoposto a sollecitazioni estreme, si riscontrano nella strutturazione di un *protocollo metodologico e sperimentale*, in grado di supportare in modo efficace la complessa lettura della relazione dinamica che si instaura tra sistemi di involucro e scenari climatici estremi.
In questo senso, la ricerca connota tracciati di innovazione in linea con il *Progetto Metabuilding Labs*[2] di Horizon 2020 (a cui si rimanda nella IV parte della tesi per ulteriori specifiche), rispetto lo sviluppo di nuove procedure di prova e nuovi requisiti tecnici per la convalida delle prestazioni di mock-up di involucri edilizi in laboratori specializzati.
Gli avanzamenti prodotti nella fase sperimentale della ricerca vengono analizzati in modo critico e permettono di individuare tematiche e prospettive che potranno essere oggetto di approfondimenti scientifici successivi.
La tesi vuole quindi essere intesa come un valido strumento metodologico per un accrescimento delle competenze sull'innovazione tecnologica dei sistemi di facciata continua, ponendo un forte accento sull'implementazione delle "simulazioni dal vero" nei processi di valutazione delle caratteristiche prestazionali in regime di cambiamento climatico.

Introduzione

La volontà di sviluppare una ricerca avente come oggetto l'involucro edilizio nasce dall'intenzione di analizzare le recenti innovazioni tecnologiche registrate nel settore delle costruzioni, in funzione dell'esigenza di metterle a sistema con un contesto ambientale, ormai dominato dagli effetti dei cambiamenti climatici [Pörtner, et al., 2022].
Nel ripercorrere lo stato attuale della ricerca, gli effetti previsti del cambiamento climatico presentano una serie di sfide primarie per gli involucri edilizi [Roberts, 2008], in riferimento al mantenimento delle caratteristiche prestazionali dopo una sollecitazione esterna.
Questo aspetto indica, in modo sempre più rigoroso, che l'involucro edilizio, da un lato subisce gli effetti (ad esempio ondate e isole di calore, bombe d'acqua, raffiche di vento, uragani e anche catastrofi come eventi sismici), dall'altro si sottolinea il ruolo centrale dell'involucro nella prospettiva di rispondere alle crescenti e pressanti criticità ambientali.
Le tematiche individuate dalla presente ricerca, finalizzata all'impostazione della tesi di dottorato, sono in linea con le traiettorie di innovazione delle Direttive in ambito Europeo e Nazionale in materia di Clima ed Energia.
Si fa riferimento all'*Agenda 2030*[3], in particolare all'obiettivo 13 "*Promuovere azioni, a tutti i livelli, per combattere il cambiamento climatico*" e al Programma Nazionale per la Ricerca *PNR 21-27*[4], che al punto 5.5 "*Clima, Energia e Mobilità Sostenibile"* mette in evidenza la necessità di sviluppare strategie e metodi per l'adattamento ai cambiamenti climatici, mediante l'apporto di differenti ambiti disciplinari.

Da un'analisi dello stato dell'arte emerge che la qualità complessiva di un edificio è legata in gran parte alle caratteristiche tecnologiche del suo "involucro", cioè "l'elemento funzionale complesso" a cui è affidato il compito di garantire un efficace equilibrio e un'interazione dinamica [Naboni, et. al., 2020], tra ambiente interno controllato e ambiente esterno variabile per natura. Una reinterpretazione delle performance energetiche e ambientali dell'involucro edilizio deriva quindi dalla sua capacità di interfacciarsi dinamicamente con l'ambiente al variare delle condizioni interne ed esterne.
Gli studi della ricerca si concentrano sull'aspetto adattivo dell'involucro, essendo dotato di elementi, componenti e materiali in grado di rispondere in modo adattivo a specifiche sollecitazioni esterne. Dal background scientifico viene messa in evidenza da un lato la difficoltà di valutare a livello prestazionale gli involucri di tipo adattivo, non essendo supportato da alcun apparato normativo, dall'altro, essendo le tecnologie di involucro applicate nella maggior parte dei casi su superfici trasparenti, emerge l'esigenza di avanzare la conoscenza degli impatti degli eventi estremi, nello specifico per la Regione del Mediterraneo, sui sistemi di facciata continua.
La progettazione e la realizzazione delle facciate continue risultano un interessante campo di innovazione in quanto sono caratterizzate da un trend in crescente espansione ma al contempo, si mette in luce l'esigenza di aggiornare la normativa tecnica in riferimento a procedure di prova a cui devono essere sottoposte per validare le loro prestazioni e certificare la rispondenza a standard normativi, in ambito europeo e americano, per l'immissione nel mercato.
Si individua così il tema specifico della ricerca, caratterizzato da un'indagine e da un appro

fondimento delle tematiche legate al concetto di funzionamento adattivo delle prestazioni delle facciate continue rispetto alle sollecitazioni di cambiamento climatico.
La *motivazione* che spinge alla comprensione e valutazione delle caratteristiche prestazionali di sistemi di facciata continua, in risposta a variabili climatiche in continuo mutamento è dettata dal fatto che vi sono ancora pochi studi sui fallimenti e deficit prestazionali o questi sono limitati a specifiche aree contestuali [Yalaz, et al., 2016].
In aggiunta, le linee guida per progettare un sistema di facciata continua che consideri tutti i criteri necessari alla qualità ambientale non sono adeguate ai nuovi requisiti prestazionali dettati dai cambiamenti climatici [Moghtadernejad, 2020], rendendo indispensabile una sequenza di azioni iterative per definire le caratteristiche e le prestazioni minime che questi tipi di sistemi debbano garantire per assicurare il loro funzionamento a seguito di eventi sempre più violenti e repentini.
L'opportunità di poter indagare sui deficit prestazionali delle facciate continue rileva il carattere sperimentale della ricerca grazie al supporto dell'azienda *Cianciolo Group s.r.l.*[5], specializzata nella progettazione dei sistemi di facciata continua e della s*ezione TCLab*[6] del Building Future Lab, laboratorio specializzato in testing avanzato sugli involucri edilizi.

In ragione delle criticità messe in evidenza dall'analisi dello stato dell'arte, la ricerca è finalizzata ad avviare un'attività di sperimentazione - attraverso attività di simulazione e attività di testing - nel settore dei sistemi di facciata continua, nello specifico della tipologia a cellula, per verificare il suo funzionamento prestazionale in relazione a specifici eventi estremi individuati per la Regione del Mediterraneo.
L'obiettivo generale della ricerca è quello di avanzare la conoscenza per favorire l'attivazione dei processi legati alla progettazione dei sistemi di facciata continua individuando nuovi indicatori prestazionali che spingano gli stakeholder del settore a proporre nuove soluzioni tecnologie che siano in grado di rispondere in modo adattivo ai cambiamenti climatici.
L'obiettivo specifico si materializza nella strutturazione di una procedura metodologica, in riferimento a test in ambito normativo americano, per misurare in termini reali le prestazioni delle facciate continue, quando sono sottoposte a effetti estremi di cambiamento climatico per la Regione del Mediterraneo.
L'efficacia della procedura di prova, per verificare il livello di risposta prestazionale agli eventi estremi specifici dell'area Mediterranea, è stata applicata al mock-up di facciata continua a cellula, progettato in sinergia con l'azienda Cianciolo Group. s.r.l.

Articolazione della Ricerca: approccio, metodi, strumenti

In accordo allo scenario illustrato, la ricerca è sviluppata adottando un *approccio metodologico* di tipo deduttivo, sistematico e scalare, che ha condotto a strutturare il lavoro di analisi secondo attività consequenziali di approfondimento, attuando un processo iterativo di validazione/attuazione dei risultati parziali ottenuti.

La definizione del *macro-tema*, caratterizzato dalle tematiche relative alla comprensione delle dinamiche di interazione tra effetti del cambiamento climatico ed involucro edilizio, rappresenta la condizione necessaria e sufficiente per indirizzare le analisi sulle innovazioni tecnologiche, nel campo dell'involucro, al fine di strutturare una nuova modalità di valutazione prestazionale di tipo adattivo degli involucri ai fenomeni di cambiamento climatico.
Questo, è reso possibile spostando l'attenzione sulle facciate continue per comprendere quali siano i deficit prestazionali più ricorrenti dovuti agli impatti di cambiamento climatico.
In questo contesto, emerge la necessità di aggiornare la normativa in materia in riferimento alle procedure di valutazione e verifica delle prestazioni delle facciate continue rispetto a variabili climatiche in continuo mutamento.

Si giunge così allo sviluppo di un mock-up di facciata continua della tipologia a cellula, rispetto al quale è strutturata una procedura di prova ad hoc, per verificare il suo funzionamento rispetto fenomeni estremi di cambiamento climatico.
Ogni fase dell'iter di lavoro è caratterizzata dalla definizione di una metodologia di ricerca specifica e accompagnata dagli strumenti adeguati sia per l'approfondimento necessario all'avanzamento delle conoscenze e delle competenze tecniche, sia per validare i risultati parziali e passare all'attività successiva.

Per una maggiore comprensione dell'iter scientifico, le attività, che possono essere lette in funzione dei capitoli specifici della tesi di dottorato, sono strutturate secondo un modello rigoroso e metodologico, come segue:

*1. Quadro di riferimento*_I cambiamenti climatici: cause, impatti e strategie di intervento

Analisi del quadro di riferimento sulla questione ambientale ed energetica, oggi accentuata dai cambiamenti climatici e sulle misure sinergiche di adattamento e mitigazione in ambito europeo e nazionale, con il fine ultimo di evidenziare le potenzialità ed i limiti delle strategie che possono essere intraprese a livello di progettazione.

Strumenti operativi e modalità: sistematizzazione dei dati e delle informazioni provenienti da Direttive in ambito internazionale, europeo e nazionale, da rapporti tecnici degli Istituti di ricerca scientifica e strumenti informativi di simulazione degli scenari di cambiamento climatico: il software interattivo dell'IPCC.

*2. Condizioni climatiche di riferimento*_L'area Mediterranea: scenari climatici ed eventi estremi

Analisi delle condizioni climatiche del contesto specifico di riferimento, ovvero l'Area Mediterranea, attraverso la costruzione di scenari di previsione futura rispetto agli eventi estremi di cambiamento climatico che diventeranno più frequenti e intensi.
Questa attività è necessaria per restringere il campo di indagine sulla questione ambientale e indirizzare specifiche procedure di valutazione per gli involucri edilizi in relazione ad un contesto di studio ambientale specifico; in particolare, sono studiate due regioni del Mediterraneo: Italia e Spagna.

Strumenti operativi e modalità: sistematizzazione dei dati e delle informazioni provenienti da report in ambito europeo e nazionale e strumenti informativi di simulazione degli scenari di cambiamento climatico: software *DataClime* per l'Italia e software *Adaptecca* per la Spagna e costruzione di un quadro di confronto per la comparazione dei risultati.

*3. Il problema scientifico*_ Cambiamenti climatici ed involucro edilizio

Analisi dello stato dell'arte nell'ambito dell'inquadramento del problema scientifico relativo alla comprensione degli effetti del cambiamento climatico sull'involucro edilizio e sui fattori che incidono sull'amplificazione degli impatti da parte delle prestazioni tecnologiche dell'involucro.

Strumenti operativi e modalità: sistematizzazione dei dati e delle informazioni provenienti dalle principali esperienze di ricerca nell'ambito delle prestazioni degli involucri edilizi in relazione a contesti ambientali variabili e mediante un'indagine e conseguente valutazione della letteratura tecnica esistente in riferimento ad articoli scientifici, rapporti tecnici, linee

guida e siti web specializzati nel settore di interesse della ricerca.
Da questa indagine, si sono strutturate delle schede sperimentali intese come uno strumento che possa facilitare la lettura degli inneschi dell'involucro edilizio sugli effetti del cambiamento climatico rispetto a requisiti prestazionali specifici quali, controllo del flusso termico e luminoso, controllo del flusso d'aria e d'acqua.
La sistematizzazione dei dati attraverso schede sperimentali di lettura dinamica della relazione involucro edilizio-requisiti-cambiamento climatico, hanno messo in evidenza come le superfici trasparenti, nello specifico le facciate continue, sono elementi vulnerabili agli impatti del cambiamento climatico.

*4. Lo sfondo consolidato*_L'involucro edilizio: definizioni, prestazioni e requisiti

Analisi del quadro di riferimento rispetto l'innovazione tecnologica dell'involucro edilizio, con un focus sull'adozione di materiali di tipo adattivo, in grado di reagire a sollecitazioni esterne. Questa attività è necessaria per comprendere quali sono le correnti di sviluppo tecnologico nell'ambito dell'innovazione degli involucri rispetto a dinamiche di cambiamento climatico, mettendo in evidenza da un lato, la difficoltà di misurare le caratteristiche adattive degli involucri, dall'altro i limiti nell'adozione di queste tecnologie.

Strumenti operativi e modalità: sistematizzazione dei dati e delle informazioni provenienti dalle principali esperienze di ricerca nell'ambito dei componenti e materiali di tipo adattivo per l'involucro edilizio attraverso una classificazione ragionata dei casi studio selezionati ed analizzati.

*5. Il tema specifico*_Le facciate continue e la scelta del caso studio

Analisi dei deficit e dei fallimenti prestazionali delle facciate continue che, dallo stato dell'arte, è emerso come queste siano altamente vulnerabili agli impatti del cambiamento climatico. Si mette in evidenza così il tema specifico della ricerca, ovvero valutare le prestazioni delle facciate continue rispetto ad eventi estremi, prendendo in considerazione i limiti della letteratura di settore sulla valutazione delle prestazioni 'a lungo termine' dei sistemi di facciata continua.
Inquadramento e valutazione analitica e critica sulle procedure di prova utilizzate per la valutazione dei sistemi di facciata continua in ambito europeo ed americano.

Strumenti operativi e modalità: indagine della letteratura di settore, sia a livello tecnico-normativo sia con un contatto diretto con aziende produttrici dei sistemi di facciata continua.
Da questa attività operativa, si sono costruiti una matrice sperimentale sui principali degradi delle facciate continue e un report tecnico di casi studio relativo alle prestazioni delle facciate continue valutate attraverso attività di testing in cantiere e in laboratorio.
Il report vuole mettere in evidenza come sia necessario un aggiornamento della normativa in materia di testing, al fine di valutare le prestazioni delle facciate continue soggette a continue e intense sollecitazioni di cambiamento climatico.
Da ciò si deduce la volontà di mettere a sistema un mock-di facciata continua della tipologia a cellula da avviare alla fase sperimentale.

*6. Analisi simulativa*_ Dal design del mock-up alla simulazione su software parametrico

Sviluppo del mock-up di facciata continua da valutare a livello sperimentale, rispetto ad eventi estremi analizzati per la Regione del Mediterraneo, mediante due step in riferimento ad attività di simulazione e testing.

La prima fase sperimentale condotta sul mock-up si realizza attraverso l'utilizzo del plug-in Grassopper di Rhinoceros, uno dei software più utilizzati nella progettazione di forme complesse di involucri edilizi.

Strumenti operativi e modalità: Avvio del processo di design del mock-up con l'azienda Cianciolo Group s.r.l. e conseguente costruzione del work-flow metodologico per la modellazione e la simulazione del mock-up tramite software parametrico Grasshopper, per analizzare il comportamento a livello termico della facciata negli scenari di cambiamento climatico, quali Italia e Spagna.

*7. Analisi sperimentale_* Azioni di testing finalizzate alla verifica prestazionale

Analisi prestazionale del mock-up attraverso attività di testing presso la Sezione TCLab del Building Future Lab, dotato di specifiche attrezzature in grado di riprodurre gli eventi estremi di cambiamento climatico.

Strumenti operativi e modalità: Costruzione di una nuova procedura di prova che possa facilitare e indirizzare la valutazione del funzionamento e delle risposte prestazionali delle facciate continue in riferimento a sollecitazioni esterne in continuo mutamento.
Il *protocollo metodologico e sperimentale* è strutturato sulla base di procedure normative in ambito americano e attuato grazie alle attrezzature di cui dispone il TCLab.

Al fine di incardinare la ricerca nei processi di innovazione nell'ambito del settore della *Ricerca&Sviluppo*, i capitoli vengono letti attraverso il loro livello di maturità tecnologica preso in prestito dalla Commissione Europea, ovvero il *Technology Readness Level*[7].
Questo aspetto delinea la capacità di strutturare dei feedback negativi e positivi tra le varie attività sequenziali della ricerca.

Nella pagina seguente, viene schematizzato l'approccio metodologico [Fig. 3], attraverso il quale si sono approntate le diverse attività teoriche-applicative - descritte precedentemente - in riferimento alle fasi consequenziali e iterative del percorso dottorale di ricerca.

ITER METODOLOGICO DELLA RICERCA			
Fase	Obiettivo	Azioni e strumenti	Risultati raggiunti
1. Istruttoria	**O.1.** Costruzione di un quadro conoscitivo rispetto il cambiamento climatico; **O.2.** Individuazione contesto climatico di riferimento; **O.3.** Inquadramento del problema scientifico rispetto la relazione *involucro edilizio - cambiamento climatico*.	**1.1.** Ricerca bibliografica; **1.2.** Indagine sulla questione climatica-ambientale attraverso lo studio di report e articoli scientifici prodotti da Organismi di Ricerca Internazionali; **1.3.** Indagine su un contesto climatico di riferimento: l'Area del Mediterraneo, con un focus su Italia e Spagna, attraverso l'utilizzo di software di simulazione climatica, messi a disposizione da Organismi di Ricerca Nazionali; **1.4.** Indagine sugli impatti del cambiamento climatico sugli involucri edilizi attraverso una revisione critica della letteratura di settore.	**R.1.** Avanzamento della conoscenza sulle previsioni future rispetto agli eventi estremi di cambiamento climatico per l'Area del Mediterraneo; **R.2.** Individuazione parametri/eventi estremi da controllare: temperatura, precipitazioni, vento; **R.3.** Schede di lettura della relazione dinamica i*nvolucro edilizio - cambiamento climatico.*
2. Analitica (indiretta e diretta)	**O.1.** Fornire un quadro sull'evoluzione prestazionale degli involucri edilizi; **O.2.** Costruzione del quadro conoscitivo sulle strategie di risposta degli involucri rispetto al cambiamento climatico (indiretta); **O.3.** Costruzione del quadro analitico-critico sugli aspetti tecnico-prestazionali delle facciate continue (diretta); **O.4** Definizione del tema specifico della ricerca.	**2.1.** Ricerca bibliografica; **2.2.** Revisione analitica-critica sull'innovazione tecnologica e prestazionale dell'involucro (indiretta), attraverso letteratura di settore; **2.3.** Definizione delle caratteristiche adattive degli involucri edilizi, con un focus sui materiali innovativi, attraverso esperienze di ricerca in ambito internazionale (indiretta); **2.4.** Definizione delle caratteristiche prestazionali delle facciate continue, mediante lo studio di normative di riferimento (diretta); **2.5.** Individuazione deficit prestazionali delle facciate continue, attraverso attività di testing condotte in cantiere (IRCCOS) e in laboratorio (Sezione TCLab) (diretta).	**R.1.** Avanzamento della conoscenza prestazionale degli involucri edilizi; R.2. Sistematizzazione dei dati sui materiali adattivi in un repertorio critico; **R.3.** Sistematizzazione dei possibili degradi delle facciate continue attraverso la costruzione di una matrice sperimentale e implementabile; **R.4.** Estrapolazione di limiti procedurali e tecnico-normativi sulla difficoltà di misurare le reali prestazioni/funzionamento adattivo delle facciate continue rispetto ad eventi estremi di cambiamento climatico.
3. Propositiva	**O.1.** Fornire un approccio metodologico e procedurale per la valutazione prestazionale delle facciate continue in regime di cambiamento climatico; **O.2.** Individuazione degli strumenti necessari alla valutazione prestazionale del mock-up; **O.3.** Sviluppo del mock-up da avviare alla fase sperimentale.	**3.1.** Ulteriori indagini sulle procedure di prova normate in ambito europeo e americano; **3.2.** Indagini su software di simulazione; **3.3.** Dichiarazione degli eventi estremi da simulare sul mock-up per la sua valutazione: temperatura, precipitazioni, vento; **3.4.** Avvio del processo di design del mock-up con l'azienda Cianciolo Group s.r.l.; **3.5.** Definizione delle caratteristiche tecnologiche del mock-up da testare.	**R.1.** Avanzamento delle competenze rispetto la progettazione tecnologica delle facciate continue; **R.2.** Definizione degli strumenti per la valutazione prestazionale del mock-up: attività di simulazione attraverso il software parametrico Grasshopper e attività di testing mediante le attrezzature della Sezione TCLab; **R.3.** Realizzazione del mock-up di facciata continua a cellula in scala 1:1.
4. Sperimentale	**O.1.** Analizzare il mock-up sollecitato da eventi estremi di cambiamento climatico dell'Area del Mediterraneo; **O.2.** Avvio delle attività di simulazione; **O.3**. Avvio delle attività di testing.	**4.1.** Costruzione del work-flow metodologico per la modellazione del mock-up su Grasshopper; **4.2.** Simulazione delle prestazioni del mock-up su Grasshopper, **4.3.** Strutturazione della procedura di prova in ambito normativo americano per procedere alle attività di testing da condurre sul mock-up; **4.4.** Riproduzione degli eventi sul mock-up attraverso le attrezzature della Sezione TCLab.	**R.1.** Individuazione dei limiti del software per la valutazione prestazionale delle facciate continue; **R.2.** Individuazione delle criticità prestazionali del mock-up sollecitato dalla ripetizione degli eventi estremi di cambiamento climatico; **R.3.** Sviluppo del protocollo metodologico e sperimentale.
5. Verifica	**O.1.** Validazione della procedura di prova ipotizzata per la verifica prestazionale del mock-up in regime di cambiamento climatico; **O.2.** Sintesi dei risultati raggiunti.	**5.1.** Elaborazione dei dati e successiva sistematizzazione dei risultati ottenuti dalle attività di simulazione e testing; **5.2.** Definizione del comportamento adattivo del mock-up e problematiche riscontrate.	**R.1.** Costruzione del quadro di sintesi prestazionale del mock-up derivato dall'elaborazione e sistematizzazione dei dati delle attività di testing; **R.2.** Estrapolazione di dati e informazioni utili alle prospettive future della ricerca.

Per facilitare la lettura, si riportano in sintesi i caratteri principali analitici ed operativi rispetto a ciascuna fase metodologica della ricerca:

1. Fase Istruttoria

La fase istruttoria è caratterizzata da un'analisi dello stato dell'arte rispetto la problematica relativa ai cambiamenti climatici, rappresentando il terreno fertile su cui indirizzare indagini analitiche successive, ovvero sull'individuazione di requisiti prestazionali necessari all'involucro edilizio per poter reagire e gestire sollecitazioni dinamiche esterne.
Per restringere il campo di indagine sulla vasta tematica del cambiamento climatico, è stato analizzato il contesto della Regione del Mediterraneo.
A tal proposito, è stato indispensabile condurre una ricerca bibliografia che permettesse di individuare la letteratura scientifica esistente sull'argomento con il fine di costruire un quadro di sintesi e di confronto sugli scenari di previsione futura in riferimento all'intensificazione di eventi estremi, in particolare su due regioni del Mediterraneo quali l'Italia e la Spagna. Si vuole precisare che, la scelta di analizzare gli scenari climatici di cambiamento climatico della Spagna è dovuta al fatto di aver effettuato un periodo di stage formativo presso il DCTA *Departamento de Construcción y Tecnologías Arquitectónicas* dell'Università Politecnica di Madrid.
L'obiettivo di questa fase è quindi inquadrare la problematica del cambiamento climatico rispetto un contesto ambientale di riferimento e mettere in evidenza da un lato, gli impatti sull'involucro edilizio, dall'altro di specificare il comportamento dell'involucro edilizio nella sua capacità innescare fenomeni di cambiamento climatico.
Questa necessità deriva dal fatto che la maggior parte degli studi della letteratura su questa tematica si basano sull'identificazione degli effetti del cambiamento climatico sugli involucri edilizi e sulle strategie di mitigazione e adattamento e non prendono in considerazione la possibilità che lo stesso involucro possa determinare effetti negativi sulle variabili climatiche.
Per questi motivi, in relazione alla necessità di comprendere le relazioni che si instaurano tra involucro edilizio e cambiamento climatico, oggetto di studio della presente ricerca, si è cercato di scomporre idealmente l'involucro edilizio nelle sue componenti opache e trasparenti, al fine di identificare quali possano essere i fattori di innesco e di amplificazione degli impatti di cambiamento climatico causati dall'involucro edilizio.
Il risultato che ne deriva è un avanzamento della conoscenza in riferimento alla lettura dinamica tra involucro edilizio e cambiamento climatico, mettendo in evidenza l'esigenza di identificare nuovi requisiti prestazionali dell'involucro rispetto ad eventi estremi.
La messa a sistema di queste informazioni è avvenuta attraverso l'analisi della letteratura di settore ma anche mediante la partecipazione a seminari e convegni dedicati all'argomento, al fine di identificare i contenuti di innovazione rispetto a questa tematica e verificare così la rispondenza delle azioni di ricerca.

2. Fase Analitica (indiretta e diretta)

Lo sviluppo della fase analitica avviene secondo due filoni tematici che sono stati messi in evidenza dalla prima fase istruttoria, sottolineando il percorso sequenziale e iterativo rispetto alle azioni operative che caratterizzano le attività della ricerca.

In primo luogo, si mette in evidenza la necessità di strutturare un quadro conoscitivo sulle possibili strategie di adattamento dell'involucro edilizio ai cambiamenti climatici.
Viene così studiato l'involucro edilizio attraverso le sue caratteristiche adattive, frutto delle innovazioni tecnologiche degli ultimi tempi, che lo rendono moderatore e regolatore di

Fig. 3. Nella pagina accanto: Approccio metodologico della ricerca

flussi materici ed energetici esterni. In particolare, la ricerca si è orientata verso l'analisi di casi studi di involucri edilizi adattivi realizzati o su cui è stata condotta una sperimentazione, la cui variabilità è legata alle proprietà intrinseche del materiale di sono costituiti.
Il risultato di questa attività di analisi indiretta (in quanto si basa su un'indagine bibliografica delle recenti esperienze di ricerca) è la costruzione di un repertorio critico di riferimento che lega le caratteristiche del materiale adattivo con la capacità di risposta rispetto ad una specifica sollecitazione esterna. Si vuole precisare che questa attività è stata necessaria per acquisire le conoscenze di base e per fornire una lettura di sintesi in merito all'innovazione tecnologica dei materiali che rendono adattivo l'involucro edilizio.
Sebbene questo fattore - ovvero la caratteristica di adattività dei materiali applicati principalmente su involucri edilizi trasparenti - rispetto una sollecitazione climatica esterna, possa essere preso in considerazione per orientare possibili strategie di adattamento climatico in ambito Mediterraneo, la ricerca di tesi dottorale si limita ad indicare le strategie di adattamento di alcuni materiali appartenenti alla famiglia degli *smart materials*.
D'altro canto, vengono messi in evidenza i limiti normativi e di applicazione di questi sistemi e la difficoltà nella valutazione prestazionale degli involucri edilizi adattivi.

In secondo luogo, l'attenzione si sposta sulle superfici trasparenti che caratterizzano l'involucro edilizio, in quanto dall'analisi sugli impatti del cambiamento climatico si deduce che queste siano vulnerabili alle sollecitazioni climatiche esterne e rapppresentano le tecnologie di involucro su cui vengono applicate le strategie materiche adattive.
Il collegamento tra l'analisi dei materiali adattivi e l'analisi del comportamento prestazionale adattivo degli involucri trasparenti è dettato e determinato dalle problematiche e ai limiti che emergono dalla letteratura di settore.
Difatti, una delle problematiche individuate nel percorso della ricerca è capire il funzionamento e le prestazioni *adattive* degli involucri edilizi trasparenti rispetto ai fenomeni di cambiamento climatico, senza l'ausilio di specifici materiali adattivi. In questo contesto, si specifica che il concetto di adattività fa riferimento alla capacità dei sistemi di involucro edilizio a reagire in modo positivo a stress esterni.
Nello specifico, le attività di analisi hanno come oggetto le facciate continue, che rappresentato un trend in positivo rispetto il mercato delle costruzioni in ambito internazionale.
L'obiettivo è analizzare e individuare i possibili degradi e fallimenti prestazionali delle facciate continue rispetto ad eventi estremi di cambiamento climatico. Il risultato che ne deriva è la costruzione di una matrice sperimentale sui degradi delle facciate continue.
L'analisi delle prestazioni delle facciate continue non si conclude con un'indagine della letteratura di settore, ma si focalizza sulle procedure di prova in ambito normativo americano ed europeo, indispensabili per la validazione e certificazione dei sistemi di facciata continua da immettere nel mercato.
In questo senso, sono state avviate delle attività d testing in cantiere e in laboratorio (analisi diretta) su casi studio di facciate continue di aziende leader del settore, che hanno permesso di strutturare un repertorio tecnico sui principali fallimenti prestazionali che avvengono durante i test.
Inoltre, questa attività ha consentito di mettere in evidenza la necessità di aggiornare la normativa tecnica in materia di testing, al fine di verificare il *reale* comportamento prestazionale delle facciate continue sottoposte ad eventi estremi di cambiamento climatico, definendo così il tema specifico della ricerca.

Questa attività è resa possibile grazie al supporto del Laboratorio IRCCOS s.r.l.[8] - Istituto di Ricerca e Certificazione per le Costruzioni Sostenibili - [Fig. 1], dove è stato effettuato un periodo di stage[9] per avanzare conoscenze e competenze tecniche in riferimento alla valutazione prestazionale di facciate continue e componenti di involucro e alla sezione TCLab

Nella pagina accanto:

Fig. 1. Banco di prova del laboratorio IRCCOS s.r.l. - Sede operativa di Cassano Magnago (VA)

Fig. 2. Camera di prova TCLab - Sede operativa presso Dipartimento dArTe - Reggio Calabria (RC)

del Building Future Lab [Fig. 2], dove si è preso parte alle attività di testing svolte su mock-up di facciate continue, in qualità di tecnico di laboratorio.





3. Fase Propositiva

Le valutazioni critiche derivanti dall'indagine sulle diverse interconnessioni dello stato dell'arte, hanno messo in evidenza la difficoltà di misurare le prestazioni a lungo termine delle facciate continue in particolare se si prendono in considerazione gli effetti dei cambiamenti climatici.
Il carattere propositivo della ricerca si individua nel processo di definizione di un mock-up di facciata continua della tipologia a cellula da caratterizzare in termini prestazionali, al fine di identificare una procedura di prova congruente a definire le reali prestazioni del mock-up rispetto ad eventi estremi di cambiamento climatico dell'area del Mediterraneo.
La messa a sistema del mock-up avviene in stretta sinergia con l'azienda Cianciolo Group s.r.l., che ha permesso di acquisire le conoscenze in merito alla complessa progettazione delle facciate continue, le cui caratteristiche prestazionali sono da collegarsi con il contesto ambientale di riferimento. Questa fase ha portato alla realizzazione del mock-up in scala 1:1 in modo tale da consentire una valutazione prestazionale accurata, secondo due modalità: attività di simulazione e attività di testing.

4. Fase Sperimentale

Come detto precedentemente, le attività di sperimentazione sul mock-up avvengono tramite due modalità di approccio alla valutazione prestazionale.
La prima è riferita alle attività di simulazione che sono state condotte tramite il software parametrico Grasshopper, attraverso cui si è strutturata una caratterizzazione termica del mock-up rispetto due scenari di cambiamento climatico per la Regione del Mediterraneo quali Italia e Spagna.
La seconda invece si riferisce alle attività di testing svolte presso la Sezione TCLab, dove è

stato possibile riprodurre sul mock-up effetti di evento estremo di cambiamento climatico. L'aspetto originale della ricerca rispecchia la strutturazione di una procedura di prova ad hoc, sulla base della normativa americana, rispetto alla quale sono state verificate le prestazioni del mock-up sottoposte a ripetute ed intense sollecitazioni climatiche.
Tenendo presente il quadro delle interazioni tra involucro edilizio e cambiamento climatico, la messa a punto di test appropriati per la valutazione prestazionale del mock-up in regime di cambiamento climatico, la sperimentazione in laboratorio rappresenta il momento cardine della ricerca, supportando il livello di adattabilità dei risultati ottenuti, avendo avuto inoltre la possibilità di verificare risultati intermedi ottenuti dalle attività iterative della ricerca.

5. Fase di Verifica

La fase sperimentale è accompagnata da un'analisi e da attività di verifica rispetto i risultati raggiunti dalla valutazione delle prestazioni del mock-up rispetto a sollecitazioni di cambiamento climatico. Da ciò si deduce che non è stato possibile attuare un diretto confronto tra i dati estrapolati messi in evidenza dalla simulazione con quelli derivanti dal testing.
Questa problematica è dovuta al fatto che i software di simulazione presentano dei limiti sulla possibilità di riprodurre fenomeni di eventi estremi, per cui è stato necessario affiancare questo strumento di simulazione con prove basate sulla 'simulazione dal vero'.
Attraverso le attività di testing condotte sul mock-up, si è potuta verificare in modo efficace la valenza della strutturazione della procedura di prova proposta, ovvero il *protocollo metodologico e sperimentale*. Questa metodologia risultante dal processo iterativo della ricerca, intende mettere in evidenza la possibilità di implementazione e attuazione della procedura di prova in linee guida sperimentali, al fine di delineare e definire una misurazione reale delle prestazioni dei sistemi di facciata continua in relazione ad un contesto climatico in continuo mutamento.
Il *carattere sperimentale della ricerca* vuole aprire quindi nuove prospettive sulle operazioni metodologiche da mettere in campo per la valutazione prestazionale e nell'aggiornare procedure di prova che consentano di stabilire e quindi verificare il funzionamento adattivo e prestazionale delle facciate continue, che saranno sollecitate da eventi estremi di cambiamento climatico.

Le fasi discusse sull'approccio metodologico della ricerca intendono contribuire a consolidare il rapporto tra mondo accademico della ricerca e mondo industriale produttivo, mettendo in evidenza spunti di innovazione per la verifica prestazionale e tecnologica dei sistemi di facciata continua.

Risultati e possibili stakeholder della ricerca

L'indagine scientifica condotta sull'involucro edilizio porta alla definizione di una nuova lettura della relazione che intercorre tra questo e il suo contesto ambientale di riferimento, oggi più che mai sollecitato da eventi estremi di cambiamento climatico.
Al fine di evitare fraintendimenti nella lettura della presente tesi dottorale, si intende soffermarsi e circoscrivere in modo univoco il concetto di *adattivo*.

E' ben noto come oggi il termine adattivo è associato a sistemi, materiali e componenti di involucro in grado di reagire a continue sollecitazioni esterne.
Tuttavia, in questo contesto di attività sperimentale, con *adattivo* viene identificata e circoscritta la strutturazione e definizione di una nuova procedura di prova per valutare il funzionamento e il comportamento prestazionale dei sistemi di facciata continua ad eventi

estremi della Regione del Mediterraneo.
Quindi, la parola *adattiva* associata alla valutazione prestazionale intende rafforzare il concetto secondo il quale le procedure di prova (sia in ambito Europeo che Americano) dovrebbero essere *adattate* e articolate in base alla complessità dei sistemi da testare e al cambiamento delle variabili climatiche, essendo i parametri di riferimento che caratterizzano la risposta prestazionale dei sistemi di involucro edilizio.
In altre parole, il concetto di *adattività* - associato alla metodologia di prova sviluppata, risultato specifico della ricerca - è inteso come la possibilità di adeguare in modo flessibile i requisiti normativi e di testing a specifiche esigenze prestazionali-ambientali.
Se, da un lato, requisiti più restrittivi, potrebbero comportare ai sistemi di facciata continua delle problematiche e deficit prestazionali in fase di testing, questi potrebbero aiutare a capire e dare una misura affidabile sul reale livello di risposta prestazionale a stress esterni sempre più estremi, in modo tale da correggere eventuali fallimenti del sistema.

In particolare, la metodologia di prova - applicata sul mock-up - intende contribuire ad un rinnovamento della normativa tecnica in materia di testing, considerando i nuovi requisiti prestazionali dettati da fenomeni climatici che diventeranno sempre più frequenti e intensi. Questo aspetto individua nuovi connotati tecnologici e prestazionali per sistemi di facciata continua in una realtà di processo e di produzione industriale che non solo sta caratterizzando l'innovazione degli ultimi anni ma, soprattutto, caratterizzerà quella dei prossimi decenni. Testimonianza di questo processo sono i trend del mercato in costante crescita per il settore dei sistemi di involucro trasparente e le numerose richieste di certificazione di questi sistemi da parte di laboratori di prova e testing specializzati.

Per questi motivi, si mette in evidenza come l'analisi sperimentale condotta sul mock-up di facciata continua - attraverso azioni di simulazione e testing - individua come possibili stakeholder della ricerca, aziende specializzate nella progettazione e produzione delle facciate continue, al fine di ridurre i deficit prestazionali che queste possono subire durante la *ripetibilità* degli eventi estremi di cambiamento climatico.
A questo, si aggiunge come i laboratori di prova che valutano e certificano le caratteristiche tecniche-prestazionali dei sistemi di facciata continua, risultano essere i principali destinatari dei risultati della presente ricerca, in quanto la metodologia di prova sviluppata può essere applicata su altri mock-up di facciata continua, consentendo di verificare la validità delle attività di sperimentazione già condotta e costruire un repertorio di risultati affidabili per future implementazioni tecnologiche su sistemi di involucro edilizio.
Un ulteriore aspetto da considerare risiede nel fatto che gli stessi laboratori di testing e sperimentazione necessitano di un up-grade delle strumentazioni di rilevazione fenomenologica che consentano, vista la complessità tecnologica degli involucri edilizi, di misurare le caratteristiche prestazionali, in relazione alle sollecitazioni esterne di cambiamento climatico.

Note

1. La Smart Specialisation Strategy (S3) è uno strumento utilizzato in tutta l'Unione europea per migliorare l'efficacia delle politiche pubbliche per la ricerca e l'innovazione: è concepita a livello regionale, ma valutata e messa a sistema a livello nazionale ed europeo. La S3 è definita attraverso un processo che incoraggia la piena partecipazione e la corresponsabilizzazione di tutti gli attori dell'innovazione per la costruzione di un documento strategico per il settennio di programmazione comunitaria 2014-2020: esso costituisce una "condizionalità ex-ante" vincolante per attivare i fondi comunitari per la ricerca e l'innovazione. Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://calabriaeuropa.regione.calabria.it/s3/cose-la-s3

2. METABUILDING LABS è un progetto quinquennale finanziato dall'UE nell'ambito di Horizon 2020 i cui obiettivi principali sono sbloccare il potenziale di innovazione, migliorare la competitività e aumentare l'impatto sul mercato delle piccole e medie imprese (PMI) nel settore delle costruzioni europeo. Un grande consorzio di 40 partner ha unito le forze per fornire al settore delle costruzioni un facile accesso a un'ampia rete di strutture di prova di alto valore (laboratori, banchi di prova, edifici pilota e living lab) che consentono alle parti interessate di sviluppare e testare sistemi e soluzioni innovativi per edifici di nuova generazione. Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://metabuilding-labs.eu/

3. L'*Agenda 2030* dell'ONU definisce 17 Obiettivi di sviluppo sostenibile (Sustainable Development Goals – SDGs nell'acronimo inglese) da raggiungere entro il 2030, articolati in 169 Target, che rappresentano una bussola per porre l'Italia e il mondo su un sentiero sostenibile. Il processo di cambiamento del modello di sviluppo viene monitorato attraverso i Goal, i Target e oltre 240 indicatori: rispetto a tali parametri, ciascun Paese viene valutato periodicamente in sede Onu e dalle opinioni pubbliche nazionali e internazionali.
Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://asvis.it/l-agenda-2030-dell-onu-per-lo-sviluppo-sostenibile/

4. Il 15 dicembre 2020, è stato approvato al CIPE il *Programma nazionale per la ricerca* 2021-2027, frutto di un ampio e approfondito confronto avviato dal Ministero dell'Università e della Ricerca con la comunità scientifica, con le amministrazioni dello Stato e delle realtà regionali, e allargato, per la prima volta tramite una consultazione pubblica, ai portatori di competenze e di interesse pubblici e privati e alla società civile. Sulla base dell'analisi delle criticità e dei punti di forza della ricerca in Italia, il PNR 2021-2027 intende promuovere cambiamenti positivi facendo leva sulla ricerca di base e applicata e su politiche che si avvalgono della direzionalità dell'innovazione, del coinvolgimento dei cittadini e di azioni dedicate di trasferimento di conoscenze e tecnologie a favore dei territori, delle imprese e della pubblica amministrazione.
Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://www.mur.gov.it/it/aree-tematiche/ricerca/programmazione/programma-nazionale-la-ricerca

5. *Cianciolo Group S.r.l* si colloca tra più alti livelli del mercato di settore delle facciate continue e dei serramenti. L'azienda nasce a Palermo nel 1964 dalla famiglia Cianciolo nel settore della produzione di carpenteria metallica, involucri edilizi e serramenti. L'esperienza maturata negli anni le permette di imporsi nel mercato come punto di riferimento non sono in Italia ma anche all'estero.
Cianciolo Group s.r.l. è un'azienda Partner del TCLab, permettendo di avviare un'attività operativa-applicativa e sperimentale della ricerca attraverso la progettazione e la costruzione del mock-up di facciata continua a cellula. In particolare l'Ingegnere S. Rocco, i produttori V. Cianciolo e F. Manfroni e il tecnico specializzato P. Lopes hanno guidato il processo di design, costruzione e assemblaggio del mock-up. Il rapporto sinergico con l'azienda ha permesso di avanzare le conoscenze e competenze nell'ambito della progettazione dei sistemi di facciata continua.
Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://www.cianciologroup.it/cianciolo-group

6. La Sezione TCLab è centrale alla struttura laboratoriale del Building Future Lab presso l'Università Mediterranea di Reggio Calabria. Il TCLab rappresenta una fertile occasione di ricerca nell'ambito del testing avanzato per gli involucri edilizi e componenti. Attraverso specifiche attrezzature e macchinari, si validano le prestazioni degli involucri secondo procedure di prova normate a livello americano e europeo. Il Responsabile della Sezioe TCLab è il Prof. Martino Milardi, Prof. Associato ICAR12 presso il Dipartimento dArTe dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria.
Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://www.unirc.it/en/laboratories.php?lab=69

7. Il termine *Technology Readiness Level* (acronimo TRL), che si può tradurre con Livello di Maturità Tecnologica, indica una metodologia per la valutazione del grado di maturità di una tecnologia, sviluppata originariamente dalla NASA nel 1974 e successivamente modificata. Viene attualmente utilizzata da vari enti americani ed europei, quali il Dipartimento della Difesa americano, la NASA, l'Agenzia Spaziale Europea, la Commissione europea ed altri. È basata su una scala di valori da 1 a 9, dove 1 è il più basso (definizione dei principi base) e 9 il più alto (sistema già utilizzato in ambiente operativo).

8. IRCCOS – *Istituto di Ricerca e Certificazione per le Costruzioni Sostenibili* - nasce nel 2006 come semplice laboratorio prove utile alla certificazione di serramenti e facciate continue, con notifica ministeriale (NB1994) alla Commissione Europea. Nel tempo ha maturato sempre più esperienza nel campo dell'involucro edilizio, ampliando le sue aree di competenza dapprima estendendo la propria autorizzazione come Organismo di Ispezione e Certificazione e successivamente dotandosi di apparecchiature per prove di collaudo in opera. Oggi è in grado di svolgere prove per la certificazione di prodotto direttamente presso il produttore, di svolgere test in riferimento a normative ASTM/AAMA, di fornire supporto nell'ambito della progettazione di banchi di prova, di organizzare giornate di formazione e di affiancare i suoi clienti nella ricerca applicata. Ha due sedi operative, una a Cassano Magnago (Varese) e una a Ostuni (Brindisi).
Per ulteriori informazioni, consultare il sito: http://www.irccos.com/laboratorio/

9. Il periodo di stage presso IRCCOS (da giugno2021-a agosto 2021) si configura come un'esperienza altamente qualificante nell'ambito della valutazione delle prestazioni dei sistemi di facciata continua. Questa esperienza ha permesso un avanzamento delle conoscenze e competenze sia in riferimento ai possibili deficit prestazionali delle facciate continue sia in ambito normativo nelle procedure di prova e nelle attività di testing su mock-up di facciate continue che vengono effettuate in cantiere.

Riferimenti bibliografici

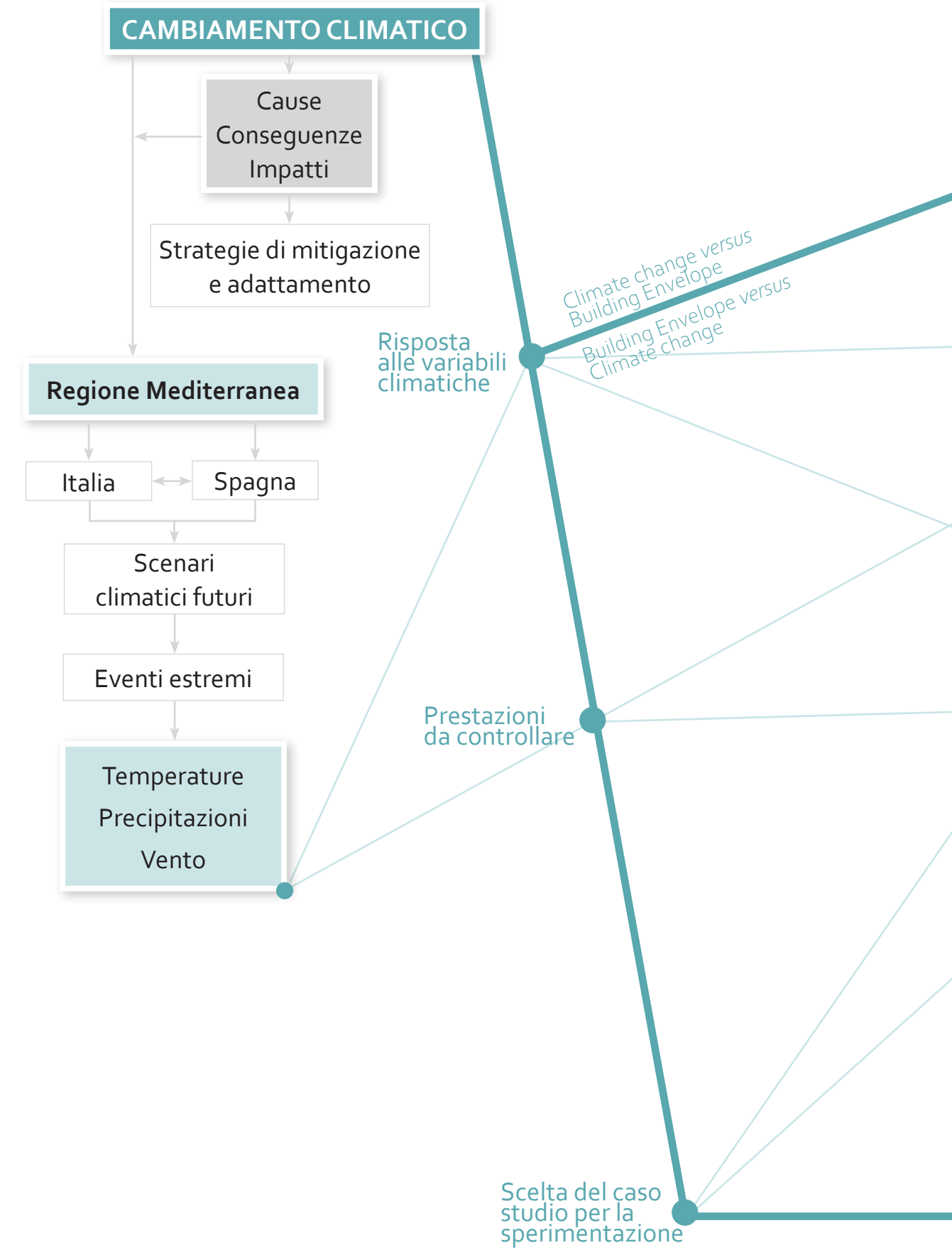
Pörtner, H. O., Roberts, D. C., Adams, H., Adler, C., Aldunce, P., Ali, E., ... & Birkmann, J. (2022). Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. *IPCC Sixth Assessment Report*.

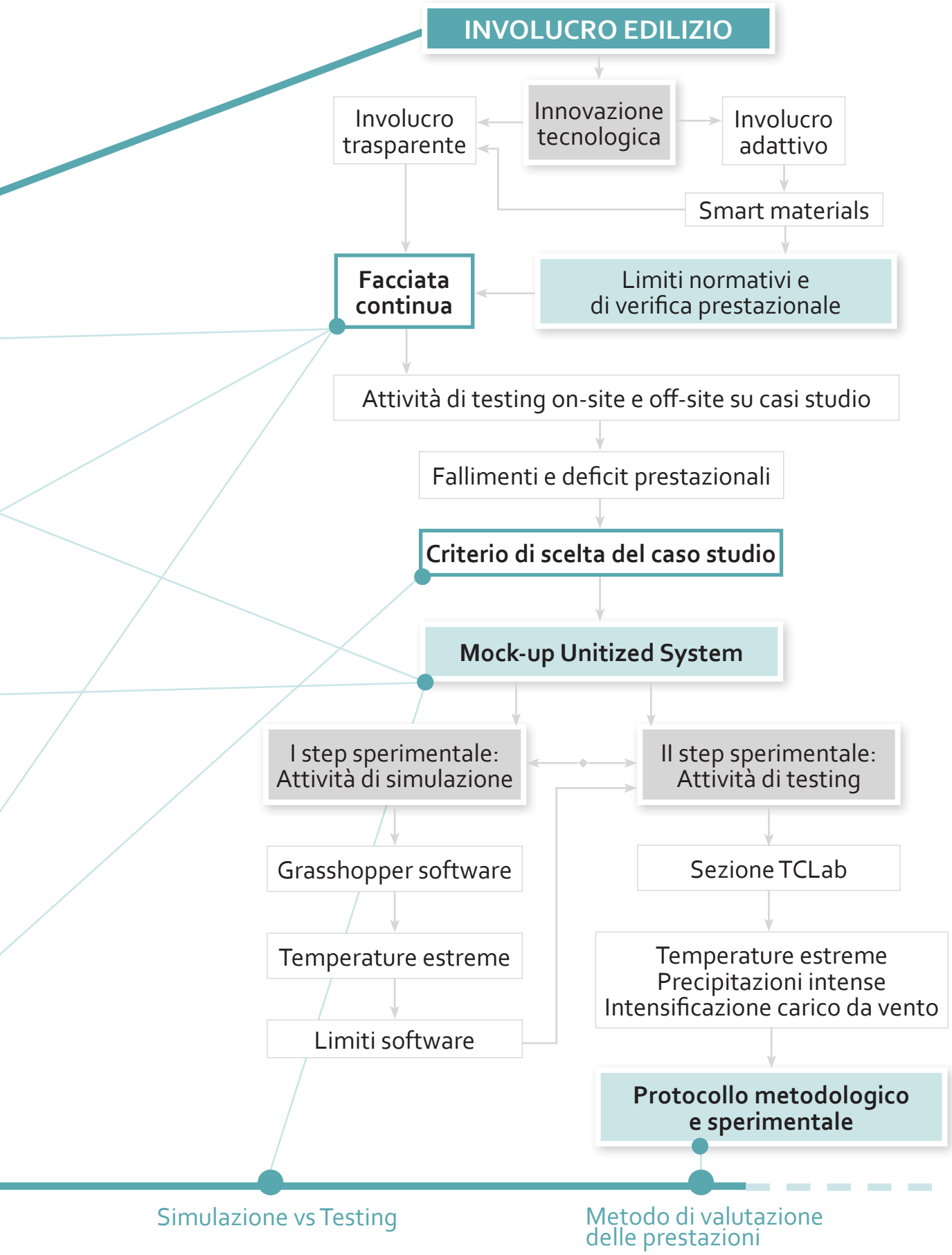
Roberts, S. (2008). Effects of climate change on the built environment. *Energy Policy*, 36(12), pp. 4552-4557. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.09.012

Naboni, E., Milella, A., Vadalà, R., & Fiorito, F. (2020). On the localised climate change mitigation potential of building facades. *Energy and Buildings*, 224, 110284. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110284

Yalaz, E. T., Tavil, A., & Celik, O. C. (2016). Curtain wall deficiency and failures. Observations on Multi-story Buildings in Istanbul. *2016 World Congress, Facade Tectonics Institute*.

Moghtadernejad, S., Chouinard, L. E., & Mirza, M. S. (2020). Design strategies using multi-criteria decision-making tools to enhance the performance of building façades. *Journal of Building Engineering*, 30, 101274. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101274


CAMBIAMENTO CLIMATICO
Cause
Conseguenze
Impatti
Strategie di mitigazione
e adattamento
Regione Mediterranea
Italia
Spagna
Scenari
climatici futuri
Eventi estremi
Temperature
Precipitazioni
Vento
Risposta
alle variabili
climatiche
Climate change versus
Building Envelope
Building Envelope versus
Climate change
Prestazioni
da controllare
Scelta del caso
studio per la
sperimentazione
Elementi costitutivi della ricerca


INVOLUCRO EDILIZIO
Involucro trasparente
Innovazione tecnologica
Involucro adattivo
Smart materials
Facciata continua
Limiti normativi e di verifica prestazionale
Attività di testing on-site e off-site su casi studio
Fallimenti e deficit prestazionali
Criterio di scelta del caso studio
Mock-up Unitized System
I step sperimentale: Attività di simulazione
II step sperimentale: Attività di testing
Grasshopper software
Sezione TCLab
Temperature estreme
Limiti software
Temperature estreme
Precipitazioni intense
Intensificazione carico da vento
Protocollo metodologico e sperimentale
Simulazione vs Testing
Metodo di valutazione delle prestazioni



PARTE PRIMA:
Le interconnessioni scalari e disciplinari dello stato dell'arte

I cambiamenti climatici: un nuovo campo di indagine per il progetto architettonico

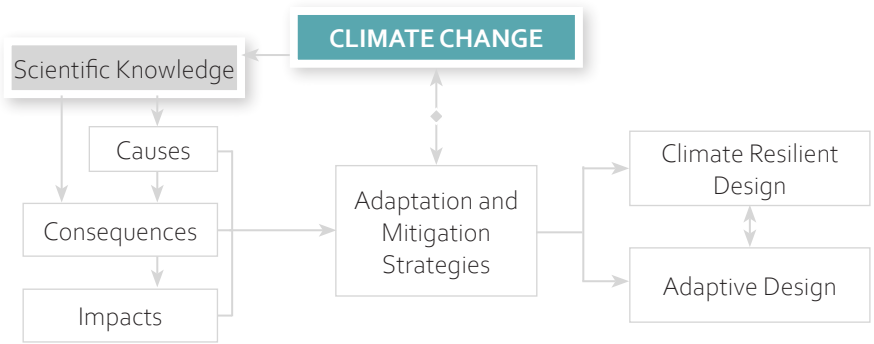
Capitolo 1

Quadro di riferimento
I cambiamenti climatici: cause, impatti e strategie di intervento

Abstract

The first chapter's objective is to contextualize, as organically and sequentially as possible, the background, knowledge base and assessment approaches used to understand the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, based on the IPCC's Sixth Assessment Report (AR6), in the context of strengthening the global response to the challenge of climate change. The climate change study is approached by identifying some fundamental steps that have characterized climate variability throughout geological history. However, today, the climate system is undergoing much more abrupt, extensive, and even more intense changes than in the past, as the anthropogenic impact has been added to the climatic forcing.
In view of this challenge, the focus is on two methodological-operational approaches: Climate Resilient Development and Adaptive Design, which define a solution framework that combines adaptation strategies with mitigation actions, which can direct adaptive actions on the entropized environment. It is important to highlight that the two approaches should not be seen as alternatives, but in a synergistic and interrelated way within each architectural project on climate adaptation, with emphasis on one or the other starting from recognition of strategic action priorities.In this perspective, it requires a different approach to architectural design, which becomes a process of action, learning and response through the monitoring capacity of vulnerability conditions and iterative risk management that represents an enabling condition. It is also intended to stimulate, in a constructive manner, interest in a topic that directly affects our lives and future generations.

Key-words
climate change, mitigation, adaptation, climate resilient design, adaptive design



Capitolo 1: Thematic Flow-Chart - Fase Istruttoria

1.1 La situazione globale in tema di cambiamenti climatici: I fondamenti scientifici

"Observational and model studies of
temperature change, climate feedbacks and changes
in the Earth's energy budget together provide confidence
in the magnitude of global warming
in response to past and future forcing"[1]
[IPCC, 2013, p. 16]

La crisi climatica è ormai un dato di fatto. A livello globale, il cambiamento climatico rappresenta la sfida più pressante che tutti i Paesi e le popolazioni abbiano mai affrontato, impegnando le potenze mondiali ad attuare misure, politiche e convenzioni che siano effettivamente efficaci.
Nel contesto attuale, il primo passo da percorrere è analizzare e comprendere cosa sono i cambiamenti climatici, risultando un passaggio fondamentale per sapere a cosa ci si riferisce esattamente quando si cita il climate change. Secondo la 'Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici'- UNFCCC, si tratta di "*qualsiasi cambiamento di clima attribuito direttamente o indirettamente ad attività umane, il quale altera la composizione dell'atmosfera mondiale e si aggiunge alla variabilità naturale del clima osservata in periodi di tempo comparabili*"[2].
La Comunità Scientifica è concorde nell'affermare che questo processo naturale che si verifica da due milioni di anni sulla Terra, a causa delle variazioni del ciclo solare, negli ultimi due secoli è stato accelerato dalle attività antropiche. Per comprendere l'entità di questo fenomeno e le possibilità di (re)azione da parte dell'uomo, bisogna far ricorso ai dati forniti dalla comunità scientifica, che inquadrano l'impatto delle attività umane sul pianeta in ottica storica.
Studi scientifici e documentazioni geologiche affermano che, nel corso delle ere che si sono succedute, il clima subiva trasformazioni indotte da fenomeni naturali, come per esempio, le eruzioni vulcaniche o per altri fattori ancora al vaglio dei ricercatori come lo spostamento dell'asse terrestre, le variazioni dell'energia solare, la tettonica a placche, eventi atmosferici di enorme portata. Nelle ere geologiche, infatti ci sono state numerose variazioni del clima a livello globale, con picchi di temperature ben più alti di quelli di cui sperimentiamo oggi. L'Europa stessa ha attraversato diverse fasi glaciali nella sua storia.
Assai documentata è la "piccola glaciazione" sviluppatasi tra la metà del XIV secolo e la metà del XIX secolo, dove le temperature medie si abbassarono in maniera improvvisa e importante, circa di 2 gradi. Un altro significativo evento fu l'eruzione del vulcano Tambora nel 1815 in Indonesia: la più grande eruzione registrata nella storia dell'uomo (magma 50 km3), con l'emissione di ceneri vulcaniche in quantità che bloccarono il calore solare causando un inverno che durò tutto il 1816 nel Nord America e nel Nord Europa. Per quanto recenti studi [Schurer, et al., 2019] abbiano dimostrato che il Tambora sia stato una causa fondamentale nell'anno senza estate, quando si parla di cambiamento climatico non conta il singolo evento, ogni fattore può contribuire in modo diverso e le manifestazioni sono varie e a volte difficili da prevedere [Auchmann, et al., 2012].
Un recente studio [Burke, et al., 2018] mette a confronto i climi previsti per i prossimi decenni con sei potenziali analoghi geostorici. Il grafico [Fig. 1.1] mostra la ricostruzione dell'andamento della temperatura media globale per gli ultimi 65 milioni di anni e le proiezioni per i futuri 100 anni nel caso di diversi scenari di emissione di gas serra.
I dati sul cambiamento climatico di questi ultimi decenni indicano una situazione pericolosa, che potrebbe portare nel futuro le concentrazioni di gas serra in atmosfera a valori analoghi a quelli di alcuni periodi caldi del lontano passato geologico. L'analogo climatico più recente risulta essere quello del periodo caldo del Pliocene medio, con una temperatura globale più alta di 3°C. I tassi di aumento della temperatura attesi per i prossimi anni, prevedono brusche variazioni climatiche, su breve asse temporale, e indicano una differenza

fondamentale tra i climi del prossimo futuro e quelli del passato geostorico.
Il rapido aumento delle temperature sottolinea come le corrispondenze con i climi storici e preindustriali sono rare e che si va verso climi geologicamente nuovi rispetto quelli considerati in questo studio.

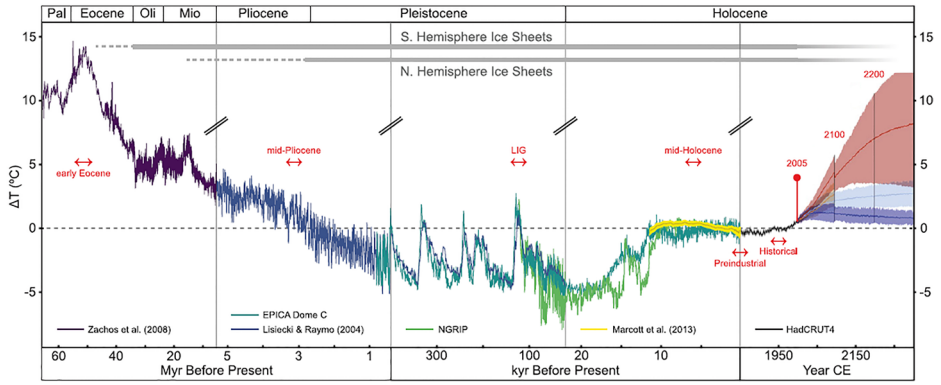


Fig. 1.1. Ricostruzione della temperatura media globale per gli ultimi 65 milioni di anni

La documentazione geologica mostra come la variabilità climatica che stiamo vivendo oggi si sviluppa con caratteristiche e ritmi diversi da quelli che hanno contraddistinto la storia geologica. La differenza sostanziale è legata alla scala temporale: i precedenti surriscaldamenti globali si verificavano nell'ordine di milioni di anni, mentre quello attuale, in particolare quello che si sta verificando dal XX secolo, si sta sviluppando alla scala di decenni.
La 'curva del clima' [Fig. 1.2], tratta da uno studio sulla prevedibilità del clima [Westerhold, et al., 2020] e denominata CENOGRID (CENOzoic Global Reference benthic foraminifer carbon and oxygen Isotope Dataset), identifica quattro distinti stati climatici - *Hothouse, Warmhouse, Coolhouse, Icehouse* (letteralmente serra, casa calda, casa fresca, ghiacciaia) - in funzione dei cambiamenti dell'orbita polare, delle concentrazioni di gas serra e del volume delle calotte polari. La ricostruzione della variazione della concentrazione di CO_2 in atmosfera nel corso del *Cenozoico,* mette in evidenza come questi tempi di variazione non hanno riscontro nei cicli naturali del pianeta ma sono correlati alla rapida crescita nelle emissioni di gas serra legate all'utilizzo di combustibili fossili e alle attività umane in generale.
I ricercatori hanno affermato che, ogni grande salto tra i diversi stati climatici era legato a un massiccio spostamento dei livelli di gas serra.

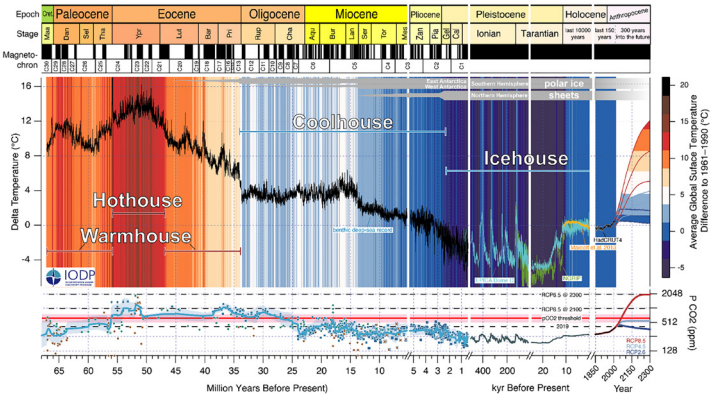


Fig. 2. Ricostruzione della CO_2 presente in atmosfera nell'era del Cenozoico e previsioni future al 2300

La Rivoluzione industriale[3] viene considerata il punto di partenza del riscaldamento della Terra e si prende consapevolezza che il clima reagisce velocemente ai cambiamenti indotti dall'uomo, in questo caso all'emissione di gas serra, considerati come causa principale del riscaldamento globale. Tra le sue cause va considerata ed è qui menzionata la rapida distruzione delle foreste in molte zone del mondo, che accentuando nell'atmosfera lo squilibrio tra immissione e fuoriuscita di anidride carbonica in quanto con le piante viene eliminata anche la loro azione fotosintetica di assorbimento della CO_2.
Vale la pena sottolineare che mentre il cambiamento climatico e il riscaldamento globale sono termini spesso usati in modo intercambiabile, il riscaldamento globale, inteso come l'attuale aumento della temperatura media globale vicino alla superficie terrestre, è solo un aspetto del cambiamento climatico.
Il riscaldamento del clima è quindi dovuto sia a variabilità intrinseche del sistema climatico, che a fattori esterni, sia naturali che antropici [Zucchetti, 2005]. Si chiama effetto serra antropico[4] e si aggiunge all'effetto serra naturale[5].
Gli effetti si cumulano e le conseguenze sull'ambiente sono discontinue ma irreversibili. La Terra è un sistema complesso e le conseguenze sono simili a un sistema caotico, dove piccole variazioni iniziali portano a grandi trasformazioni nel corso del tempo. Le conseguenze nel lungo periodo sono però peggiori, perché rischiano di mettere in crisi l'equilibrio dell'ecosistema su cui si basa la stessa vita sul nostro pianeta.
A livello generale, le emissioni di gas serra dovute all'impatto antropico e le relative concentrazioni in atmosfera aumentano il noto effetto serra, con il conseguente riscaldamento globale, a sua volta causa di fenomeni concatenati visibili soltanto sotto forma di fenomeni meteo più estremi (es. uragani, tempeste e inondazioni), scioglimento dei ghiacci polari, desertificazione e l'innalzamento dei livelli degli oceani. L'effetto serra ha una componente naturale e una antropica. Quella antropica, nonostante rappresenti il 5% circa del totale, risulta determinante nel processo di surriscaldamento globale attuale.

Per queste ragioni, lo studio della variabilità del clima, con una attenta valutazione dell'effetto antropico su di esso, rientra a pieno titolo nelle attività volte a comprendere come l'attività umana influenzi il clima del pianeta.

Ogni fattore che agisce sulle componenti del sistema climatico - atmosfera, idrosfera, criosfera, litosfera, biosfera, e le interazioni fra loro -, producendo un cambiamento nel sistema, è detto *fattore forzante*[6]. Sensibilità del clima è la dimensione della risposta del sistema a fronte della dimensione del fattore forzante [Orombelli, 2005]. Tali alterazioni possono però diventare a loro volta agenti determinanti di ulteriori emissioni ad effetto serra, in un'inversione di casualità e in un'amplificazione dei reciproci impatti definita, con una terminologia più precisa, "feedback climatici", quei processi in grado di amplificare o ridurre gli effetti di una forzante climatica.
Nel sistema climatico, numerosi e complessi meccanismi di *feedback* (retroazioni) positivi e negativi possono rendere non lineare la risposta (risposta fortemente discontinua a cambiamenti climatici) del sistema alla causa perturbante [Stocker, et al., 2012].
Il concetto di feedback può essere meglio chiarito se si immagina la Terra come un sistema composto da molte variabili. Se una di queste variabili viene amplificata energeticamente e per un arco temporale abbastanza lungo, si scatena una serie di processi che possono portare a due risultati: il *feedback positivo* e il *feedback negativo*.
Se si considera come forzante l'aumento della concentrazione di CO_2, che altera il bilancio energetico terrestre provocando un aumento della temperatura, il *feedback positivo* si ha quando la variabile iniziale viene ulteriormente amplificata (il riscaldamento iniziale aumenta a causa del l'emissione di CO_2 prodotta dagli incendi), mentre il *feedback negativo* si ottiene quando la variabile iniziale (riscaldamento iniziale) viene drasticamente ridotta

[Galbiati, 2019].
Il nuovo panorama e il nuovo contesto culturale e socio-economico ha richiesto una distinzione chiara e quantificabile tra cause naturali e antropogeniche delle mutazioni climatiche, ai fini del modellamento e della simulazione del clima[Mauelshagen, 2018].
Per fornire una fonte oggettiva di informazioni, analisi e dati scientifici sul clima, è stato istituito l'*Intergovernmental Panel on Climate Change* IPCC[7].

Le ultime valutazioni dell'IPCC sono contenute nel *Sesto Rapporto di Valutazione* (AR6), pubblicato nell'agosto 2021, che comprende tre contributi[8] dei Gruppi di Lavoro e concordano nell'affermare che gran parte del riscaldamento osservato negli ultimi 50 anni sia attribuibile alle attività umane. Per attività umane si intendono l'industria, l'agricoltura, la zootecnia, i trasporti, il riscaldamento e il raffrescamento delle abitazioni, la gestione dei rifiuti, considerate responsabili dell'aumento incontrollato di gas a effetto serra nell'atmosfera.
Ad avvalorare tale scenario, il primo volume (WG1) dell'ultimo Rapporto del Gruppo di lavoro 1 dell'IPCC, *Climate Change* 2021: [IPCC, 2021] rileva mediamente che la temperatura superficiale globale continuerà ad aumentare fino a raggiungere o superare 1,5°C e 2°C di riscaldamento, a meno che non si verifichino profonde riduzioni delle emissioni di CO_2 e di altri gas serra nei prossimi decenni.
Il rapporto mostra che le emissioni di gas serra provenienti dalle attività umane sono responsabili di circa 1,1°C di riscaldamento rispetto al periodo 1850-1900.I sistemi di monitoraggio dell'Osservatorio della *National Oceanic and Atmospheric Administration* NOAA[9] di Mauna Loa registrano le anomalie globali della temperatura e, i grafici che ne risultano, diventano uno strumento importante per descrivere lo stato attuale del clima globale.

Il grafico [Fig. 1.3] mostra che la temperatura superficiale globale registrata nel periodo gennaio-dicembre 2021 è stata di 0,84°C (1,51°F) sopra la media (per ogni decade l'aumento della temperatura è di + 0,08°C), a causa di un evento La Niña[10] all'inizio e alla fine dell'anno che ha portato un effetto di raffreddamento temporaneo, ma non ha invertito la tendenza generale all'aumento delle temperature.

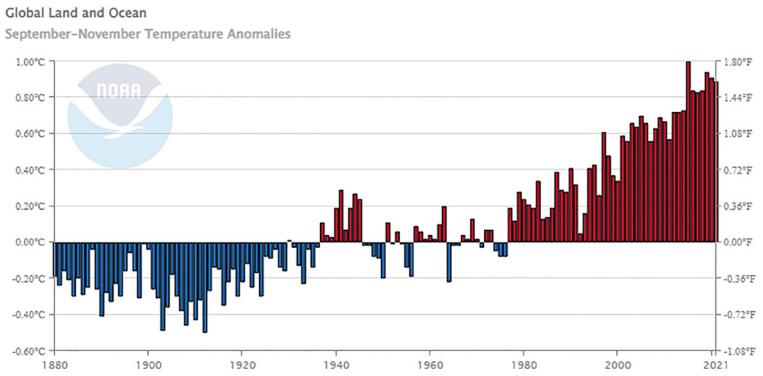


Fig. 1.3. Serie temporale (1880-2021) di anomalie della temperatura superficiale globale

Secondo l'"Annual 2021 Global Climate Report' [NOAA, 2022], il 2021 segna il 45° anno consecutivo (dal 1977) con temperature globali, almeno nominalmente, superiori alla media del XX secolo, risultando così il sesto periodo più caldo registrato tra tutti gli anni nel record 1880-2021; solo il 2016 con un'anomalia di temperatura pari a +1,06 °C è risultato più caldo.

I nove anni, infatti, dal 2013 al 2021 sono tra i 10 anni più caldi mai registrati [Fig. 1.4].

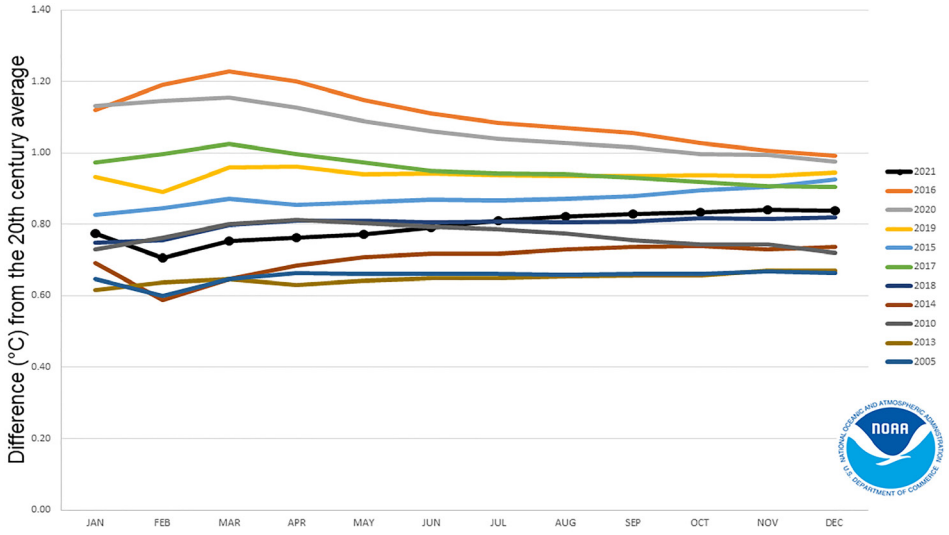


Fig. 1.4. Temperature globali per il 2021 e i 10 anni più caldi

Il rapporto *'European State of the Climate 2021'* [C3S, 2022]redatto da Climate Change Service11 (C3S), indica che negli ultimi 45 anni, le temperature sulla terraferma sono aumentate circa due volte più velocemente di quelle sull'oceano, mentre l'Artico si è riscaldato di circa 2,5°C sulla terraferma e di 3°C su terra e mare insieme.
Questi modelli consentono di stimare esattamente il contributo in aumento di temperatura di ciascuna delle attività antropogeniche, dovute all'aumento della concentrazione dei gas serra in atmosfera. I gas serra, *Greenhouse Gas* (GHG), con un significativo impatto sui cambiamenti climatici sono l'anidride carbonica[12] (CO_2), che rappresenta il 74,1 % delle emissioni (la maggior parte delle emissioni di CO_2 , circa il 92%, deriva dall'uso di combustibili fossili, in particolare per la generazione di elettricità e calore, trasporti, produzione e consumo), il metano (CH_4) e il protossido di azoto (N_2O) che rappresentano rispettivamente il 17,3% e il 6,2% delle emissioni totali di gas serra, principalmente dall'agricoltura, dal trattamento dei rifiuti e dal gas flaring.

Alla luce di questi dati, la concentrazione di CO_2 in atmosfera viene definita come uno degli indicatori più importanti del cambiamento climatico.
"*Le continue emissioni di gas serra aumentano notevolmente la probabilità di cambiamenti potenzialmente irreversibili nel sistema climatico globale, in particolare per quanto riguarda il contributo delle calotte glaciali al cambiamento del livello globale del mare*" [Arias et al., 2021, p. 63].
L'inizio della pandemia di COVID-19 all'inizio della primavera del 2020 ha causato cambiamenti drastici nella vita delle persone e nell'attività socioeconomica. Le misure restrittive adottate per contenere il virus hanno inevitabilmente avuto un impatto positivo sul consumo di energia e sulle emissioni di CO_2 antropogeniche.
Uno studio [Nicolini, et al., 2022], basato sulla misurazione dei flussi urbani di CO_2 durante il primo lock-down in tredici distretti urbani europei, ha rilevato che, le emissioni di CO_2 urbane sono state ridotte rispetto allo stesso periodo degli anni precedenti dal 5% all'87% nei distretti analizzati, principalmente a causa delle limitazioni alla mobilità.

Una prima pubblicazione dell'ottobre 2020 [Liu, et al., 2020], una brusca diminuzione dell'8,8% delle emissioni globali di CO_2 (−1551 Mt CO_2) nella prima metà del 2020 rispetto allo stesso periodo del 2019.
Già alla fine di quel periodo, con la ripresa delle attività economiche e produttive, le emissioni erano tornate a crescere e una stima aggiornata [Liu, et al., 2022], ha registrato che, in tutto il 2020, la riduzione è stata del 6,3% (con intervallo di confidenza tra 5,5% e 7,2%) rispetto al 2019. Nonostante le riduzioni - temporanee in quanto non riflettono cambiamenti strutturali nei sistemi economici, di trasporto o energetici - delle emissioni globali di CO_2 [Le Quéré, et al., 2020], le concentrazioni atmosferiche di CO_2 sono aumentate progressivamente nel tempo, raggiungendo gli attuali valori critici di 417,42 ppm (giugno 2022, mentre a giugno 2021 si attestava a 415,20: ultimo aggiornamento 5 settembre 2022), valore di CO_2 media mensile globale rilevato dagli scienziati dell'Osservatorio NOAA di Mauna Loa.
Il grafico [Fig. 1.5], denominato "curva di Keeling"[13] [Harris, 2010], mostra il record di CO_2, rispetto i livelli preindustriali di circa 278 ppm [Fig. 1.6].

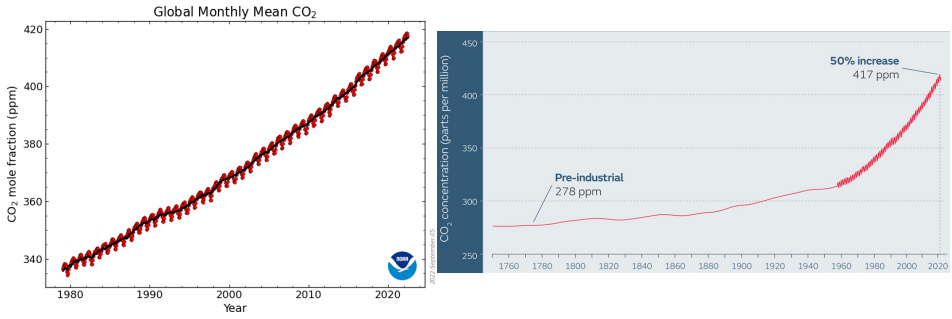


Fig. 1.5. Andamento della concentrazione della CO_2 negli ultimi anni

Fig. 1.6. Andamento della concentrazione della CO_2 raggiungendo il 50% rispetto i livelli del periodo preindustriale

Nel 2021, anche le concentrazioni di metano (CH_4) in atmosfera hanno continuato a salire, raggiungendo 1,876 ppm [Fig. 1.7] -oltre 2,5 volte quella dell'epoca preindustriale- influenzando la temperatura terrestre e il sistema climatico in maniera incisiva. Sebbene il metano sia molto meno abbondante nell'atmosfera rispetto alla CO_2, assorbe però la radiazione infrarossa termica in modo molto più efficiente e, di conseguenza, ha un potenziale di riscaldamento globale circa 80 volte più forte per unità di massa rispetto alla CO_2, su una scala temporale di 20 anni, e circa 30 volte più potente su una scala temporale di 100 anni.

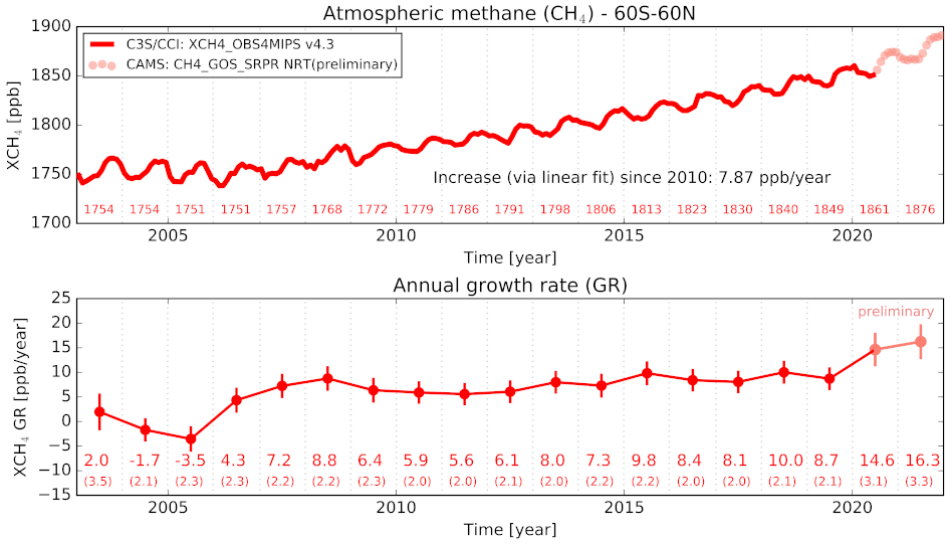
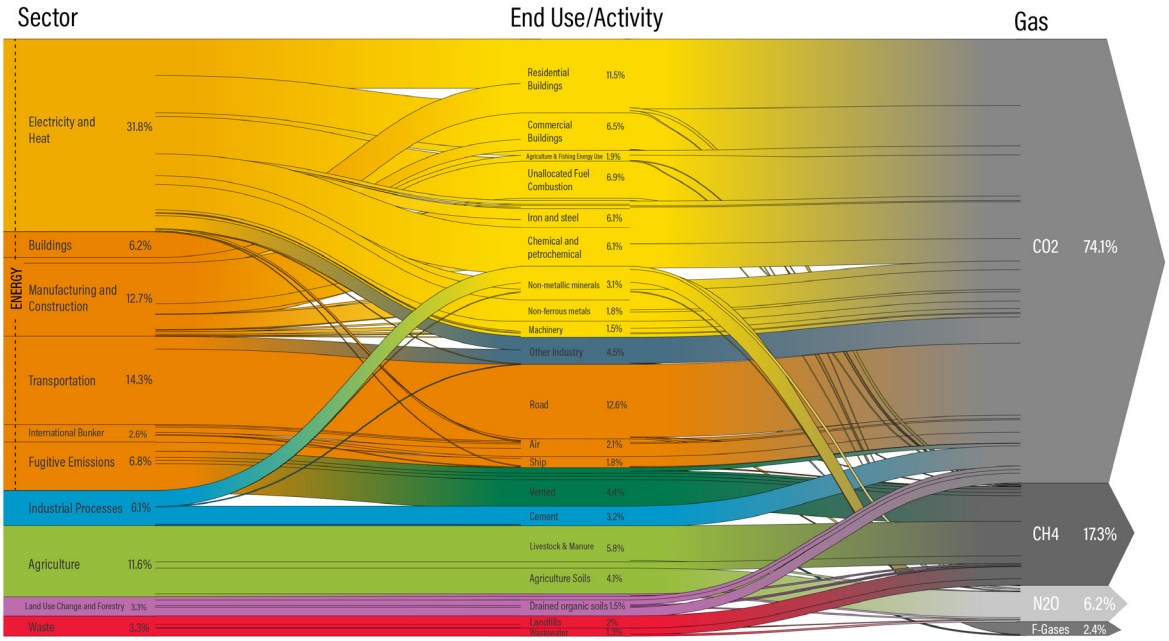


Fig. 1.7. Concentrazione in atmosfera del metano

Per capire come si possono ridurre le emissioni nel modo più efficace e quali emissioni possono e non possono essere eliminate con le tecnologie attuali, si deve prima di tutto analizzare da dove provengono le nostre emissioni.

La piattaforma *Climate Watch di World Resources Institute*[14] (WRI) offre dati completi sulle emissioni per tutti i paesi, i settori e i gas.
L'ultima ripartizione delle emissioni per CO2 [Fig. 1.8] pubblicata e riferita all'anno 2019, rileva che il settore energetico è la fonte principale di gas serra, con una quota pari al 74,1% (il dato aggiornato a giugno 2022 si attesta al 75,6%).
Gli altri settori di punta che producono emissioni sono l'agricoltura, come l'allevamento e la coltivazione delle colture (5,8 GtCO 2 e, ovvero 11,6%); processi industriali di prodotti chimici, cemento e altro (3,1 GtCO 2 e, ovvero 6,1%); rifiuti, comprese discariche e acque reflue (1,6 GtCO 2 e, o 3,3%); e l'uso del suolo, il cambiamento di uso del suolo e la silvicoltura, come la deforestazione (1,6 GtCO 2 e, o 3,3%).

Fig. 1.8. Emissioni globali per settore riferite all'anno 2019



La colonna centrale del grafico in alto mostra le emissioni per attività di uso finale, illustrando le attività specifiche da cui derivano le emissioni.
Le attività che determinano la maggior parte delle emissioni di energia includono il trasporto su strada (12,6% delle emissioni totali), gli edifici residenziali (11,5% delle emissioni totali) e gli edifici commerciali (6,5% delle emissioni totali).
Le emissioni di tali attività comprendono sia le emissioni dirette dalla combustione di combustibili fossili, sia le emissioni indirette da attività come l'uso dell'elettricità.

Dall'analisi di questi dati, si può affermare che dal 1990, tre settori si distinguono come le fonti di emissioni di gas serra in più rapida crescita: i processi industriali sono cresciuti del 203%, l'elettricità e il riscaldamento (un sotto-settore dell'energia) dell'84% e i trasporti (un sotto-settore dell'energia) del 78%.

Secondo il *Global Energy Perspective 2022* [McKinsey & Company, 2022], un fattore chiave per la riduzione del consumo globale di energia è l'energia elettrica innescata da una maggiore efficienza degli usi finali negli edifici, nei trasporti e nell'industria.
Secondo le proiezioni [Fig. 1.9], il consumo di energia elettrica dovrebbe triplicare ne 2050, rappresentando una delle prime leve di decarbonizzazione, essendo la più economica e facile da implementare nella maggior parte dei settori.
Come per i veicoli elettrici, anche i carburanti sostenibili possono fornire riduzioni delle emissioni di gas serra e potrebbero rappresentare fino al 37% della domanda di energia nei trasporti entro il 2050.

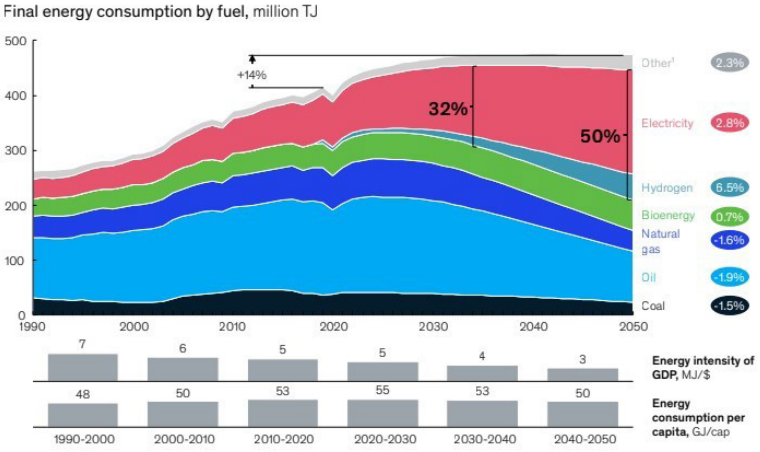


Fig. 1.9. Consumo finale di energia per combustibile.

Un recente studio [Beusch, 2022], quantifica il contributo di CO_2 al riscaldamento previsto a livello globale per il 2030 dei cinque maggiori emettitori quali Cina, Stati Uniti, UE-27, India e Russia. Questa ricerca mette in evidenza che, le loro emissioni cumulate nel periodo 1991-2030 si tradurranno in anni estremamente caldi ed evidenziano la responsabilità dei singoli emettitori nel guidare le azioni sulla politica climatica.
Su *Frontiers in Sustainable Cities*, è stata pubblicata una ricerca [Wei, 2021], in cui si analizza quali sono le principali città di tutto il mondo ad emettere gas serra. Il risultato ha dimostrato come solo 25 mega-città producano il 52% delle emissioni di gas serra totali e si trovano in Cina (Handan, Shanghai e Suzhou), Giappone (Tokyo), Russia (Mosca) e Turchia (Istanbul).

Le pagine seguenti, nelle Figure 1.10-1.13, riportano il dettaglio dei dati relativi alla sola anidride carbonica, trattandosi del gas più emesso e più impattante sul cambiamento climatico. Nello specifico, i grafici delle figure 1.10 e 1.11 mostrano la ripartizione dei gas serra totali (la somma di tutti i gas serra, misurati in tonnellate equivalenti di anidride carbonica) per settore e riferita a Paesi nel mondo.
Sia in Italia [Fig. 1.12] che in Spagna [Fig. 1.13], domina la produzione di elettricità e calore, seguita dai trasporti, edifici e dalla produzione edilizia.

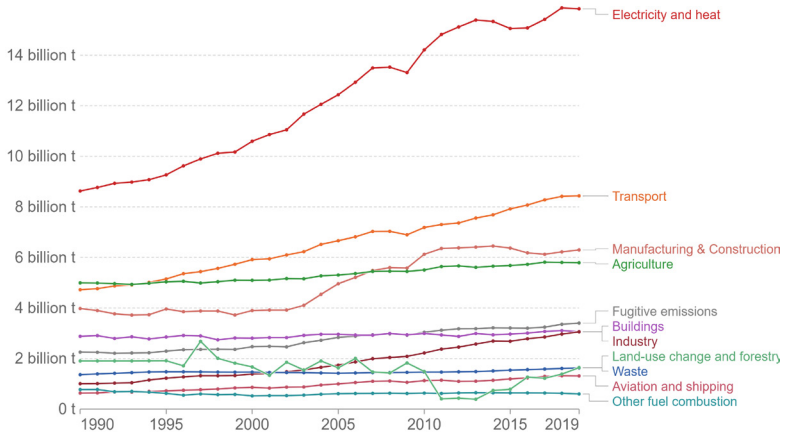


Fig. 1.10. Evoluzione delle emissioni antropogeniche totali di GHG; valori per settore economico

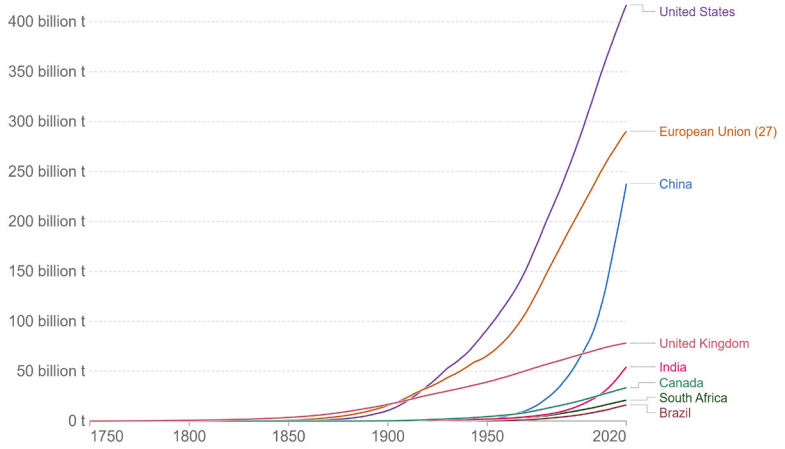


Fig. 1.11. Emissioni di anidride carbonica (CO_2) da combustibili fossili e industria

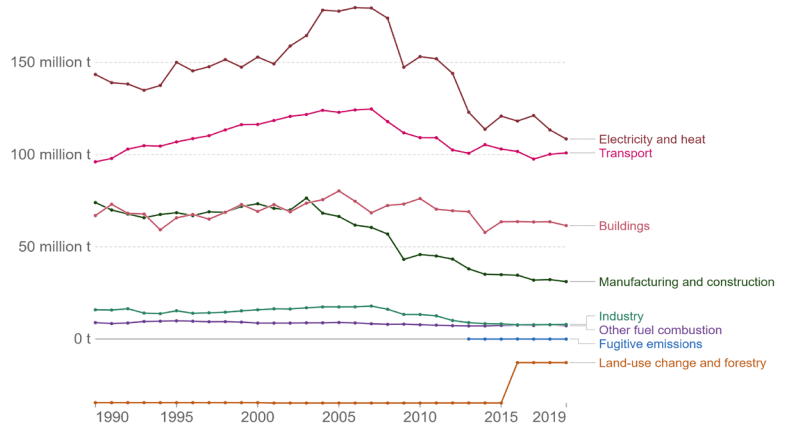


Fig. 1.12. Emissioni di anidride carbonica (CO_2) per settore – valori aggiornati all'anno 2019 per Paese: Italia

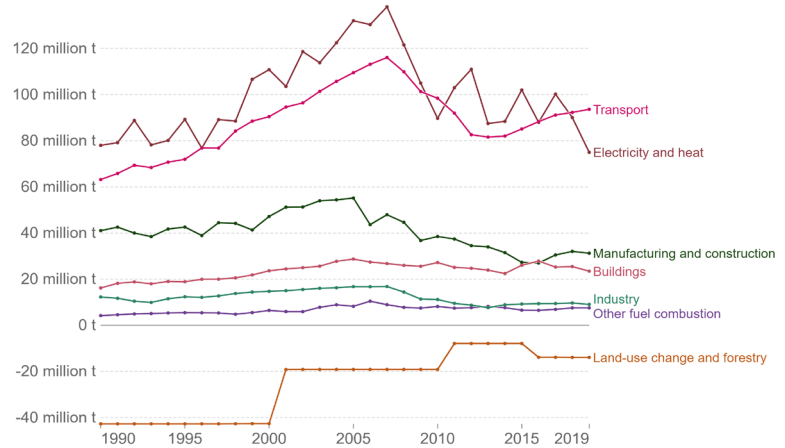


Fig. 1.13. Emissioni di anidride carbonica (CO_2) per settore – valori aggiornati all'anno 2019 per Paese: Spagna

Questo sintetico scenario di dati, rileva che tutti i Paesi, in particolare le principali economie mondiali, devono intensificare le loro ambizioni climatiche, affinché le emissioni di gas serra scendano del 55% prima del 2030.
In ultima analisi, si esaminano i cambiamenti nel sistema climatico previsti per il futuro e determinati dalle emissioni di gas a effetto serra.
L'entità delle future emissioni vengono rappresentate attraverso i cosiddetti 'scenari di emissione' - *Representative Concentration Pathways*[15] (RCP) – già introdotti nel Quinto rapporto di Valutazione AR5 dell'IPCC [IPCC, 2014]. I Percorsi di concentrazione rappresentativi (RCP) descrivono quattro diversi percorsi del XXI secolo per le emissioni di gas serra (GHG) [Fig. 1.14].

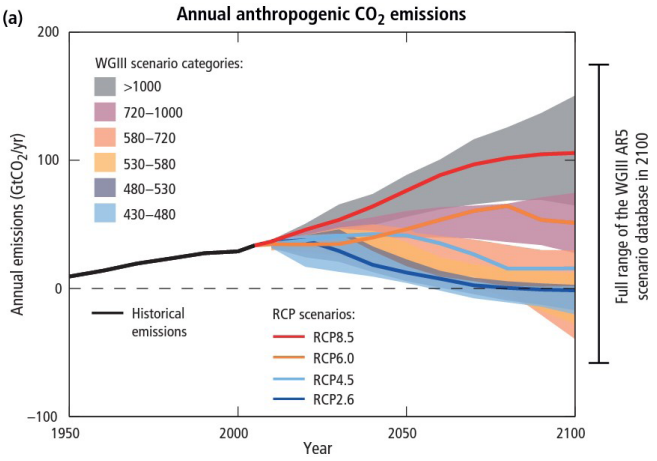


Fig. 1.14. Emissioni antropogeniche annuali di anidride carbonica (CO_2) nei differenti scenari RCP

Gli RCP comprendono uno scenario di mitigazione rigoroso (RCP2.6), due scenari intermedi (RCP4.5 e RCP6.0) e uno scenario con emissioni di gas serra molto elevate (RCP8.5).
Gli scenari di cambiamento climatico, sotto forma di proiezioni, costituiscono un importante strumento per raggiungere gli obiettivi in materia di clima e divengono un valido supporto per l'elaborazione di piani e politiche d'azione climatica.
Ciascun RCP traccia una diversa traiettoria di emissioni (percorso) e concentrazione di emissioni cumulativa nel 2100. Questi set di dati possono quindi essere incorporati in qualsiasi esercizio di modellazione, fornendo parametri coerenti per ciascuna traiettoria di emissioni e una base coerente per tutti i team di modellazione climatica in qualsiasi parte del mondo [Wayne, 2014].
Si intende evidenziare che il database centrale, ovvero la repository principale dei dati climatici, è accessibile gratuitamente tramite il seguente link:
https://tntcat.iiasa.ac.at/RcpDb/dsd?Action=htmlpage&page=compare

È nel Sesto Rapporto di Valutazione AR6 dell'IPCC, che vengono delineati una serie di cinque nuovi scenari illustrativi sulle emissioni al fine di esplorare la risposta del clima a una gamma più ampia di futuri gas serra, uso del suolo e inquinanti atmosferici rispetto a quelli valutati in AR5. Gli scenari sono denominati *Percorsi Socio-economici Condivisi – Shared Socioeconomic Pathways*[16] (SSP) e hanno lo scopo di consentire la ricerca sui cambiamenti climatici e l'analisi delle politiche e sono progettati per abbracciare un'ampia gamma di combinazioni di sfide per la mitigazione e l'adattamento ai cambiamenti climatici [Riahi, et al., 2017].

Gli SSP sono cinque e vanno da:
- *'emissioni molto basse- Very low Emission'* SSP1-1.9,
- '*basse-Low Emission*' SSP1-2.6,
- '*intermedie-Intermediate Scenario*' SSP2-4.5,
- '*alte-High Emission*' SSP3-7.0,
- '*molto alte-Very high Emission*' SSP5-8.5.

Il numero associato a ciascun SSP si riferisce al Forzante Radiativo (Radiative Forcing – RF) espresso in unità di Watt per metro quadrato (W/m2) ed indica l'entità dei cambiamenti climatici antropogenici fino 2100 rispetto al periodo preindustriale (da 1,9 a 8,5 W/m2). Nell'AR5 non era presente SSP1-1.9 ed è stato aggiunto nell'AR6 in quanto, non avendo iniziato riduzioni CO_2 prima del 2020, nessuno degli scenari di emissioni simulati nell'AR5, nemmeno SSP1-2.6, consentiva di rimanere entro 1.5°C.

Nel grafico [Fig. 1.15] le linee blu, riferite agli scenari SSP1-1.9 e 2.6, indicano la stabilità delle emissioni di CO_2 fino al 2025 (scenario ottimale da raggiungere), mentre le attuali tendenze delle emissioni di CO_2 sono più vicine agli scenari rossi.
Allo stesso tempo, non c'è un punto di non ritorno termico in cui diventa "troppo tardi" per frenare il cambiamento climatico e le sue conseguenze dannose. Ogni ulteriore bit di riscaldamento globale al di sopra delle temperature attuali comporterà maggiori rischi di peggioramento del clima estremo del tipo attualmente sperimentato in tutto il mondo.

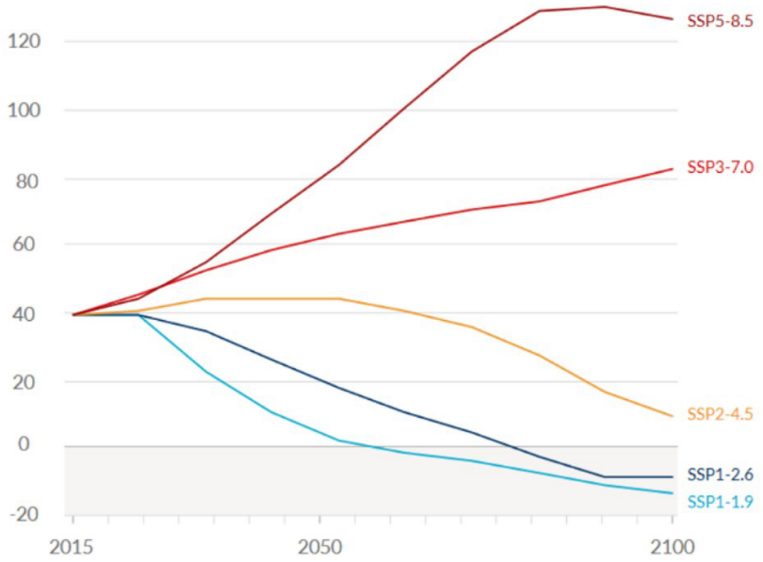


Fig. 1.15. Emissioni globali di anidride carbonica (in miliardi di tonnellate all'anno) dal 2015 al 2100 in ciascuno dei cinque scenari SSP

Le ultime simulazioni riguardano:
- due scenari SSP1 che raggiungerebbero gli obiettivi di Parigi di limitare il riscaldamento globale a 1,5 e 2°C (2,7 e 3,6°F);
- uno scenario SSP2 in cui le temperature si avvicinano a 3°C (5,4°F) nell'anno 2100;
- uno scenario SSP3 con un riscaldamento globale di circa 4°C (7,2°F) entro la fine del secolo;
- uno scenario SSP5 "brucia tutti i combustibili fossili possibili" risultando vicino a 5 ° C (9 ° F), sempre entro il 2100 [Fig. 1.16].

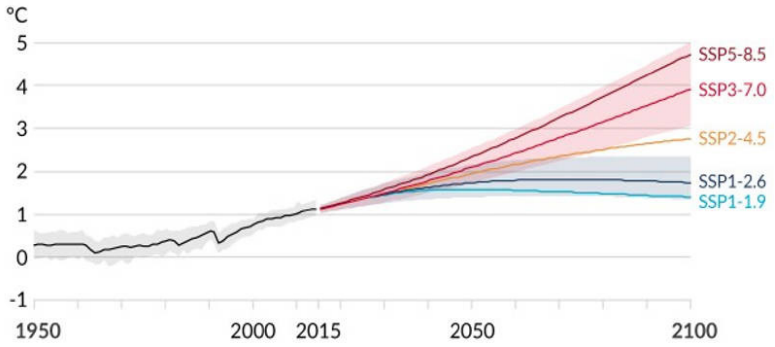
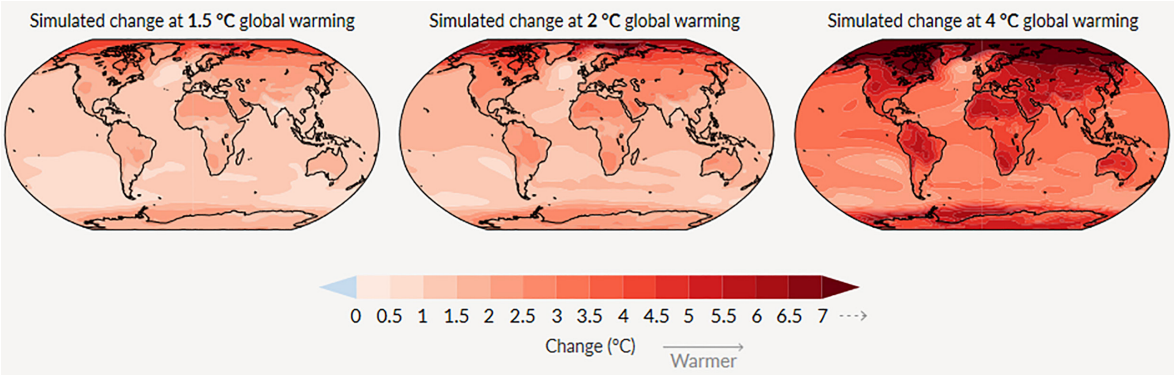


Fig. 1.16. Variazione della temperatura superficiale media globale prevista in ciascuno dei cinque scenari SSP. Fonte: IPCC_AR6_WGI_TS

Da quanto riportato sopra, le temperature continueranno a salire sino almeno a metà secolo, in tutti gli scenari considerati: l'incremento delle temperature supererà sia 1.5°C che 2.0°C entro il XXI secolo a meno di drastiche riduzioni delle emissioni della Co2 e degli altri GHG entro i prossimi 10 anni.
Da queste analisi, si può affermare che diverse variazioni dello stato attuale del clima come, aumento della frequenza e dell'intensità degli estremi di temperatura, ondate di calore, forti precipitazioni, siccità, perdita di ghiaccio marino artico, manto nevoso e permafrost, diventeranno più intense al crescere del riscaldamento globale.
Questo è dovuto al fatto che la capacità di assorbimento di CO_2 da terra e oceano non è illimitata e di conseguenza resta in atmosfera facendo aumentare la temperatura [Fig. 1.17].

Fig. 1.17. Variazione media annuale della temperatura (°C), relativa al periodo 1850-1900



Questi scenari si traducono in condizioni climatiche irreversibili: ogni 0,5°C in più di riscaldamento globale provoca aumenti chiaramente distinguibili dell'intensità e della frequenza degli estremi caldi, comprese le ondate di caldo (molto probabili) e le forti precipitazioni (confidenza elevata), così come la siccità agricola ed ecologica.

In particolare le precipitazioni aumenteranno alle alte latitudini, nel Pacifico equatoriale nelle aree monsoniche, ma diminuiranno nelle altre aree subtropicali, mentre le nevi si scioglieranno anticipatamente a primavera, con conseguenti più alti picchi di portata [Fig. 1.18].

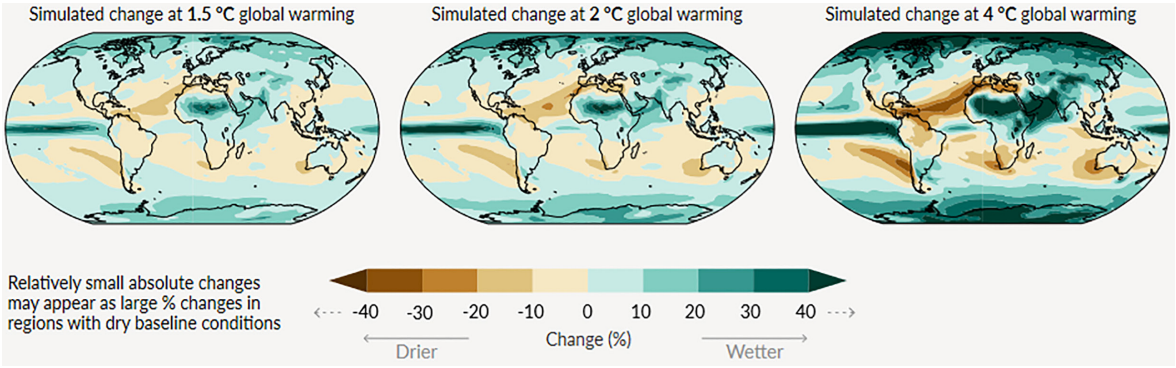


Fig. 1.18. Variazione media annuale delle precipitazioni (%), relativa al periodo 1850-1900

In conclusione, l'intento di questo primo paragrafo si basa sulla costruzione di un quadro di sintesi sulla lettura ragionata di dati rispetto ai quali è assodato che la CO_2 e la temperatura *co-variano*, sia nel passato che nel futuro, e che la CO_2 e le temperature previste sono simili a quelle di molti milioni di anni fa.
Attraverso le ricostruzioni climatiche – dalle ere geologiche agli scenari futuri – si dimostra che i livelli di riscaldamento globale che non sono stati osservati in milioni di anni potrebbero essere raggiunti entro il 2300, a seconda del percorso di emissioni che viene seguito. Per esempio, l'ultima volta che la temperatura superficiale globale è stata mantenuta uguale o superiore a 2,5°C rispetto al 1850-1900 è stata oltre 3 milioni di anni fa.

Il grafico sottostante [Fig. 19] rileva che nei due scenari a basse emissioni SSP1-1.9 e 2.6 si vanno a consolidare temperature (+1,5°C) mai verificatesi negli ultimi 3.000.000 di anni, nello scenario intermedio si vanno a consolidare temperature (+3°C) presenti più di 5.000.000 di anni fa ed infine negli scenari ad alte emissioni si raggiungono temperature prossime ai +10°C, presenti più di 40.000.000 di anni fa.

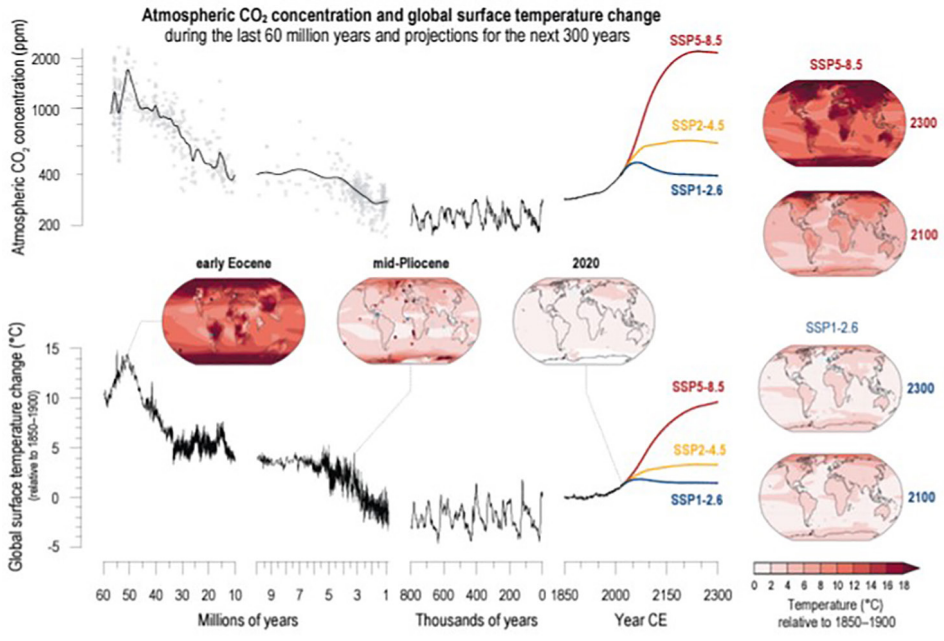


Fig. 1.19. Variazione media annuale della temperatura (°C), relativa al periodo 1850-1900

Sebbene l'avanzamento scientifico e tecnologico ha comportato un miglioramento della quantità e qualità delle informazioni climatiche, oggi serve un vero e proprio cambiamento di paradigma per tradurre le analisi scientifiche in azioni operative al fine di raggiungere entro il 2050 la cosiddetta *Carbon Neutrality*[17] a livello globale.
Difatti, il cambiamento climatico non sta avvenendo isolatamente e non può essere al contempo considerato un fenomeno singolo, ma si è sviluppato e continua a crescere di concerto con altri processi di cambiamento ambientale, sociale, tecnico, economico e culturale.
Per questi motivi e in base alle proiezioni climatiche disponibili, si mette in evidenza l'estrema urgenza di interventi tempestivi e sostanziali per la riduzione delle emissioni clima-alteranti, attraverso nuovi approcci operativi-applicativi delle strategie di mitigazione e adattamento che sono trattate nel successivo paragrafo.

1.2 Le risposte all'azione climatica: una nuova visione di attuazione delle strategie di mitigazione e adattamento

"Many adaptation and mitigation options can help address climate change,
but no single option is sufficient by itself.
Effective implementation depends on policies and cooperation at all scales
and can be enhanced through integrated responses
that link adaptation and mitigation with other societal objectives"[18]
[IPCC, 2014, p. 26]

Prima di addentrarci nella tematica sulle strategie di risposta per contrastare i cambiamenti climatici, è necessario porre l'attenzione su alcuni concetti chiave, utili alla conoscenza e alla comprensione di una questione complessa.

Le principali fonti scientifiche concordano nel sostenere che, nei prossimi decenni, i cambiamenti climatici attesi nei vari Paesi sono: l'innalzamento eccezionale delle temperature, un aumento della frequenza di eventi meteorologici estremi come ondate di calore, siccità ed eventi di precipitazione intensa, una riduzione delle precipitazioni annuali medie che a loro volta provocheranno rilevanti impatti.
Lo storico *Accordo di Parigi*[19] rafforza l'obiettivo di mantenere la crescita della temperatura media globale *"ben al di sotto dei 2 gradi centigradi"* entro la fine del secolo, rispetto ai livelli pre-industriali. Più recentemente, nel 2019, l'Unione Europea ha presentato l'*European Green Deal*[20], un piano che punta a rendere l'Europa neutrale per il clima entro il 2050 e a perseguire gli sforzi per limitare gli impatti.
Gli impatti dei cambiamenti climatici si differenzieranno fra i vari Paesi – in base alle caratteristiche geografiche locali e alle caratteristiche socio-economiche - e diventa quindi essenziale la comprensione delle *vulnerabilità* e dei *rischi* specifici ai fini di adottare piani d'azione ad hoc per ogni Paese.
Il concetto di *vulnerabilità* viene definito dall'IPCC [IPCC, 2014], *"la propensione o la predisposizione degli elementi esposti a essere influenzati negativamente. Il termine comprende una varietà di concetti ed elementi, tra cui la sensibilità o suscettibilità al danno e la mancanza di capacità di far fronte e di adattarsi".*
Mentre il concetto di *rischio*, che risulta essere associato alle tre componenti di esposizione, pericolosità e vulnerabilità, è *"spesso rappresentato come la probabilità che si verifichino eventi o tendenze pericolose moltiplicata per gli impatti se questi eventi o tendenze si verificano"* [IPCC, 2014].
È ormai assodato che, i rischi nel prossimo futuro (2021-2040) sono stimati considerando l'aumento della temperatura di 1,5 °C. Questo aumento di temperatura causerebbe inevitabilmente un'amplificazione non solo dei rischi climatici ma moltiplicherebbe i rischi per gli ecosistemi e gli esseri umani.

Alcune regioni d'Europa subiranno cambiamenti più rapidi di altre e ogni regione si troverà ad affrontare diversi tipi di eventi meteorologici estremi. Secondo il Global Climate Risk Index 2021, tra il 2000 e il 2019, oltre 475.000 persone hanno perso la vita a causa di oltre 11.000 eventi meteorologici estremi a livello globale, come le tempeste, le inondazioni e le ondate di caldo [Eckstein, et al., 2021].

"L'aumento della temperatura globale, l'innalzamento del livello del mare, l'acidificazione degli oceani e altre conseguenze del cambiamento climatico stanno mettendo seriamente a repentaglio le zone costiere e i paesi al di sotto del livello del mare, compresi molti paesi meno sviluppati e piccoli stati insulari in via di sviluppo" [Agenda 2030, 2015, p. 5].

Gli impatti di questi eventi hanno colpito più duramente i Paesi più poveri data la loro scarsa vulnerabilità agli effetti e una capacità di risposta (in termini di tempo) lenta nelle azioni di ricostruzione. Le trasformazioni correlate agli episodi di cambiamento climatico trovano ancora i Paesi non preparati a farvi fronte in modo strutturale, favorendo delle soluzioni generate dall'emergenza [Lucarelli, et al., 2017] e non dall'interpretazione previsionale e resiliente degli eventi per essere preparati a situazioni più gravi in futuro.
La capacità di 'far fronte', la *coping capacity* è strettamente correlata ad una continua consapevolezza nell'utilizzo e nella buona gestione delle risorse disponibili, sia in tempi normali che in caso di catastrofi o condizioni avverse [UNGA, 2016].
L'*Adaptation Gap Report 2020*, pubblicato dal Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente (Unep), sostiene che uno dei limiti per l'adozione e l'attuazione di misure specifiche si distingue nella permanenza di enormi lacune nella finanza per i Paesi in via di sviluppo: i costi annuali di adattamento in questi Paesi sono attualmente stimati in 70 miliardi di dollari, con la previsione di raggiungere 140-300 miliardi di dollari nel 2030 e 280-500 miliardi di dollari nel 2050 [UNEP, 2021].
Una sfida fondamentale nell'identificazione di politiche climatiche eque è il raggiungimento di una mitigazione senza sovraccaricare le popolazioni già svantaggiate, ad esempio attraverso l'aumento dei prezzi dell'energia e dei generi alimentari o la perdita di posti di lavoro [Budolfson, 2021]. In effetti, il rapporto pone un'attenzione particolare sulle soluzioni basate sulla natura, le *Nature Based Solutions* NBS21, come opzioni a basso costo che riducono i rischi climatici, ripristinano e proteggono la biodiversità e apportano benefici alle comunità e alle economie.

L'azione di risposta al cambiamento climatico è definita dalle ormai note traiettorie strategiche di *mitigazione*[22] e *adattamento*[23], come viene affermato negli ultimi contributi dei Gruppi di Lavoro WG II (impatti, adattamento e vulnerabilità) [IPCC, 2022] e WG III (mitigazione) [IPCC, 2022] che fanno parte dell'ultimo Rapporto di Valutazione dell'IPCC (i contributi costituiscono la base per la redazione del presente paragrafo).
Questi due documenti sono importanti input per i negoziati della COP 27 di novembre 2022 e per il *Global Stocktake*[24] del 2023, il processo di revisione dei progressi dei Paesi verso il raggiungimento degli obiettivi dell'accordo di Parigi.
Si vuole però sottolineare che i rapporti dell'IPCC non sostengono alcuna specifica opzione di mitigazione e adattamento, ma mostrano il potenziale, i limiti, le barriere e i benefici delle diverse azioni, sia nel breve e lungo termine, per diversi obiettivi di contenimento del riscaldamento globale, ai fini di evitare eventi più pericolosi.

Riportando l'attenzione ai concetti di mitigazione e adattamento, con il primo termine ci si riferisce a tutte quelle azioni che riducono l'emissione in atmosfera dei gas serra responsabili del riscaldamento globale (ad esempio, la combustione di combustibili fossili per l'elettricità, il calore o i trasporti) o rafforzi e potenzi le fonti di assorbimento degli stessi,

mentre il secondo termine indica l'insieme delle azioni finalizzate a ridurre i danni causati dal cambiamento climatico (come l'innalzamento del livello del mare, eventi meteorologici estremi più intensi), ma anche a trarre beneficio da eventuali opportunità determinate dai cambiamenti stessi.
Secondo il rapporto IPCC WG III (mitigazione) [IPCC, 2022], vi sono attualmente tecnologie e pratiche di mitigazione differenti applicabili in diversi settori: la produzione di energia, i trasporti, le costruzioni, l'industria, l'agricoltura, la sivicoltura/foreste, i rifiuti - [Fig. 1.20].

ENERGY	Wind energy, solar energy, bioelectricity, hydropower, geothermal energy, nuclear energy, carbon capture and storage CCS, bioelectricity with CCS, reduce CH_4 emission from coal mining, reduce CH_4 emission from oil and gas
AFOLU	Carbon sequestration in agriculture, reduce CH_4 and N_2O emission in agriculture, reduce conversion of forest and other ecosystem , ecosystem restoration, afforestation, reforestation, improved sustainable forest management, reduce food loss and food waste, shift to balanced, sustainable healthy diets
BUILDINGS	Avoid demand for energy services, efficient lighting, appliances and equipment, new buildings with high energy performance, onsite renewable production and use, improvement of existing building stock, enhanced use of food products
TRANSPORT	Fuel efficient light duty vehicles, electric light vehicles shift to public transportation, shift to bike and e-bikes, fuel efficient heavy duty vehicles incl. buses, shipping: energy efficiency optimization, aviation: energy efficiency, biofuels
INDUSTRY	Energy efficiency, material efficiency, enhanced recycling, fuel switching, feedstock decarburization, process change, carbon change, carbon capture with utilization CCU and CCS, cementitious material substitution, reduce of non-CO_2 emissions
OTHER	Reduce emission of fluorinated gas, reduce CH_4 emission from solid waste and from wastewater

Fig. 1.20. Opzioni di mitigazione per i diversi settori

In generale, queste strategie promuovono l'utilizzo di energie rinnovabili, come quella eolica, solare, idroelettrica e da biomassa e, sostengono l'innovazione per lo sviluppo di tecnologie di cattura e stoccaggio del carbonio per intrappolare e immagazzinare la CO_2 emessa dalle centrali elettriche e da altri impianti di grandi dimensioni.
Fondamentale per il settore industriale è inoltre il coordinamento di tutte le attività presenti nei processi produttivi, dalla gestione della domanda all'efficienza energetica e i flussi di materiali.

Per l'adattamento invece, si distinguono due tipologie principali di approcci [IPCC, 2022]:
- *Incrementale*: Gli adattamenti incrementali ai cambiamenti climatici sono intesi come estensioni di azioni e comportamenti che già riducono le perdite o aumentano i benefici delle variazioni naturali degli eventi climatici estremi;

- *Trasformativo*: Adattamento che modifica ii caratteri fondamentali di un sistema socio-e-

cologico in previsione del cambiamento climatico e dei suoi impatti. Questo approccio, spinto dall'innovazione tecnologica, si basa su una prospettiva più ampia e sistemica, al fine di integrare l'adattamento con altri aspetti di sviluppo e trasformare le sfide del cambiamento climatico in opportunità.

All'interno di questi approcci, si identificano tre misure di adattamento [Gancheva, et al., 2020]:
- *Grey measures (approccio tecnologico)*: Le misure grigie riguardano l'infrastruttura fisica e si basano su soluzioni tecnologiche per attrezzare meglio le persone e i luoghi alle conseguenze di un clima che cambia (ad esempio: la progettazione di spazi pubblici per meglio affrontare le tempeste o la progettazione di edifici in grado di affrontare meglio le ondate di calore). L'accesso a tecnologie migliori con opzioni ingegnerizzate deve essere garantito per lungo termine affinché si possa verificare il potenziale nei processi di adattamento;

- *Green measures (approccio eco-sistemico)*: Le misure verdi basate sulla natura, spesso rappresentano soluzioni a basso costo e impatto per migliorare la resilienza dei sistemi, perché continueranno a produrre benefici anche se gli impatti climatici non si verificano o sono meno gravi del previsto.
L'adattamento basato sugli eco-sistemi può ridurre i rischi climatici, offrendo anche co-benefici per la biodiversità, per la salute e per il sequestro di carbonio. Esempi specifici di utilizzo delle infrastrutture verdi nelle aree urbane sono lo sviluppo di aree paesaggistiche sui marciapiedi per ridurre il deflusso dell'acqua, o la creazione di aree verdi tra le strade o sui tetti per ridurre l'effetto isola di calore urbana.
Le infrastrutture devono essere però progettate in funzione degli scenari futuri di riscaldamento globale, che potranno avere degli impatti negativi sugli ecosistemi;

- *Soft measures (approccio manageriale)*: includono iniziative politiche, legali o amministrative che mirano a modificare i comportamenti, ad aumentare la capacità di adattamento delle persone, delle imprese e delle autorità pubbliche, o a costruire conoscenze e know-how. Nonostante gli sforzi compiuti per mettere a punto queste azioni, esiste ancora un divario rispetto al livello di adattamento necessario per contrastare completamente gli impatti e ridurre i rischi. Le azioni sono per lo più frammentate e si concentrano sulla pianificazione invece che sull'effettiva attuazione.

Contrastare i cambiamenti climatici non significa perseguire o rientrare in una di queste strategie, in quanto le azioni di adattamento, da sole, risulteranno insufficienti se non accompagnate da un robusto progetto di mitigazione. Le strategie di mitigazione del cambiamento climatico e di adattamento dovrebbero essere valutate in parallelo, considerando un'ampia gamma di azioni dall'offerta alla domanda [Nick, et al., 2021].

Per questo motivo, gli scienziati tracciano il solco per un nuovo modello di sviluppo resiliente al clima, il *Climate Resilient Development* (CRD) - una nuova visione di attuazione delle strategie di mitigazione e adattamento - [Fig. 1.21], attraverso un quadro di soluzioni che combina strategie di adattamento con azioni di mitigazione, che possano tradursi in miglioramenti per il benessere della natura e delle persone.
Tutti i settori e le regioni hanno compiuto progressi nella pianificazione e nell'attuazione dell'adattamento, creando così benefici per la riduzione dei rischi legati al clima.
Tuttavia, la distribuzione dei progressi non è stata uniforme: molti di questi progressi si sono concentrati sugli effetti a breve termine, portando a una diminuzione delle opportunità di adattamento trasformativo.
Il termine coniato per definire questi casi è '*maladaptation*'.

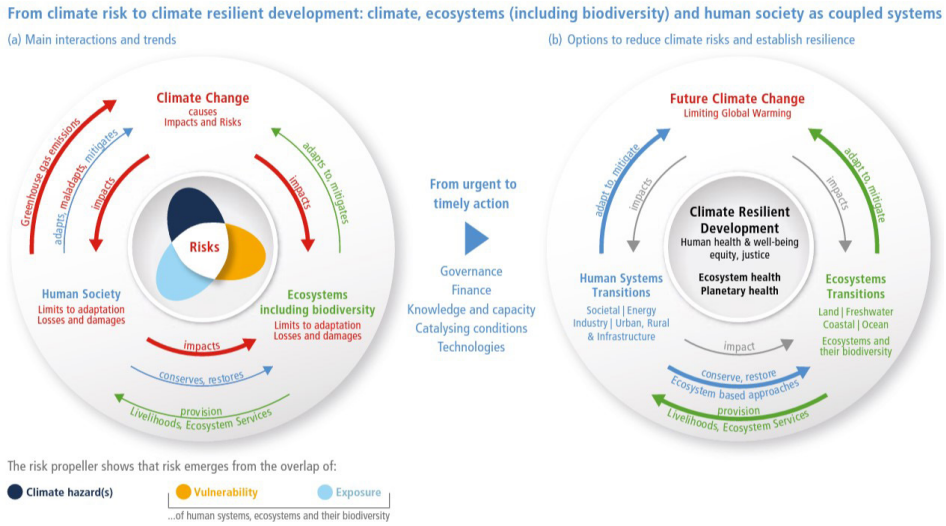


Fig. 1.21. Dai rischi climatici alla transizione verso lo sviluppo resiliente al clima

L'approccio *Climate Resilient Development* (ri)propone e porta ad individuare nella *resilienza* un concetto chiave, nella prospettiva di superare le possibili criticità legate alla gestione dei processi di adattamento e trasformazione, prerequisiti necessari nello sviluppo di risposte sistemiche (garanzia di mantenimento dell'organizzazione, funzionalità e qualità prestazionale del sistema).

Al di là delle differenti interpretazioni e invarianti - in relazione ai specifici settori culturali, disciplinari di riferimento - che possono costituire il concetto di resilienza, in questo contesto e riprendendo la definizione di Holling [1973], la si può intendere la capacità di risposta positiva di un sistema in equilibro di subire shock/stress esterni, rigenerandosi e riorganizzarsi in uno stato differente, ma ancora in equilibrio. Ad ogni modo, la resilienza viene declinata attraverso un nuovo bagaglio di esigenze *hazard specific* e *site specific*, con lo scopo di indirizzare gli interventi verso strategie di adattamento e/o di mitigazione funzionali al fine di ridurre la vulnerabilità del contesto di riferimento e in relazione alla pericolosità dei fenomeni attesi [Lucarelli, et al., 2018]. Il tipo e l'entità del cambiamento non sono sempre prevedibili e, di conseguenza, i sistemi devono essere gestiti per la flessibilità piuttosto che per il mantenimento della stabilità [Lucarelli, et alii, 2018] [Fig. 1.22].

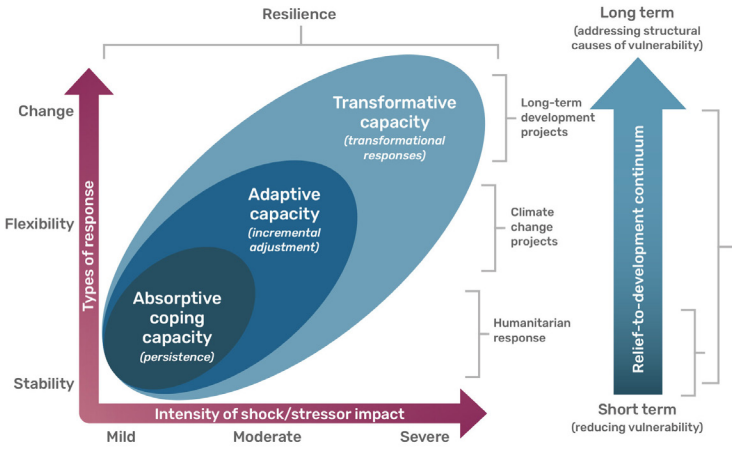


Fig. 1.22. Dalla stabilità al cambiamento nell'ottica della resilienza e dei diversi livelli di adattamento (incrementale e trasformativo)

Pertanto, diventa necessario intervenire in maniera pro-attiva, favorendo, da un lato la minimizzazione degli impatti derivanti da eventi estremi e dall'altro l'innalzamento della capacità resiliente di un sistema, definita determinante nel quantificare il suo grado di vulnerabilità e di conseguenza la sua capacità adattiva, ovvero a*daptive capacity*.
La capacità adattiva viene intesa "*come la proprietà di un sistema di adattare le proprie caratteristiche o il proprio comportamento, al fine di ampliare la propria capacità di far fronte alla variabilità climatica esistente o alle condizioni climatiche future*" [Brooks, et al., 2005, p. 168].

Basandoci su questi assunti, si può affermare che lo sviluppo resiliente al clima richiede un processo di azione, apprendimento e risposta, quindi la capacità di monitoraggio, le condizioni di vulnerabilità e di gestione iterativa del rischio che rappresenta un'importante condizione abilitante. Il concetto integra le transizioni di sistema (nella terra, negli oceani, nelle città, nell'energia, nell'industria e nella società) e comprende gli adattamenti per la salute umana, degli ecosistemi e del pianeta. Lo sviluppo resiliente al clima (CRD) viene quindi inteso come il processo di attuazione di misure di mitigazione e adattamento dei gas serra a sostegno dello sviluppo sostenibile [Leone, 2020].
Ciò implica la presa in considerazione di differenti tipologie di risorse: sociali, ecologiche, fisiche, finanziarie, naturali, umane e culturali, tecnologiche, di conoscenza e di governance, che, nella loro totalità, possono essere mobilizzate per costruire uno sviluppo resiliente agli impatti dei cambiamenti climatici [IPCC, 2022]. Queste strategie, agendo sulle cause del cambiamento climatico, possono rappresentare una soluzione permanente e incisiva.
L'adozione di queste misure potrebbe contribuire a ridurre le vulnerabilità agli impatti previsti dei cambiamenti climatici, migliorare la preparazione e la capacità delle comunità e dei sistemi di affrontare questi impatti e potenzialmente ridurre i costi economici associati. L'efficacia del Climate Resilient Development è fortemente legata all'individuazione di un chiaro modello di governance che guidi l'attuazione, l'implementazione, la verifica e la revisione delle opzioni di adattamento, le cui decisioni siano supportate da un adeguato sistema di monitoraggio.
La possibilità infatti, di conoscere gli impatti osservati e l'opportunità di prevenire rischi futuri creano i presupposti per la transizione verso uno sviluppo resiliente al clima per il perseguimento di altri obiettivi di sviluppo sostenibile (Sustainable Development Goals SDGs)[27], che puntano cioè alla crescita economica e allo stesso tempo salvaguardi l'equità sociale, promuova la tutela ambientale e garantisca i diritti delle future generazioni.
In questo contesto, sorge il presente quesito:

Il cambiamento climatico può essere inteso come un nuovo approccio allo sviluppo sostenibile, attraverso una nuova visione delle strategie di mitigazione e adattamento?

In primo luogo, la mitigazione ha il potenziale di contenere le minacce – in relazione agli episodi di cambiamento climatico - a un livello controllato piuttosto che estremo, e l'adattamento innalzerà la capacità dei diversi sistemi di far fronte agli impatti rimanenti, modulando quindi gli effetti negativi sullo sviluppo sostenibile.
In secondo luogo, molte delle condizioni che definiscono la vulnerabilità agli impatti climatici e la capacità di mitigare e adattarsi ad essi sono saldamente radicate nei processi di sviluppo ai diversi livelli: sociale, ambientale, economico ed energetico. In terzo luogo, la corsa allo sviluppo dipende, in larga misura, dalla disponibilità di energia, ma le Nazioni industrializzate hanno aumentato la pressione sulla domanda di fonti energetiche e contribuito all'ulteriore scarsità di risorse, all'aumento del volume delle emissioni e quindi all'intensificazione dei problemi ambientali [Gethmann, et al., 2020].

Infine, le sinergie derivanti dalle azioni di mitigazione e adattamento possono rappresen-

tare una relazione bi-univoca, in quanto consentono un'unica interpretazione della problematica climatica, tale da sostenere e sostanziare le opportunità dello sviluppo sostenibile.

Alla luce di queste considerazioni, l'azione di risposta al cambiamento climatico – in questo contesto ci si riferisce al *Climate Resilient Development* – non deve essere intesa come un risultato, ma piuttosto come un processo, che può essere ottenuto attraverso una combinazione di cambiamenti incrementali e trasformativi [Werners, et al., 2021].
A causa di progressi inadeguati verso gli obiettivi di sviluppo sostenibile (SDGs) entro il 2030, si riducono le prospettive di sviluppo resiliente al clima [Fig. 1.23].

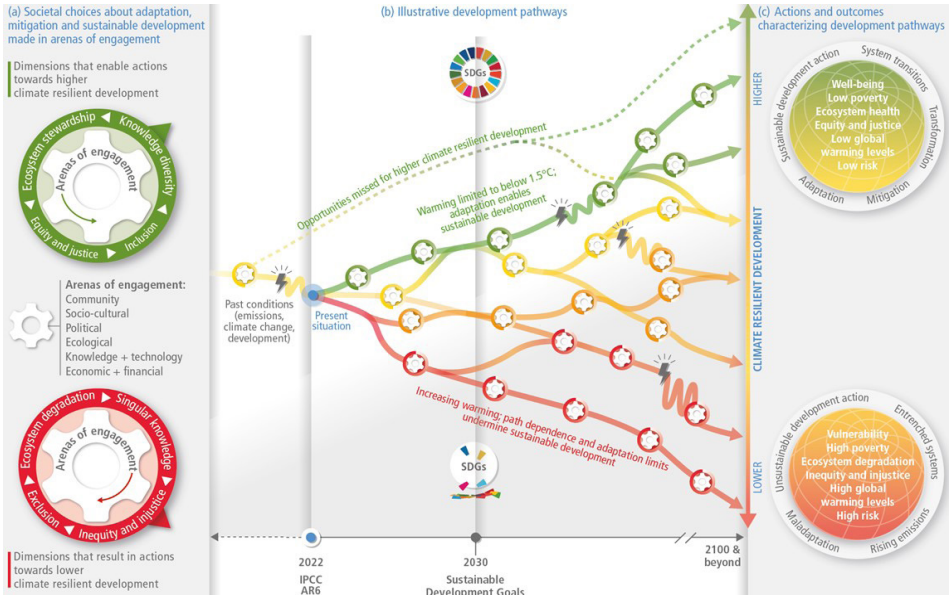


Fig. 1.23. SDGs in relazione ai rischi, impatti verso l'adattamento in chiave sostenibile.

Data la complessità della ricerca sul clima e sulle possibili soluzioni strategiche per contrastare gli effetti del cambiamento climatico, tutti i Paesi maggiormente industrializzati su indicazione diretta dei governi hanno, infatti, attivato strutture e tavoli di discussione con la finalità di rendere più efficiente la ricerca in questo settore e più fruibili e comprensibili i suoi risultati.
Come sostiene la *Global Commission on Adaptation*, la sfida di rispondere agli impatti climatici è aggravata dall'incertezza del clima futuro [GCA, 2019]. I modelli numerici, insieme alla componente osservativa-sperimentale, sono necessari per fornire ad ogni Paese la competenza di base e il miglior sistema di informazioni scientifiche utile al mondo della politica per le future ed auspicabili scelte strategiche che salvaguardino il futuro del nostro pianeta.
Da questi assunti, emerge la necessità di adottare azioni, interventi e soluzioni – che siano scalabili e replicabili, nei diversi livelli di attuazione – con lo scopo di limitare la vulnerabilità dei sistemi esposti e, al tempo stesso, prevenire o ridurre i rischi associati ai cambiamenti climatici. Queste strategie devono quindi scaturire prioritariamente dalla conoscenza della vulnerabilità e della fragilità di uno specifico territorio ed ambiente e dalla valutazione delle criticità che lo caratterizzano [AA. VV., 2014].
In ambito Europeo, diverse sono state le proposte legislative atte a favorire l'adozione delle misure di mitigazione e adattamento, tra cui la nuova *Strategia per l'adattamento ai cam-*

biamenti climatici[25], volta a rafforzare la capacità di resistenza agli effetti del mutamento del clima, attraverso il miglioramento delle conoscenze e l'utilizzo consapevole dei dati esistenti.
La nuova strategia adotta un approccio sistemico che si articola intorno a tre priorità trasversali: integrazione dell'adattamento nella politica macro-finanziaria, soluzioni per l'adattamento basate sulla natura e azioni locali di adattamento [EC, 2021].
Per il processo di raccolta e diffusione dei dati, accessibili a tutti, la Piattaforma Climate-ADAPT [26] acquista un ruolo sempre più determinante, fungendo da "hub di conoscenza della missione" [EC & EEA, 2022] e come strumento di monitoraggio e valutazione al fine di indirizzare le decisioni per le azioni di mitigazione e adattamento. Un effetto violento che ha rallentato i processi di pianificazione e preparazione delle azioni di mitigazione ed adattamento è da attribuire alla pandemia. Queste considerazioni sottolineano la necessità di forti politiche di adattamento al clima e di risposte forti da parte delle autorità locali e regionali.
Ad esempio, alcuni Paesi hanno visto questo momento (la pandemia) come un'opportunità ideale per portare avanti la transizione a basse emissioni di carbonio, dando un forte impulso all'utilizzo di tecnologie verdi, mentre altri sono stati fortemente limitati nelle loro ambizioni di risposta climatica. D'altro canto, i piani di mitigazione e riduzione dell'impatto ambientale, il cui fine è la diminuzione di produzione dei gas serra, sono destinati a rimanere delle operazioni di nicchia, se il loro risultato non comporta la modifica dell'impatto degli effetti complessivi [Bougleux, 2017].

Per questo motivo, tutti i Paesi, in particolare le principali economie, devono intensificare le loro ambizioni climatiche e presentare piani climatici nazionali più forti, noti come *Contributi determinati a livello nazionale*[28] (NDC), sviluppare politiche, misure e strategie climatiche a lungo termine e definire obiettivi per raggiungere l'azzeramento delle emissioni entro questo secolo. Gli NDC contengono anche informazioni sulla necessità o sulla fornitura di finanziamenti, tecnologie e sviluppo delle capacità per queste azioni.
In riferimento alle tecnologie specifiche che i Paesi intendono utilizzare per raggiungere i loro obiettivi di adattamento e mitigazione, le più frequentemente identificate – nell'aggiornamento del Rapporto del 25/10/2021 [FCCC, 2021] – sono le apparecchiature e i processi intersettoriali ad alta efficienza energetica, il maggiore utilizzo delle tecnologie per le energie rinnovabili come l'energia idroelettrica, il solare, l'eolico e la biomassa, i veicoli a basse o zero emissioni, i combustibili misti, le tecnologie per la produzione di rifiuti e l'agricoltura intelligente dal punto di vista climatico.

Tuttavia, nonostante le azioni messe in atto, esistono *limiti soft e hard* all'adattamento dei sistemi. I primi colpiscono i sistemi umani e includono la mancanza di alfabetizzazione e di informazioni o l'iniquità e la povertà che frenano l'adattamento. In questo caso, emerge anche il problema della trasferibilità delle stime (ex ante) dei costi e della misurabilità dei benefici- soprattutto per i Paesi in via di sviluppo - in termini di capacità, sviluppo e governance, richiedendo ulteriori attività di assistenza tecnica e programmazione [Watkiss, 2015] e prolungando il tempo di attuazione delle misure strategiche.
I limiti invece, soft possono essere superati lavorando sui settori della finanza, delle istituzioni e delle politiche.
Da qui scaturisce l'opportunità di cogliere la sfida climatica con una capacità di anticipazione degli scenari e un atteggiamento pro-attivo di governo e orientamento del cambiamento, che possa condurre alla definizione e successiva applicazione di strategie di mitigazione e di adattamento di tipo trasformativo, attraverso il necessario approccio multidisciplinare e multisettoriale verso il Climate Resilient Development.

Questo approccio può essere considerato un approccio che ruota attorno allo sviluppo, invece che essere prettamente incentrato sul clima o bastato sugli eventi climatici estremi, consentendo di integrare più efficacemente la problematica del cambiamento climatico nella pianificazione dello sviluppo e nel processo decisionale [Kim, et al., 2017].
È essenziale, quindi, che i cambiamenti climatici vengano affrontati in modo integrato e sinergico. Ad esempio, la riduzione della vulnerabilità richiede di essere accoppiata agli obiettivi di adattamento che a loro volta devono essere combinati con quelli di mitigazione [Leone, et al., 2019]. Si deve tenere in considerazione che, mentre le strategie di mitigazione impongono uno sforzo a livello globale da parte di tutti i Paesi responsabili delle emissioni di gas serra, le strategie di adattamento hanno invece maggiore efficacia se concepite e implementate su scala locale, indirizzate alle vulnerabilità del proprio contesto territoriale al fine di aumentarne la capacità di risposta.
È importante adottare un approccio di 'gestione flessibile', ovvero essere pronti ad adattare i progetti all'evolversi delle condizioni esterne, tenendo in considerazione l'incertezza degli sviluppi futuri, e aggiornando costantemente la nostra politica di adattamento alle informazioni provenienti da monitoraggio, valutazione e apprendimento [EEA, 2013].

In conclusione, riconducendo il ragionamento all'ambiente costruito, dove gli effetti del cambiamento climatico si fanno sempre più evidenti, si deve tenere conto della limitata capacità di resistenza agli stress ambientali affinché si possano innescare processi di trasformazione dell'ambiente costruito [Lucarelli, 2018] in un'ottica adattiva e all'interno di un quadro di resilienza. Il sistema urbano delle città, caratterizzato da diversi livelli di esposizione e vulnerabilità, rappresenta quindi un ambito di sperimentazione di metodi di progettazione innovativi per limitare gli impatti dei cambiamenti climatici in un mondo sempre più complesso e in un mercato in continuo cambiamento.

Rendere le città a prova di clima comporta, in primo luogo, una imprescindibile conoscenza del contesto ambientale, soprattutto in relazione agli effetti dei cambiamenti climatici. Le nuove tecnologie, in particolare le tecnologie dell'informazione e della comunicazione (ICT, Information and Communication Technology) possono rappresentare uno strumento rilevanti di dettaglio per la produzione, la gestione e l'uso delle informazioni spaziali [Maragno, 2018] e guidare il processo di transizione resiliente delle città.
Ne scaturisce la necessità di nuove tecniche progettuali, norme e politiche calibrate su scenari futuri possibili, che possano generare inedite spinte nella direzione dell'aggiornamento e concreta attuazione delle strategie di mitigazione e adattamento, verso una trasformazione che segua gli obiettivi del *Climate Resilient Development*.
Il *Cities Climate Leadership Group*[29] C40 supporta le città nel raggiungimento dei loro obiettivi d'azione per il clima, rispondendo a fattori locali specifici.
Dall'ultimo rapporto [C40, 2021], si afferma che, nel 2021, le città C40 hanno implementato 68 azioni per il clima ad alto impatto in diversi settori, portando il numero totale a 871, aumentando così il loro livello di ambizione climatica. Ad esempio, il nuovo Piano d'azione per il clima di Parigi[30], *Paris Climate Action Plan 2050*, delinea strategie per rendere la città a zero emissioni di carbonio entro il 2050 e per adattarsi agli eventi climatici estremi.
Per dimezzare la quantità di energia consumata nel suo territorio, le iniziative danno priorità alla riqualificazione degli edifici e alla riduzione dell'uso dei mezzi di trasporto che generano i più alti livelli di emissioni di carbonio.
Per contenere la CO_2 a livelli accettabili, le misure del piano della città di Barcellona, *Barcelona Climate Action Plan 2018-2030*[31], prevedono di ridurre il consumo per abitante del 29,48%, il che equivale a una riduzione del consumo annuo di energia del 2,46%. Si stima che il settore dei trasporti ridurrà il suo consumo del 49,44%, seguito dal commercio 9,44%, l'industria (5,27%) e il settore domestico (3,35%).

In Italia, Il Piano del Comune di Bologna è stato realizzato nel 2015 grazie al progetto LIFE+ BLUEAP, *Bologna local urban adaptation plan for a resilient city*[32], che prevede la costruzione del profilo climatico con la rielaborazione degli scenari al 2050, una sintesi dei fattori di capacità adattiva con l'indicazione delle principali strategie e l'analisi delle vulnerabilità rispetto tre ambiti: il contrasto alle ondate di calore in ambito urbano; eventi estremi e rischio idrogeologico; contrasto alla siccità e alla carenza idrica.
Si vuole mettere in evidenza che, se le misure dettate dai Piani sopracitati e/o da altre Città non menzionate, non vengono attuate, sarà sempre più difficile raggiungere gli obiettivi climatici entro il 2050.

Se si sposta l'attenzione sugli edifici, si può affermare che è l'involucro edilizio ad affrontare i maggiori rischi di danni causati da eventi climatici estremi tra cui trombe d'aria, effetto isola di calore, inondazioni e bombe d'acqua, a volte legati a eventi sismici (Cfr. Cap. 3).
L'attenzione si focalizza sul carattere adattivo dell'involucro edilizio, caratterizzato dalla capacità di rispondere dinamicamente alle sollecitazioni dal contesto ambientale con cui si relaziona e, allo stesso tempo di assorbire gli effetti da questo generati [Milardi, 2017].
Si mette in evidenza però che tali risposte performanti, essendo legate alle variabili ambientali con cui si relazionano, dovranno essere in grado di regolare in modo intelligente e sistemico gli effetti di tali variabili e, al contempo, soddisfare un'ampia gamma di necessita [Del Grosso & Basso 2010], attraverso l'implementazione delle loro caratteristiche termofisiche e meccaniche. A fronte di ciò, l'adattamento degli involucri edilizi agli impatti derivanti dal cambiamento climatico richiede un ampio ventaglio di misure e iniziative.

In questo senso, gli studi della ricerca sono indirizzati alla comprensione del funzionamento prestazionale dell'involucro edilizio, per migliorarne le performance tecnologiche e per mitigare gli impatti sull'ambiente costruito, che risulta cruciale nella definizione di soluzioni innovative di involucro che possano aumentare il livello di relazione contestuale.

1.3 Valutazioni critiche: Le implicazioni del cambiamento climatico nel progetto di architettura

"Some adaptation responses involve
significant co-benefits, synergies and trade-offs.
Increasing climate change will increase challenges for many adaptation options"[33]
[IPCC, 2014, p. 95]

Il termine *clima*, nel linguaggio corrente, identifica il complesso delle condizioni meteorologiche, che caratterizzano una località o una regione nel corso dell'anno, mediato su un lungo periodo di tempo [Enciclopedia Treccani].
L'architettura, da sempre, deve le sue caratteristiche morfologiche e tipologiche al rapporto con il clima, tuttavia, oggi, l'accelerazione del cambiamento climatico richiede una sostanziale modifica degli approcci alla progettazione. P
ertanto, la produzione scientifica sul clima, sulla progettazione ambientale e sull'ecologia urbana evidenzia l'opportunità di declinare il progetto di architettura rispetto agli approcci strategici di adattamento agli effetti del cambiamento climatico [Milardi, 2021].
Gli studiosi e gli scienziati dell'IPPC hanno ormai constatato l'aggravarsi dello scenario che si prospetta nei prossimi decenni, riconoscendo la necessità di mantenere il riscaldamento globale sotto i 2°C [IPPC, 2021]. Questo è dovuto al fatto che a variabilità del clima è causata sia da fattori naturali sia da fattori di natura antropogenica.
In effetti, come detto precedentemente, le attività umane sono oggi responsabili dell'emissione di grandi quantità di gas serra nell'atmosfera - come l'anidride carbonica, il metano, l'ossido di azoto e altri gas fluorurati – che favoriscono l'aumento esponenziale della con-

centrazione rispetto ai valori del periodo pre-industriale.
Pertanto, l'innalzamento della temperatura media globale, l'innalzamento del livello medio globale del mare e le variazioni del ciclo delle precipitazioni, in termini di frequenza e intensità, sono da considerarsi le tre principali conseguenze del riscaldamento globale.
Secondo una possibile *visione sistemica*[34] della problematica climatica e ambientale, si possono riconoscere gli effetti più o meno impattanti dovuti ai fenomeni metereologici estremi, in particolare nell'ambiente costruito (contesto antropizzato). Le implicazioni che intercorrono tra cambiamenti climatici e città risiedono nel fatto che le città sono responsabili e al tempo stesso principali elementi di accelerazione dei cambiamenti climatici in corso [Magni, & Musco, 2016]. Le città, essendo i luoghi con maggiore concentrazione antropica, rappresentano territori a rischio – proporzionale al livello di vulnerabilità del luogo – nei quali si stanno verificando, anche in modo sinergico, effetti specifici tra cui, isola di calore urbana, con aumento di intensità, frequenza e durata delle ondate di calore, trombe d'aria, tornando e alluvioni, queste ultime dovute a eventi di precipitazioni estreme.
Eventi di questa portata, costringono un *ripensamento del modo stesso di fare architettura*, in quanto entrano in discussione i processi realizzativi, il tasso di edificazione delle città, le tecnologie e i materiali utilizzati e da utilizzare, la scelta di riqualificare edifici esistenti piuttosto che costruirli *ex-novo*.

In ragione di questo, si è ormai fatta strada l'esigenza di una progettazione rinnovata, mettendo in luce la necessità di concretizzare nuovi processi e metodi applicativi che siano in grado di leggere in *modo dinamico* le risposte del contesto antropizzato, analizzando da un lato, le variazioni qualitative delle componenti, e dall'altro, indicando i differenti livelli di rischio e vulnerabilità [Milardi, et al., 2021].
Data la complessità nella misurazione dei fenomeni ambientali che riverberano i lori impatti su grande e piccola scala urbana, oggi più che mai, il processo progettuale e architettonico deve essere arricchito con i connotati specifici di altri ambiti scientifici, quali la climatologia, la meteorologia, l'ingegneria ambientale, la fisica urbana, al fine di progettare città capaci di adattarsi, secondo un approccio pro-attivo, alle trasformazioni dell'ambiente costruito.
Tali conoscenze – sempre in continua evoluzione, traendo il loro massimo potenziale quando il presupposto teorico diviene azione attuata – connesse alle caratteristiche evolutive di uno specifico contesto ambientale, consentono di indirizzare l'adattamento verso risultati positivi al contrasto dei fenomeni di cambiamento climatico.
In questo contesto, si fa riferimento all'"adaptive capacity", intesa come «la capacità di sistemi, istituzioni, esseri umani e altri organismi di adattarsi ai potenziali danni, di sfruttare le opportunità o di rispondere alle conseguenze» [IPPC, 2014, 118]. In aggiunta, la variabilità che caratterizza un progetto adattivo si rapporta non solo alla rielaborazione dei dati di input ma viene attribuita alla riprogrammazione della funzionalità dell'intero sistema.
La conoscenza della fragilità e della vulnerabilità delle città è un principio-chiave che anima e innesca processi di trasformazione al fine di migliorare la qualità della risposta adattiva di uno specifico contesto di riferimento.
Un aspetto (limitante) su cui occorrerà lavorare, richiedendo un processo multi-disciplinare, risiede nell' *equipaggiare* gli elementi che costituiscono il sistema adattivo di requisiti/accessori che siano in grado di «diversificare le risorse utili a svolgere un determinato compito, tanto più se queste versano in un regime di limitatezza» [Tucci, 2019, p.7].

Quali sono gli approcci di metodo necessari alle future sperimentazioni progettuali?
In risposta a questo quesito e, riferendosi al campo dell'architettura, un approccio di *Adaptive Design*, diventa occasione di sperimentazione al fine di promuovere e definire nuove strategie, soluzioni (tecniche e tecnologiche) e linee di indirizzo attuative, ridefinendo le dinamiche che oggi coinvolgono l'architettura alle sue varie scale ed aspetti.

Le politiche programmatiche europee – *Urban adaptation to climate change in Europe* della European Environmental agency EEA e nel *City Resilient Framework* elaborato contestualmente all'iniziataiva delle 100 Resilient Ciies di Arup – attribuiscono ai processi adattivi un ruolo centrale nel raggiungimento della qualità ambientale, con l'obiettivo di mettere a punto soluzioni scalabili e replicabili, in grado non solo di aumentare la resilienza delle città, riducendone la vulnerabilità e dall'altro misurare, dove possibile, in modo controllato i benefici ottenibili con le misure di mitigazione e adattamento negli scenari di criticità ambientale.
In particolare, una traccia importante da perseguire nella sperimentazione tecnologico-progettuale sulle architetture e le città, non comporta l'eliminazione del problema (l'impatto), ma superarlo implementando la capacità di reazione (strategia di adattamento).
In altre parole, in architettura, l'adattamento (a cui viene dedicato il Cap. 4) ha come obiettivo il controllo delle proprietà fisiche di componenti e sistemi edilizi utilizzando gradienti di variabili ambientali esterne, con l'obiettivo di migliorare il comfort esterno ed interno, l'abitabilità e ridurre i consumi di energia. Ciò nonostante, un adattamento efficace nelle città deve essere supportato da una politica solida e da una serie di incentivi che ne garantiscano la realizzazione sul campo. Non si tratta di definire nuovi assetti fisici delle nostre città, ma bensì supportare il binomio *cambiamento climatico/progetto architettonico* attraverso l'individuazione di scenari climatici futuri - comprendendo la variabilità e gli estremi del clima - e l'applicazione di soluzioni adattive appropriate alle condizioni ambientali del contesto nel quale si deve intervenire.

Per questi motivi, è importante evidenziare che i due approcci, *Adaptive Design* e *Climate Resilient Development* (descritto nel paragrafo precedente) non vanno visti in alternativa, ma in modo sinergico e interrelato nell'ambito di ogni progetto architettonico in tema di adattamento al clima, con accento sull'uno o sull'altro a partire da riconoscimento delle priorità d'azione strategica. Questi approcci innovati hanno come finalità ultima quella di produrre delle modificazioni (positive) delle pratiche progettuali mettendo in discussione azioni ormai sedimentate.
In questo scenario, l'output dell'azione di un progetto di architettura che si considera adattivo, non si esprime, in primo luogo, attraverso la fisicità della singola forma, ma bensì sulla costruzione di una matrice di relazioni su cui si strutturano, nel corso del tempo, un insieme di parametri di natura ambientale (umidità, vento, luce, ecc.) [Nebuloni, 2020].
Occorre quindi, che le attività di pianificazione-progettazione degli interventi strategici, siano capaci di istruire al loro interno procedimenti di analisi/valutazione e verifica progettuale adeguati alla complessità dei fenomeni considerati. Tali strumenti di supporto alla decisione progettuale dovranno contribuire in modo verificabile all'aumento e miglioramento delle capacità adattive delle città.
Appare quindi chiara la necessità di restituire il carattere adattivo proprio delle città per i nuovi approcci di progettazione architettonica, il che per la tesi dottorale significa analizzare le casistiche fenomenologiche dei cambiamenti climatici – in questo caso l'Area Mediterranea (a cui viene dedicato il Cap. 2). – e individuare quali caratteristiche degli edifici condizionano la risposta positiva del sistema al fine di orientare processi e metodi, in considerazione delle ormai inevitabili trasformazioni climatiche in atto.

Difatti, mettendosi in linea con quanto espresso dalla letteratura, le finalità della ricerca, si basano sul generale intento di integrare e avanzare le conoscenze sull'organismo architettonico con quelle della "progettazione del clima" attraverso nuovi approcci di verifiche prestazionali e tecnologiche di *controllo progettuale*.
La *valutazione prestazionale adattiva* viene intesa come un nuovo orizzonte per il progetto architettonico e viene sperimentata attraverso nuove condizioni di equilibrio.

L'aspetto critico da tenere in considerazione quando si adotta un approccio di tipo adattivo all'evolversi delle condizioni climatiche esterne riguarda il livello di incertezza degli scenari futuri. In tal senso, gli scenari climatici potrebbero rappresentare degli strumenti necessari e utili per la progettazione architettonica, perché da un lato possono essere integrati all'interno delle normative in materia urbanistica, edile - in termini di accuratezza delle analisi e dei dati disponibili - dall'altro rendono possibile lo sviluppo di *nuovi indicatori* al fine di proporre nuovi modelli adattivi.

Secondo il primo *Rapporto sugli indicatori di impatto dei cambiamenti climatici*, l'indicatore rappresenta, quindi, lo stato e/o il trend di certe condizioni (i.e. ambientali, sociali, economiche) su una determinata area ed in uno specifico periodo di tempo [SNPA, 2021].
La valutazione – azione che anticipa un progetto architettonico - attraverso gli indicatori di impatto può inoltre valorizzare azioni e misure di adattamento al cambiamento climatico che, ancorché basate su scenari caratterizzati da incertezza, possono determinare benefici ambientali su vasta scala e risultano quindi vincenti anche in contesti non completamente certi [Mandaglio, & Musarella, 2020].
Oltre agli indicatori di impatto, in letteratura esiste un'altra tipologia, quella degli *indicatori di adattamento* ai cambiamenti climatici che hanno lo scopo di monitorare e valutare i progressi verso l'adattamento.

Un altro punto critico sul quale soffermarsi, tralasciando le differenze tre le varie tipologie di indicatori, è la difficoltà nella costruzione di nuovi indicatori - che possano orientare il progetto architettonico verso la chiave dell'adattamento – che dipende da tre diverse classificazioni interconnesse:
1. classificazione rispetto a specifici indicatori e parametri, di materiali e componenti che reagiscono agli stimoli ambientali in modo adattivo, anche aggiungendo il contributo dei sistemi impiantistici integrati, differiti in relazione al contesto climatico di ubicazione;

2. classificazione dei vincoli normativi, costruttivi ed estetico/linguistici, per guidare le scelte progettuali, è evidente, infatti, la difficoltà di conciliare il ventaglio di possibili soluzioni tecniche conformi o compatibili, con le rigide prescrizioni di un sistema normativo;

3. classificazione di indicatori e parametri per l'analisi costi-benefici ambientali all'interno delle procedure di controllo della fattibilità economica dei possibili interventi.

In base ad una rilettura complessiva e critica, rispetto la vasta tematica del cambiamento climatico che viene affrontata in questo primo capitolo, si evince che il sistema urbano delle città, nei diversi assetti è caratterizzato da livelli di esposizione e vulnerabilità, e rappresenta quindi, un ambito di sperimentazione di paradigmi e metodi di progettazione *adaptive* e *climate-resilient*, soprattutto quando è chiara l'assenza e la mancata attuazione di efficaci politiche di mitigazione-adattamento che potrebbe aggravare i fattori di rischio.
Sulla base di una sintetica disamina critica delle principali implicazioni di approccio individuate quali, *adaptive* e *climate-resilient*, e delle relative innovazioni processuali nuovo approccio è diretto verso una progettazione di tipo adattiva, contribuendo ad un'organizzazione dinamica del processo progettuale teso a de-intensificare le prestazioni del sistema urbano nelle sue componenti (elementi urbani complessi, edifici, spazi aperti, infrastrutture), in relazione al suo efficace funzionamento, riducendone la vulnerabilità climatica e la dipendenza da processi in filiera che caratterizzano le convenzionali condizioni di esercizio.

Rafforzando quanto detto finora, questi approcci mettono in conto la volontà di gestire più aspetti contemporaneamente, al fine di soddisfare i requisiti prestazionali di un edificio e

gestire il suo funzionamento rispetto alla variabilità di molteplici fattori ambientali come vento, precipitazioni, umidità, temperatura esterna e radiazione solare.
Tutto ciò potrebbe rappresentare anche un'opportunità di rinnovamento nella normativa in materia su scala nazionale e dei regolamenti edilizi su quella urbana/locale, ponendosi come strumento per la riorganizzazione dei processi progettuali, basati su proposte di azione strategica reali e diversificate, capaci di assorbire fallimenti e malfunzionamenti e dimostrarsi adattive ai mutamenti da shock improvvisi e da stress cronici di tipo microclimatico, meteorologico e idrogeologico.
Un altro aspetto da considerare per l'attuazione adattiva di interventi rileva che questi sono volti all'evoluzione di un contesto ambientale che voglia definirsi responsabilmente controllato all'interno di una più ampia accezione di adattività capace di confrontarsi con le complesse dimensioni del progetto di architettura negli scenari futuri.

In quest'ottica e, ragionando sugli aspetti metodologici, si muovono i prossimi capitoli della Prima parte della tesi dottorale: dalla focalizzazione delle problematiche ambientali rispetto ad una specifica area di riferimento, ovvero l'Area Mediterranea (Cfr. Cap. 2), si passerà alla costruzione di un quadro di riferimento, basato sull'analisi e sulla lettura critica dei diversi effetti dei cambiamenti climatici sull'ambiente costruito con un focus sugli involucri edilizi (Cfr. Cap. 3).
A tal proposito, appare utile mettere in relazione le prestazioni tecniche e il comportamento ambientale dell'involucro edilizio al fine di evidenziare i suoi potenziali limiti in relazione agli effetti del cambiamento climatico (ad esempio shock termici, bombe d'acqua, carichi del vento) e verificare come l'involucro possa innescare e aggravare i fenomeni climatici.

Note

1. "Gli studi osservativi e modellistici sui cambiamenti di temperatura, le retroazioni climatiche e i cambiamenti nel bilancio energetico della Terra forniscono insieme la certezza dell'entità del riscaldamento globale in risposta alle forzature passate e future". "L'indice e l'entità del cambiamento climatico globale sono determinati dalla forzante radiativa, dalle retroazioni climatiche e dallo stoccaggio di energia da parte del sistema climatico. Le stime di queste grandezze per gli ultimi decenni sono coerenti con l'intervallo probabile della sensibilità climatica di equilibrio entro le incertezze valutate, fornendo una forte evidenza per la nostra comprensione del cambiamento climatico antropogenico". IPCC, (2013). Summary for Policymakers. p. 16.

2. La definizione è riportata all'Art. 1 della Convenzione. La Convenzione è il principale trattato ambientale internazionale in materia di contrasto ai cambiamenti climatici che fu firmato durante la Conferenza sull'Ambiente e sullo Sviluppo delle Nazioni Unite (UNCED, United Nations conference on environment and development) che si è tenuta a Rio de Janeiro nel 1992. L'obiettivo del trattato è quello di contrastare il cambiamento climatico e ridurre le emissioni di gas serra che sono alla base delle cause che provocano il surriscaldamento globale, al fine di prevenire dannose interferenze antropogeniche con il sistema climatico. Unite, N. (1992). Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici. New York, 9. https://www.mite.gov.it/sites/default/files/Convenzione_quadro_delle_Nazioni_Unite_-_New_York_1992.pdf

3. L'incremento delle emissioni di gas serra antropogeniche comincia nel XIX secolo dopo la prima rivoluzione industriale a causa del massiccio utilizzo del carbone come combustibile nell'industria, nei trasporti e nel riscaldamento domestico. Nel XX secolo cresce esponenzialmente con l'invenzione dell'automobile, l'utilizzo delle benzine e dei derivati del petrolio e la produzione di energia elettrica. Nell'ultimo secolo sono aumentate esponenzialmente anche le emissioni di metano, altro gas serra, dovuto agli allevamenti intensivi. Si stima che negli ultimi due secoli le emissioni di CO_2 siano crescite del 30% mentre quelle di metano del 200%.

4. L'effetto serra antropico, conosciuto anche con l'acronimo di AGW (Anthropic Global Warming), indica l'alterazione dell'equilibrio naturale tra radiazione incidente e radiazione riflessa, causato dall'eccessiva presenza di gas serra nell'atmosfera, come il biossido di carbonio (CO_2), il metano e il protossido di azoto e metano dalle attività umane (industria, agricoltura, allevamento, trasporti).

5. L'effetto serra naturale è il sistema di regolazione della temperatura dovuta alla presenza naturale dei gas serra nell'atmosfera. La quantità di CO_2 "naturale" rilasciata dall'ambiente è immediatamente riassorbita dall'ecosistema tramite la fotosintesi clorofilliana delle piante. Quindi, l'effetto serra naturale resta in equilibrio nel tempo, in assenza di shock naturali estremi dovuti al vulcanismo.

6. Per forzante si intende tipicamente una forza esterna persistente nel tempo. Se tale forza, generalmente radiativa (come per esempio l'aumento di CO_2 nell'atmosfera), è abbastanza grande da provocare un cambiamento di temperatura che non può essere bilanciato dalla capacità termica degli oceani di assorbire il calore in eccedente dall'atmosfera, allora si inizia a parlare di cambiamento climatico. Per cui, un cambiamento climatico può essere definito tale se il bilancio radiativo energetico del sistema Terra viene alterato. Benestad, R.E. (2010). Introduction to feedbacks. Real Climate.
Per ulteriori informazioni consultare il sito: https://www.realclimate.org/index.php/archives/2010/09/introduction-to-feedbacks/ - Accessed: 17 febbraio 2022

7. L'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) è il principale organismo internazionale per la valutazione dei cambiamenti climatici. L'IPCC è stato istituito nel 1988 dalla World Meteorological Organization (WMO)e dallo United Nations Environment Programme (UNEP) allo scopo di fornire al mondo una visione chiara e scientificamente fondata dello stato attuale delle conoscenze sui cambiamenti climatici e sui loro potenziali impatti ambientali e socio-economici. L'attività principale dell'IPCC consiste nel produrre periodicamente Rapporti di Valutazione scientifica sullo stato delle conoscenze nel campo del clima e dei cambiamenti climatici (Assessment Reports). L'IPCC redige anche Rapporti Speciali (Special Reports) e Articoli Tecnici (Technical Papers) su argomenti ritenuti di particolare interesse scientifico e necessità. In questo modo fornisce anche supporto scientifico alla Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC). Per ulteriori informazioni consultare il sito: https://www.ipcc.ch/

8. Il Sesto Rapporto di Valutazione (AR6) comprende tre contributi dei suoi tre Gruppi di Lavoro e un rapporto metodologico di sintesi, che dovrebbe essere pubblicato alla fine del 2022 o all'inizio del 2023 per informare il Global Stocktake del 2023 ai sensi della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici:
- Gruppo di lavoro I: Climate Change 2021: The Physical Science Basis, pubblicato il 9 agosto 2021, mette insieme gli avanzamenti compiuti dalla ricerca scientifica sulla conoscenza dell'influenza delle attività umane su una più ampia gamma di caratteristiche climatiche, compresi gli eventi estremi. Per ulteriori informazioni consulatare il sito: https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/
- Gruppo di lavoro II: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, pubblicato il 28 febbraio 2022, prende in considerazione le vulnerabilità e le capacità e i limiti del mondo naturale e delle società umane di adattarsi ai cambiamenti climatici. Inoltre, informa sugli impegni di adattamento e mitigazione messi in atto per ridurre i rischi associati al clima insieme alle opzioni per creare un futuro sostenibile, resiliente ed equo per tutti. Per ulteriori informazioni consulatare il sito: https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/
- Gruppo di lavoro III: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change, pubblicato il 4 aprile 2022, valuta gli avanzamenti compiuti nel contenimento delle emissioni di gas climalteranti e la gamma di opzioni di mitigazione disponibili nei sistemi energetici e urbani, in settori come l'agricoltura, l'edilizia, i trasporti e l'industria, in relazione allo sviluppo sostenibile e agli obiettivi di emissioni a lungo termine.
Per ulteriori informazioni consultare il sito: https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/

9. La National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) è una agenzia federale statunitense, istituita nel 1970, che si interessa di oceanografia, meteorologia e climatologia. L'Agenzia è anche attiva

nel settore dei programmi per satelliti meteorologici e pertanto si occupa dello studio del clima, sia negli Stati Uniti d'America che a livello planetario. In particolare, è in fase di realizzazione un archivio con i dati meteorologici del passato (serie storiche), relativi a numerose stazioni meteorologiche presenti nel mondo. Per ulteriori informazioni consultare il sito: https://www.noaa.gov/

10. La Niña è il raffreddamento periodico delle temperature della superficie oceanica nel Pacifico equatoriale centrale e centro-orientale, i cui eventi si verificano ogni 3-5 anni circa e possono durare circa 9-12 mesi. Nel caso della Spagna e dell'Europa in generale, le precipitazioni potrebbero aumentare in modo significativo.

11. Copernicus Climate Change Service (C3S) è il servizio di monitoraggio satellitare europeo dedicato al rilevamento di dati sul cambiamento climatico. È composto da una costellazione di satelliti (gruppi di satelliti che vanno da Sentinel-1 a Sentinel-6) messi in orbita a partire dal 2014 che oltre al clima monitorano gli ambienti marini, quelli terrestri, l'atmosfera, forniscono dati nell'ambito della sicurezza e della gestione di emergenze.
Per ulteriori informazioni consultare il sito: https://climate.copernicus.eu/

12. L'anidride carbonica è un gas climalterante capace di intrappolare calore nell'atmosfera terrestre, aumentando la temperatura media della superficie terrestre e contribuire così al riscaldamento globale. Viene definita come il gas serra più comune prodotto dalle attività umane ed è responsabile del 64% del riscaldamento globale causato dall'uomo. La sua concentrazione nell'atmosfera è attualmente del 40% superiore rispetto a quando è iniziata l'industrializzazione. Altri gas serra invece vengono emessi in quantità minori, ma intrappolano il calore in modo molto più efficace della CO_2 e in alcuni casi sono migliaia di volte più forti. Il metano è responsabile del 17% del riscaldamento globale causato dall'uomo, il protossido di azoto del 6%.

13. La curva di Keeling è un grafico che mostra l'accumulazione di anidride carbonica nell'atmosfera terrestre, sulla base di misurazioni continue effettuate presso l'Osservatorio di Mauna Loa, sull'isola delle Hawaii, dal 1958 ad oggi. La curva prende il nome dall'accademico statunitense Charles David Keeling, che ha avviato il programma di monitoraggio Scripps CO_2 e risulta una delle ricerche scientifiche più importanti del XX secolo.

14. Climate Watch è una piattaforma che offre approfondimenti e dati potenti sui piani climatici nazionali, sulle strategie a lungo termine e sulle emissioni di gas serra per aiutare i paesi a raggiungere i loro obiettivi di clima e sviluppo sostenibile. La piattaforma è del World Resources Institute, un'organizzazione di ricerca globale che lavora con governi, imprese, istituzioni multilaterali e gruppi della società civile per sviluppare soluzioni pratiche che migliorino la vita delle persone e garantiscano che la natura possa prosperare.

15 I Representative Concentration Pathways (RCP) sono insiemi coerenti di proiezioni delle sole componenti della forzatura radiativa e servono da input per la modellazione climatica, il ridimensionamento del modello e la modellazione della chimica atmosferica. Gli RCP sono quattro percorsi indipendenti sviluppati da quattro singoli gruppi di modellizzazione:
- RCP 2.6: è sviluppato dal team di modellazione IMAGE dell'Agenzia olandese per la valutazione ambientale. Si tratta di un cosiddetto scenario di "picco": il suo livello di forzante radiativo raggiunge dapprima un valore intorno a 3,1 W/m2 a metà del secolo, per tornare a 2,6 W/m2 entro il 2100;
- RCP 4.5: è sviluppato dal team di modellazione MiniCAM presso il Joint Global Change Research Institute (JGCRI) del Pacific Northwest National Laboratory. È uno scenario di stabilizzazione in cui il forzante radiativo totale è stabilizzato prima del 2100 dall'impiego di una serie di tecnologie e strategie per ridurre le emissioni di gas serra.
- RCP 6.0: è sviluppato dal team di modellazione AIM presso il National Institute for Environmental Studies (NIES), Giappone. È uno scenario di stabilizzazione in cui il forzante radiativo totale viene stabilizzato dopo il 2100 senza superamento mediante l'impiego di una serie di tecnologie e strategie per ridurre le emissioni di gas serra.
- RCP 8.5: è sviluppato dal team di modellazione MESSAGE e dall'IIASA Integrated Assessment Framework presso l'International Institute for Applies Systems Analysis (IIASA), Austria. L'RCP 8.5 è caratterizzato da un aumento delle emissioni di gas serra nel tempo rappresentativo di scenari in letteratura che portano a livelli elevati di concentrazione di gas serra.

16. Shared Socio-economic Pathways (SSPs) sono stati sviluppati per integrare gli RCP con diverse sfide socio-economiche all'adattamento e alla mitigazione. La combinazione di scenari socioeconomici basati sull'SSP e proiezioni climatiche basate sul percorso di concentrazione rappresentativo (RCP) fornisce una cornice integrativa per l'impatto climatico, definendo i diversi scenari futuri di cambiamento climatico e l'analisi politica.

17. Secondo la spiegazione ufficiale dell'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), la carbon neutrality si raggiunge quando "le emissioni antropogeniche di gas serra sono compensate da una pari quantità di emissioni ridotte, evitate o sequestrate all'interno di un determinato orizzonte temporale".

18. "Molte opzioni di adattamento e mitigazione possono contribuire ad affrontare i cambiamenti climatici, ma nessuna opzione è sufficiente da sola. Un'attuazione efficace dipende dalle politiche e dalla cooperazione a tutte le scale e può essere potenziata attraverso risposte integrate che colleghino la mitigazione e l'adattamento con altri obiettivi della società". IPCC. (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. P. 26.

19. L'Accordo di Parigi sui cambiamenti climatici è il primo accordo universale, giuridicamente vincolante sul clima a livello mondiale, firmato il 22 aprile 2016 e ratificato dall'Unione Europea il 5 ottobre 2016. Il testo rappresenta un'ideale prosecuzione del Protocollo di Kyoto, redatto nel dicembre del 1997, con l'obiettivo di contenere a lungo termine l'aumento della temperatura media globale ben al di sotto della soglia di 2°C oltre i livelli pre-industriali, e di limitare tale incremento a 1.5°C, poiché questo ridurrebbe sostanzialmente i rischi e gli effetti dei cambiamenti climatici. Secondo quanto riferito dalle Nazioni Unite, ad oggi 191 Stati su 197 della Convenzione hanno deciso di far parte dell'Accordo di Parigi, mentre sono 195 i firmatari.
Per ulteriori informazioni consultare il sito: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX:22016A1019(01)

20. Il Green Deal europeo è un pacchetto di iniziative strategiche che mira ad avviare l'UE sulla strada di

una transizione verde, con l'obiettivo ultimo di raggiungere la neutralità climatica entro il 2050. Con la sua adozione, l'UE e i suoi Stati membri si sono impegnati a ridurre le emissioni nette di gas a effetto serra nell'UE di almeno il 55% entro il 2030, rispetto ai livelli del 1990. Si tratta di un obiettivo giuridicamente vincolante, basato su una valutazione d'impatto effettuata dalla Commissione. Tale finalità deve essere raggiunta attraverso la trasformazione dell'economia e della società in senso ecosostenibile con un ampio spettro di interventi in settori quali: energia, industria (inclusa quella edilizia), trasporti e mobilità, agricoltura, gestione dei rifiuti, tutela dell'ambiente e della biodiversità, ricerca.
Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_it

21. La Commissione Europea, in uno studio del 2015, per la prima volta definisce le Nature based Solutions come: "strumento utile a perseguire obiettivi quali l'incremento della sostenibilità dei sistemi urbani, il recupero degli ecosistemi degradati, l'attuazione di interventi adattivi e di mitigazione rispetto ai cambiamenti climatici e il miglioramento della gestione del rischio e l'implementazione della resilienza. Per l'Iucn (Unione Europea per la Conservazione della Natura), le NBS sono anche azioni per proteggere, gestire o ristrutturare gli ecosistemi in un modo sostenibile, che forniscono vantaggi per il benessere umano e per la biodiversità".

22. Si riporta la definizione di mitigazione contenuta nel Glossario del Rapporto dell'IPCC: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Un intervento umano che ha l'obiettivo di ridurre le emissioni o migliorare i pozzi di assorbimento dei gas serra. Nella politica climatica, le misure di mitigazione sono tecnologie, processi o pratiche che contribuiscono alla mitigazione, ad esempio le tecnologie per le energie rinnovabili, i processi di minimizzazione dei rifiuti e le pratiche di pendolarismo dei trasporti pubblici. IPCC (2022). Annex II: Glossary [Möller, V., R. van Diemen, J.B.R. Matthews, C. Méndez, S. Semenov, J.S. Fuglestvedt, A. Reisinger (eds.)]. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2897–2930, doi:10.1017/9781009325844.029

23. Si riporta la definizione di adattamento contenuta nel Glossario del Rapporto dell'IPCC: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Nei sistemi umani, indica il processo di adattamento al clima attuale o previsto e ai suoi effetti, al fine di moderare i danni o sfruttare le opportunità positive. Nei sistemi naturali, indica il processo di adattamento al clima attuale e ai suoi effetti; l'intervento umano può facilitare l'adattamento al clima atteso e ai suoi effetti. La gamma di strategie e misure disponibili e appropriate per affrontare l'adattamento comprendono un'ampia gamma di azioni che possono essere classificate come strutturali, istituzionali, ecologiche o comportamentali. IPCC (2022). Annex II: Glossary [Möller, V., R. van Diemen, J.B.R. Matthews, C. Méndez, S. Semenov, J.S. Fuglestvedt, A. Reisinger (eds.)]. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2897–2930, doi:10.1017/9781009325844.029

24. La prima Global StockTake GST durerà dal 2021 al 2023 e da allora in poi sarà ripetuta ogni 5 anni. La GST facilita la valutazione del progresso collettivo globale su tre aree tematiche: Mitigazione, Adattamento e Mezzi di attuazione e supporto. La GST considera anche le conseguenze sociali ed economiche delle misure di risposta e gli sforzi per affrontare perdite e danni. La valutazione collettiva prende in considerazione gli input sull'equità e fa uso della migliore scienza disponibile in modo trasversale. I risultati della GST informeranno i paesi sull'aggiornamento e il miglioramento, in modo determinato a livello nazionale, delle loro azioni e supporto per il clima, nonché sul rafforzamento della cooperazione internazionale per l'azione per il clima.
Per ulteriori informazioni consultare il sito: https://unfccc.int/topics/global-stocktake

25. La Commissione Europea il 24 febbraio 2021 ha adottato la nuova Strategia di adattamento ai cambiamenti climatici sottolineando che i questi sono già in atto e per questo è necessaria la costruzione di un futuro più resiliente. Le proposte odierne focalizzano l'attenzione sulla definizione di soluzioni e sul passaggio dalla pianificazione all'attuazione. Sono previste azioni di adattamento più intelligente, rapido e sistemico per migliorare le conoscenze e gestire le incertezze. Inoltre, sono previsti interventi per aumentare la conoscenza sull'adattamento, consentendo di migliorare la qualità e la quantità dei dati sui rischi e le perdite connessi al clima, mettendoli a disposizione di tutti, tramite la Piattaforma Climate-Adapt.
Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=COM%3A2021%3A82%3AFIN

26. La piattaforma europea di adattamento climatico Climate-ADAPT è una partnership tra la Commissione europea e l'Agenzia europea dell'ambiente (AEA). Climate-ADAPT è gestito dall'AEA con il supporto del Centro tematico europeo sugli impatti, la vulnerabilità e l'adattamento ai cambiamenti climatici (ETC/CCA). Climate-ADAPT mira a supportare l'Europa nell'adattarsi ai cambiamenti climatici aiutando gli utenti ad accedere e condividere dati e informazioni su: Previsto cambiamento climatico in Europa; Vulnerabilità attuale e futura di regioni e settori; Strategie e azioni di adattamento dell'UE, nazionali e transnazionali; Casi di studio di adattamento e potenziali opzioni di adattamento; Strumenti che supportano la pianificazione dell'adattamento. Fornisce l'accesso ai dati e alle informazioni necessarie per l'adattamento, li trasforma in conoscenze affidabili, catalizza l'adozione di soluzioni di adattamento e mobilita le persone e le organizzazioni affinché l'adattamento si realizzi.
Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/about

27. I 17 obiettivi di sviluppo sostenibile OSS (Sustainable Development Goals SDGs) e i 169 sotto-obiettivi ad essi associati costituiscono il nucleo vitale dell'Agenda 2030 lo Sviluppo Sostenibile, il programma d'azione per le persone, il pianeta e la prosperità sottoscritto nel settembre 2015 dai governi dei 193 Paesi membri dell'ONU. Essi mirano a realizzare pienamente i diritti umani di tutti e a raggiungere l'uguaglianza di genere e l'emancipazione di tutte le donne e le ragazze. Essi sono interconnessi e indivisibili e bilanciano le tre dimensioni dello sviluppo sostenibile: la dimensione economica, sociale ed ambientale.
Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://unric.org/it/agenda-2030/ Accessed: 13 marzo 2022

28. Contributi determinati a livello nazionale o NDC (Nationally Determined Contributions), riportati nel Rapporto di sintesi dell'NDC dell'ONU del 17/09/2021 con aggiornamento al 25/10/2021, contengono informazioni su obiettivi, politiche e misure per la riduzione delle emissioni nazionali e per l'adattamento agli impatti dei cambiamenti climatici. Gli NDC contengono anche informazioni sulla necessità o sulla fornitura di finanziamenti, tecnologie e sviluppo delle capacità per queste azioni. Il rapporto mostra che mentre la maggior parte delle nazioni rappresentate ha aumentato i propri livelli individuali di ambizione di ridurre le emissioni, il loro impatto combinato le mette sulla strada per ottenere una riduzione inferiore all'1% entro il 2030 rispetto ai livelli del 2010. Molti Paesi hanno collegato i loro NDC al loro impegno per la transizione verso un'economia sostenibile e/o a basse emissioni di carbonio e resiliente, tenendo conto dei fattori sociali, ambientali ed economici, nonché degli SDG. Inoltre, hanno indicato di aver integrato i propri obiettivi, obiettivi e politiche NDC nei processi legislativi, normativi e di pianificazione nazionali come mezzo per garantire l'attuazione, anche in merito alle strategie di mitigazione e adattamento.
Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://unfccc.int/ndc-information/nationally-determined-contributions-ndcs Accessed: 9 ottobre 2022

29. Cities Climate Leadership Group C40 è una rete di sindaci di quasi 100 città leader a livello mondiale che collaborano per fornire l'azione urgente necessaria in questo momento per affrontare la crisi climatica e sulla guida di azioni urbane che riducano le emissioni di gas serra e i rischi climatici, aumentando al contempo la salute, il benessere e le opportunità economiche dei cittadini urbani. Il quadro di pianificazione dell'azione per il clima C40 e il programma Scadenza 2020 di C40 sono stati creati per supportare le città nello sviluppo di piani d'azione per il clima che abbiano il livello di ambizione e di azione necessari per svolgere la propria parte nel raggiungimento degli obiettivi dell'accordo di Parigi. Per rimanere entro un aumento di 1,5°C, le emissioni medie pro capite nelle città C40 devono scendere da oltre 5 tCO_2e pro capite a circa 2,9 tCO_2e pro capite entro il 2030. P
er ulteriori informazioni, consultare il sito: https://www.c40.org/

30. Il piano climatico di Parigi è consultabile dal sito: https://www.c40knowledgehub.org/s/article/Mapped-Cities-with-a-climate-action-plan?language=en_US cliccando sull'icona della città della mappa interattiva, che contiene i piani d'azione climatica Accessed: 22 settembre 2022

31. Il piano climatico di Barcellona è consultabile dal sito: https://www.c40knowledgehub.org/s/article/Mapped-Cities-with-a-climate-action-plan?language=en_US cliccando sull'icona della città della mappa interattiva, che contiene i piani d'azione climatica Accessed: 22 settembre 2022

32. Le informazioni specifiche relative al Piano di Bologna, sono consultabili dal sito: https://www.comune.bologna.it/servizi-informazioni/piano-adattamento-citta-bologna Accessed: 22 settembre 2022

33. "Alcune risposte di adattamento comportano significativi co-benefici, sinergie e compromessi. L'aumento dei cambiamenti climatici aumenterà le sfide per molte opzioni di adattamento". L'adattamento può assumere diversi approcci a seconda del contesto in cui si colloca: riduzione della vulnerabilità, gestione del rischio di catastrofi o pianificazione proattiva dell'adattamento. È sempre più riconosciuto il valore delle misure sociali (comprese quelle locali e indigene), istituzionali e basate sugli ecosistemi e la portata dei vincoli all'adattamento. IPCC (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. P. 95. IPCC, Geneva, Switzerland.

34. Secondo Peter Sange, il pensiero sistemico può essere presentato come la disciplina che studia le connessioni causali e retroattive tra gli eventi al fine di comprenderli, prevenirli e influenzarli al minor costo di intervento possibile. Questo significa vedere le interrelazioni invece di creare catene lineari causa-effetto e vedere processi e modelli di cambiamento piuttosto che istantanee. Sicca, L. M., & Senge, P. M. (2019). La quinta disciplina: l'arte e la pratica dell'apprendimento organizzativo. pp. 1-778. Editoriale Scientifica. ISBN-13 978-8893916820

References

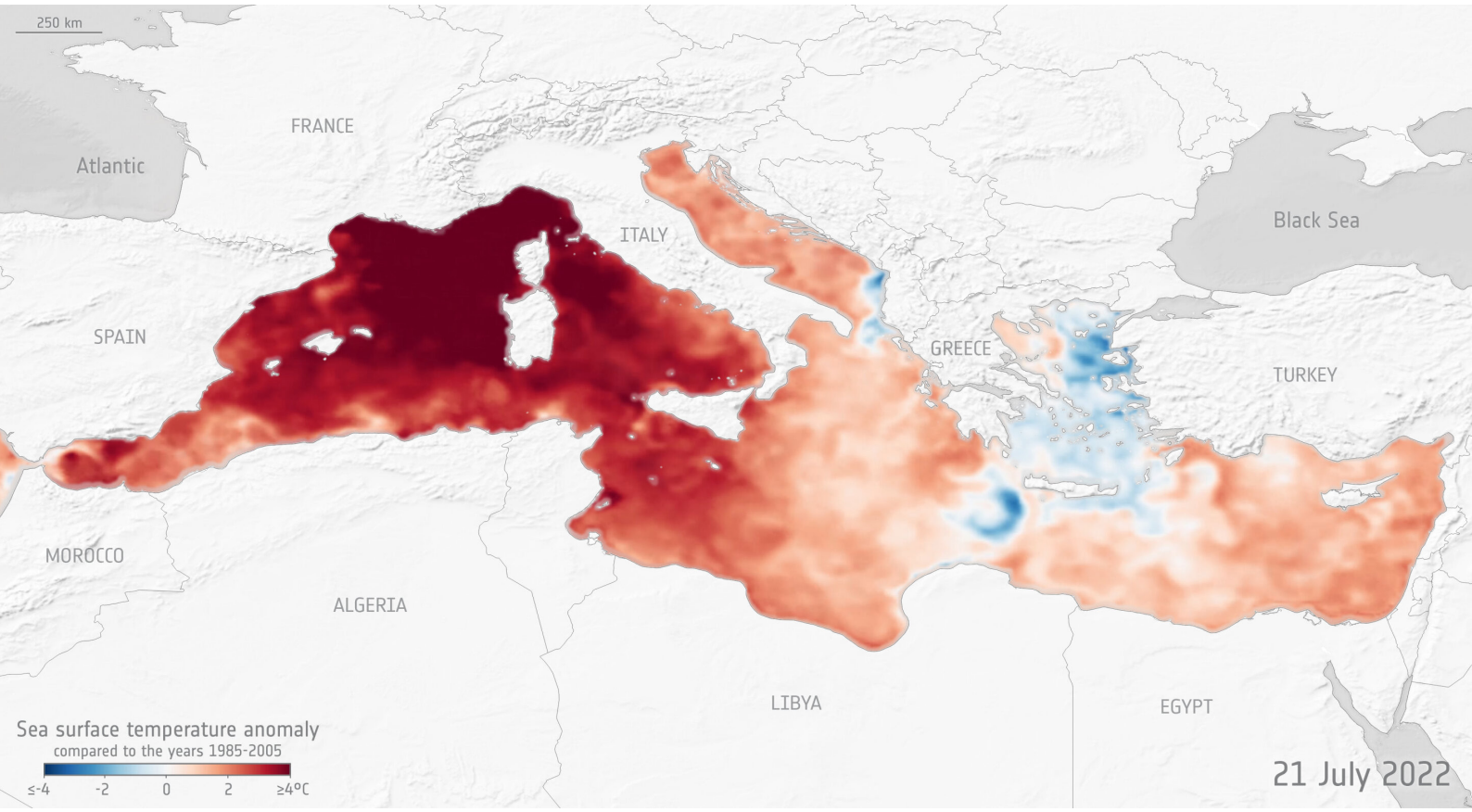
IPCC. (2013). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cit. pag. 16. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Accessed: 15 settembre 2022.

IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. Cit. pagg. 26, 95.

Organizzazione delle Nazioni Unite ONU (2015). *Risoluzione adottata dall'Assemblea Generale il 25 settembre 2015. Trasformare il nostro mondo: l'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile*. A/RES/70/1, pp. 1-35. Cit. pag. 5.

Tucci, F. (2019). Inquadramento e approccio: cambiamenti climatici, strategie di adattamento e prospettive di resilienza nel futuro delle green city. In [Responsabile scientifico: Prof. Arch. Ph.D. Fabrizio Tucci, Gruppo di lavoro: Arch. Ph.D. Alessia Caruso, Arch. Ph.D. Gaia Turchetti con Arch. Ph.D. Valeria Cecafosso]. *Adattamento ai cambiamenti climatici di Architetture e Città 'Green' per migliorare la resilienza dell'Ambiente Costruito. Minacce, vulnerabilità, rischi, Assi strategici, indirizzi, azioni d'intervento*. pp. 5-13. Green City Network e Università Sapienza di Roma. Cit. pag. 7.

Unite, N. (1992). *Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici*. New York, 9. https://www.mite.gov.it/sites/default/files/Convenzione_quadro_delle_Nazioni_Unite_-_New_York_1992.pdf Accessed: 15 settembre 2022.


250 km
FRANCE
Atlantic
ITALY
Black Sea
SPAIN
GREECE
TURKEY
MOROCCO
ALGERIA
LIBYA
EGYPT
Sea surface temperature anomaly
compared to the years 1985-2005
≤-4
-2
0
2
≥4°C
21 July 2022

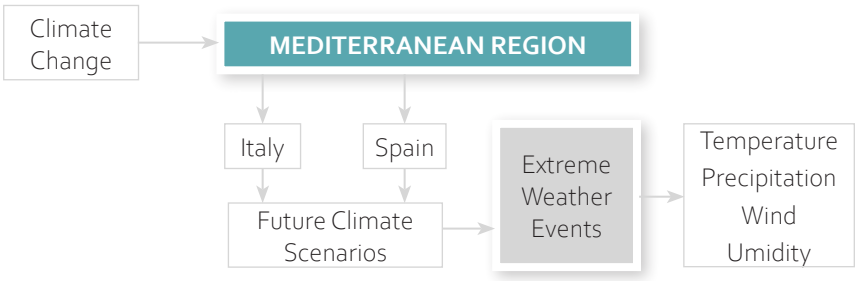
Capitolo 2

Condizioni climatiche di riferimento
L'area Mediterranea: scenari climatici ed eventi estremi

Abstract

The second chapter presents a detailed description of climate and environmental issues in the Mediterranean Region through recent scientific studies and research results on this topic. The IPCC states that, for the European Mediterranean, there will be a combination of climate change and impact factors such as temperature extremes, increased drought, and aridity, decreased precipitation and wind speed, and rising mean and extreme sea levels, due to a global warming of at least 2°C by mid-century. The study contexts are Italy and Spain to confine the analysis of climate extremes and provide a clear and critical reading of the probable future impacts of the intensification of extreme events. Climate data projections are carried out using the simulation software DataClime for Italy and AdapteCCa for Spain. The scenario derived from the analyses shows that both Italy and Spain will face an increase in temperatures above the global average, with increasingly extended heat waves and tropical nights, and a decrease in precipitation (during autumn and winter) with an intensification of extreme rainfall events.
For the research objectives, this mapping is necessary to have a better knowledge of the effects of climate change concerning a specific climatic context and to orient and identify possible ad hoc technical and technological solutions to face the impacts and risks associated with them. The investigation activity has recognized which are the most vulnerable climatic parameters to be controlled (temperature and precipitation) to define solutions that guarantee continuous and calibrated performance standards, not only in response to sector regulations but to the future climate change scenarios of a given context.

Key-words
climate change, Mediterranean Region, Italy, Spain, extreme events



Capitolo 2: Thematic Flow-Chart - Fase Istruttoria

2.1 Il cambiamento climatico in Area Mediterranea: la conoscenza scientifica

"During recent decades, observations of several variables provide evidence of the ongoing anthropogenic climate change in the Mediterranean region, particularly increase of mean and extreme temperatures, and dry environmental conditions."[1]
[Cherif, et al., 2020, p. 5]

Per garantire l'efficacia delle azioni di testing da intraprendere, ai fini della misurazione delle prestazioni delle facciate continue rispetto a specifiche sollecitazioni climatiche future, è stato necessario individuare ed analizzare un contesto climatico di studio: la *Regione del Mediterraneo*.

La comunità scientifica individua nella Regione del Mediterraneo un campo di indagine con l'obiettivo di progredire la conoscenza sulle tendenze climatiche future – oggetto del dibattito contemporaneo – aggiornando così le banche dati disponibili; tutto ciò è finalizzato a garantire una specifica azione preventiva dei rischi prendendo in considerazione le opzioni per l'adattamento e a implementare le politiche per lo sviluppo sostenibile [Cramer, et al., 2018]. Da un punto di vista atmosferico, la Regione Mediterranea (dal latino "mediterraneus" che significa "in mezzo alle terre") è una zona di transizione compresa tra la fascia temperata e piovosa dell'Europa Centrale e tra il clima arido del Nord Africa ed è interessata dalle interazioni tra i processi di media latitudine e quelli tropicali [Giorgi, & Lionello, 2008], caratterizzati da basse precipitazioni totali annue.
Nello specifico, secondo la classificazione di Köppen[2], il clima mediterraneo è definito come un clima temperato di media latitudine con una stagione estiva secca, che può essere calda o tiepida [Lionello, et al., 2012].
Il Mediterraneo[3] è un bacino semi-chiuso, per lo più profondo, contraddistinto da una rilevante evaporazione che i fiumi (di acqua dolce) non riescono a bilanciare ma, l'Oceano Atlantico, attraverso lo stretto di Gibilterra, riversa importanti quantità d'acqua, causando forti e continue correnti durante tutto l'anno. Lo squilibrio idrologico che ne deriva, può avere conseguenze dirette nell'Atlantico, generando trasformazioni climatiche nel Nord Europa simili a quelli osservati durante l'ultimo periodo glaciale [Turley, 1999], in cui in pochi secoli, il livello del mare si alzò di 20 metri. A causa della sua conformazione geografica e dell'esposizione a rischi naturali di grande portata, come eventi sismici ed eruzioni vulcaniche, il Mediterraneo è considerato un'area vulnerabile che dovrà affrontare nuove sfide, amplificate dai fenomeni del cambiamento climatico.
Per questi motivi, la Regione del Mediterraneo è stata indicata come una delle regioni più reattive ai cambiamenti climatici ed è stata definita come un *hot spot*[4] *di riscaldamento globale* [Fig. 2.1], ovvero punto caldo primario [Giorgi, 2006], sulla base dei risultati degli scenari di proiezione del cambiamento climatico globale.

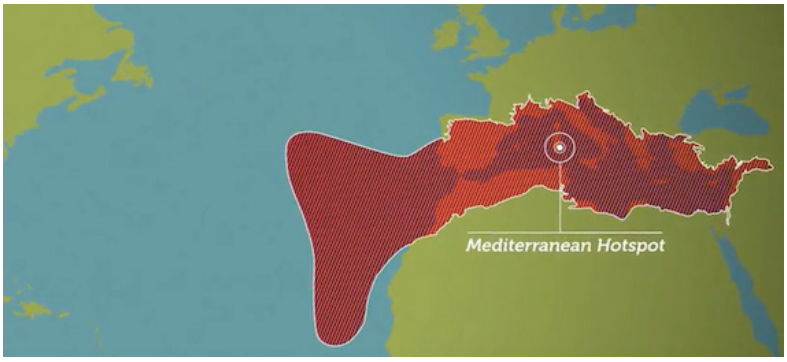


Fig. 2.1. Hot spot Mediterraneo

In effetti, il Mediterraneo è stato uno dei primi mari in cui una tendenza al riscaldamento delle temperature delle acque profonde nel bacino occidentale è stata attribuita al riscaldamento globale [Bethoux, et alii, 1990].
Una recente ricerca, che analizza gli hot spot della Regione Mediterranea rispetto le variazioni a breve e lungo termine[5] (2041–2060 e 2081–2100), afferma che il riscaldamento combinato con un calo delle precipitazioni potrebbe mettere a dura prova l'intera regione, in particolare il sud, che ha meno risorse per adattarsi ai cambiamenti climatici [Cos, et al., 2022]. Questo assunto è avvalorato dal fatto che la regione del Mediterraneo sta accumulando rischi ambientali, tra cui forte riscaldamento e secchezza (fino a 6°C entro il 2100), aumento accelerato del livello del mare (attualmente 4 mm all'anno, 80 cm entro il 2100, forse di più), rapida urbanizzazione, l'aumento dell'inquinamento dell'aria e dell'acqua e gli impatti del turismo di massa.
Le conseguenze che ne derivano si traducono in problematiche per gli ecosistemi che soffrono del degrado del suolo, tra cui la perdita di metà delle zone umide, la pesca eccessiva (20% delle specie ittiche a rischio di estinzione entro il 2050), l'agricoltura non sostenibile, gli incendi (l'area bruciata potrebbe raddoppiare entro il 2100) e l'invasione di specie non indigene specie ("tropicalizzazione"). Questi fattori hanno un forte impatto sulle risorse idriche, sulla biodiversità terrestre e oceanica, sulla salute e sulla sicurezza umana, con le conseguenze più gravi per il Sud e l'Est [MedECC, 2020].
Gli scenari prevedono che questi cambiamenti continuino e sembrano influenzare le dinamiche del ciclo delle acque, la frequenza di eventi estremi (come le forti piogge che possono causare inondazioni improvvise, ondate di calore e siccità che aumentano il rischio di incedi), le alterazioni del suolo e della vegetazione, nonché le modifiche della diversità biologica [Thiébault, & Moatti, 2016].
Questi impatti si sovrappongono e amplificano le pressioni già esistenti di origine antropica sull'ambiente naturale [Bleu, 2008] (l'attuale livello di emissioni di gas serra nel Mediterraneo è pari a circa il 6% delle emissioni globali), con implicazioni sul raggiungimento degli obiettivi di sviluppo sostenibile e sul rallentamento relativo all'attuazione di piani per l'adattamento. Tuttavia, già nel 1996, uno studio [Nicholls, & Hoozemans, 1996] dimostrava la necessità di misure proattive a lungo termine per affrontare le problematiche relative all'aumento delle inondazioni causate dalle tempeste con l'innalzamento del livello del mare.
Un aspetto critico sulla possibilità di adottare misure affidabili di contrasto al cambiamento climatico in Area Mediterranea, si riferisce al numero limitato di stazioni metereologiche e di conseguenza, ne risulta che alcuni bacini idrografici mediterranei sono caratterizzati da scarsità di dati climatici e non sufficientemente coordinati e brevi osservazioni temporali [Al Sayah, et al., 2021; Bonacci, & Vrsalović, 2022].
Nel contesto attuale e in assenza di strumenti e misure efficaci, si rileva che il recente riscaldamento è proceduto più velocemente rispetto alle medie globali, soprattutto per quanto riguarda le temperature estive. In effetti, secondo il Primo Rapporto di Valutazione del Mediterraneo[6] (MAR1) [MedECC, 2020] redatto dalla Comunità scientifica di MedECC[7] – *Mediterranean Experts on Climate and environmental Change* - le temperature medie annuali sono circa 1,54°C più alte rispetto al periodo preindustriale (1860-1890) e ben al di sopra delle attuali tendenze di riscaldamento globale (+1,1°C)..

Qui di seguito, sono riportate le proiezioni temporali rispetto la variazione della del riscaldamento della temperatura -parametro più frequentemente utilizzato per descrivere il cambiamento climatico globale - e del cambiamento delle precipitazioni previsti nella Regione Mediterranea, prodotte da MedECC [MedECC, 2020].

Proiezioni del riscaldamento della temperatura

Il grafico [Fig. 2.2] mostra che nel prossimo futuro, con un riscaldamento globale di 2°C rispetto al valore preindustriale, nello scenario RCP 2.6, le temperature massime diurne nel Mediterraneo aumenteranno probabilmente di 3,3°C, mentre con un riscaldamento globale di 4°C, nello scenario RCP 8.5, quasi tutte le notti saranno tropicali e non ci saranno quasi mai giorni freddi [MedECC, 2020]. In particolare, nella regione MENA (Middle East and North Africa), entro la fine del secolo, si prevede che la temperatura massima durante le ondate di caldo supererà i 56°C (nelle parti più calde della regione), calcolata in base al percorso ad alta emissione di gas serra [Zittis, et alii, 2021].

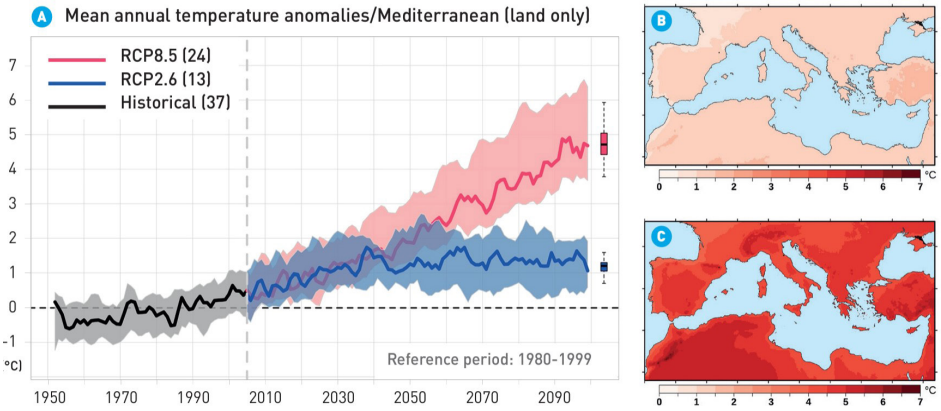


Fig. 2.2. Variazioni previste della temperatura annuale rispetto al periodo 1980-1999.

A: Simulazione per i percorsi RCP2.6 e RCP8.5,

B: Riscaldamento per RCP2.6,

C: Riscaldamento per RCP8.5.

Proiezioni del cambiamento delle precipitazioni

Attraverso il grafico [Fig. 2.3] si rileva che il tasso medio di diminuzione delle precipitazioni terrestri tra i modelli è del 4% per ogni grado di riscaldamento globale, il che determinerebbe una riduzione compresa tra il 4 e il 22% a seconda dello scenario alla fine del XXI secolo [MedECC, 2020]. Ciò comporterà probabilmente riduzioni sostanziali della disponibilità di acqua del 2-15% per 2 °C di riscaldamento [Lange, 2020]. Un recente studio ha messo in evidenza che l'anomala riduzione delle precipitazioni è il risultato della confluenza di due diversi effetti di un riscaldamento climatico: in primo luogo, si rileva un riscaldamento delle masse d'aria delle alte quote atmosferiche e in secondo luogo, una riduzione graduale e continua del differenziale di temperatura tra terra e mare [Tuel, & Eltahir, 2020].

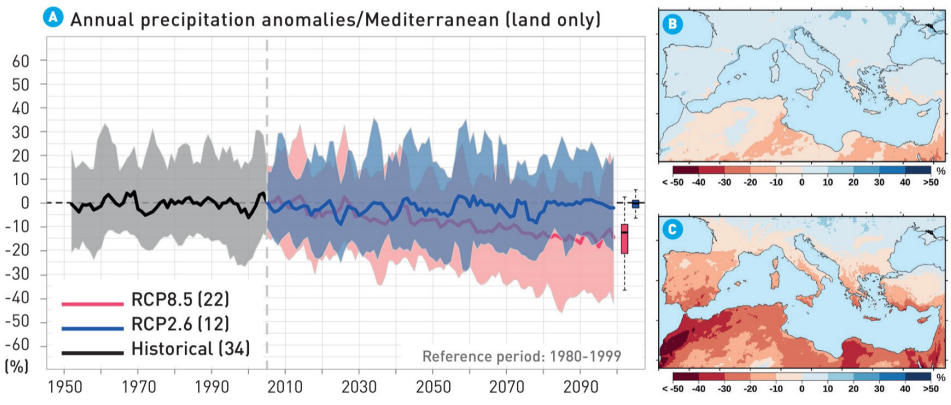


Fig. 2.3. Variazioni previste delle precipitazioni annuali rispetto al periodo 1980-1999.
A: Simulazione per i percorsi RCP2.6 e RCP8.5,

B: Anomalie per RCP2.6,

C: Anomalie per RCP8.5

Secondo uno studio [Benabdelouahab, et al., 2020] che analizza l'andamento delle precipitazioni e degli eventi estremi in area Mediterranea, usando un nuovo indice statico Extreme rainfall contribution index (ERCI95-Erci99)[8], ovvero Indice di contributo delle precipitazioni estreme (ERCI), si rileva che anche in un anno piovoso, ci saranno grandi periodi di siccità che avranno gravi impatti a livello socioeconomico ed ecologico.
Questo risultato va in contraddizione con gli attuali modelli di gestione che basano le loro previsioni su una serie temporale abbastanza lunga, piuttosto che annuale (come avviene in questo studio).
Ciononostante, Lionello e Scarascia [2018] tendono a concordare sul fatto che, nel XXI secolo, il riscaldamento si è verificato a un tasso più elevato nella regione mediterranea rispetto a quella globale e che la riduzione delle precipitazioni, sarà particolarmente grave per il Mediterraneo meridionale, le penisole iberica (a cui sarà dedicato il prossimo paragrafo), balcanica e anatolica.
L'analisi della variabilità climatica nella Regione del Mediterraneo è complessa e i risultati delle numerose ricerche in questo ambito devono avere l'obiettivo di fornire dei modelli affidabili e univoci, utili a ridurre il margine di incertezza e che possano fungere da solida base per future strategie e adattamento.
Ad avvalorare tale scenario, il rapporto dell'IPCC sul cambiamento climatico della Regione Mediterranea [Ali, et al., 2022] ha affermato che, per il Mediterraneo europeo entro la metà del secolo, ci sarà una combinazione prevista di cambiamenti climatici e fattori di impatto (riscaldamento, temperature estreme, aumento della siccità e dell'aridità, diminuzione delle precipitazioni, aumento degli incendi, livello medio ed estremo del mare, neve calo della copertura e diminuzione della velocità del vento) e si prevede un riscaldamento globale di almeno 2°C e oltre.

In sintesi, gli impatti dei cambiamenti climatici sull'ambiente mediterraneo riguarderanno in particolare:

- la temperatura media della regione è già aumentata di 1,5 °C rispetto ai livelli pre-industriali, causando un aumento delle ondate di calore e delle temperature estreme;

- i periodi di siccità sono più frequenti e intensi, in particolare nella porzione nord del Mediterraneo[9];

- il livello del mare è aumentato di conseguenza: la crescita è di 1,4 mm all'anno nel XX secolo, che nel periodo tra il 1993 e il 2018 è accelerata a 2,8 mm l'anno[10].
In particolare, si prevede che gli effetti dell'innalzamento del livello del mare saranno elevati per la maggior parte delle coste basse del bacino del Mediterraneo [UNEP/MAP, & Plan Bleu, 2020].

Per quanto riguarda le proiezioni future, oltre ai massimi di temperatura diurni più caldi, alcune parti del Mediterraneo dovranno probabilmente affrontare un aumento di oltre il 60% del numero di notti tropicali.
L'aumento degli estremi di temperatura calda sarà drammatico soprattutto in estate e con un riscaldamento globale di 4°C quasi tutte le notti saranno calde e non ci saranno giorni freddi [Lionello, & Scarascia, 2020].
Eventi di alta temperatura e ondate di calore (periodi di tempo eccessivamente caldo) diventeranno probabilmente più frequenti e/o più estremi. L'Organizzazione meteorologica mondiale (WMO) sta cercando di verificare una temperatura riportata di 48,8°C (119,8°F) in Sicilia e in Italia (a cui si dedicherà il prossimo paragrafo), l'11 agosto 2021 e di stabilire se si tratta di un nuovo record di temperatura per l'Europa continentale [WMO, 2020].

Per avere un quadro completo sugli scenari futuri del cambiamento climatico nella Regione Mediterranea e definire quali cambiamenti possono essere presi in considerazione per indirizzare soluzioni tecniche e tecnologiche a lungo termine – tutto ciò finalizzato agli obiettivi della ricerca- si sono simulate le proiezioni rispetto la variazione della temperatura massima e delle precipitazioni, nello scenario peggiore RCP 8.5 (RCP: Representative Concentration Pathway, 8.5: scenario peggiore di cambiamento climatico), utilizzando l'IPCC WGI Interactive Atlas, ovvero l'Atlante interattivo dell'IPCC[11].
L'Atlante interattivo si concentra sulle variabili atmosferiche quali, temperatura, precipitazioni e vento e fornisce informazioni globali per queste variabili sotto forma di mappe interattive per le osservazioni (climatologie e tendenze).

Proiezioni della variazione della temperatura massima nello scenario RCP 8.5

Attraverso la generazione della mappa globale [Fig. 2.4], si riportano le proiezioni future (osservazioni temporali) in area Mediterranea della temperatura massima nello scenario RCP 8.5 riferiti a periodi tempo: nel 2021-2040, si prevede un aumento di 2°C, nel 2041-2060 un aumento di 3,1°C fino ad arrivare ad un massimo di 5,7°C nel periodo compreso tra il 2081-2100.

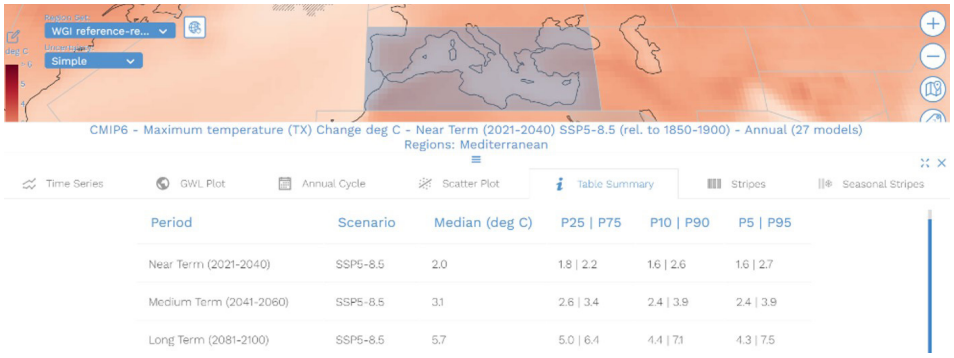


Fig. 2.4. Variazioni previste delle pTemperatura massima in area Mediterranea nello scenario RCP 8.5

Una conseguenza della variazione della temperatura è l'aumento del fenomeno dell'intensità dell'ondata di calore[12] che è più forte nelle parti meridionali e orientali del bacino del Mediterraneo, nonché in alcune parti della Spagna. Secondo i dati rilevati dall'AEMET[13] *Agencia Estatal De Meteorología*, pubblicati nel Rapporto "Resúmenes anual climatológico 2021" [AEMET, 2020], nel 2021 si sono registrate due ondate di caldo nella Penisola Iberica e nelle Isole Baleari e tre nelle Isole Canarie. Le temperature più alte del 2021 sono state osservate durante l'ondata di caldo di metà agosto, evidenziando tra i principali osservatori i 47,0 °C di Alcantarilla/base aerea, i 46,9 °C di Córdoba/aeroporto, i 46,2 °C a Murcia il 15 e 46,0 °C a Granada/aeroporto. Tra il 2011 e il 2020, la Spagna ha registrato il doppio delle ondate di calore rispetto ai tre decenni precedenti.
Il fenomeno delle ondate di calore è comune anche a diverse città italiane, con una tendenza di crescita che appare già in atto e con incrementi significativi ma diversificati nelle diverse realtà: 50 giorni in più di caldo intenso l'anno negli ultimi decenni del secolo per Napoli rispetto a inizio secolo; ma è un fenomeno che interessa in maniera significativa anche Milano (+ 30 giorni), Torino (+ 29) e Roma (+28).

Visti i frequenti episodi di ondata di calore, è stato valutato di dover simulare le proiezioni di temperatura massima, che si ipotizza di 40°C nello scenario RCP 8.5.

Proiezioni della variazione della temperatura massima di 40°C nello scenario RCP 8.5

La simulazione condotta [Fig. 2.5] rileva che per il periodo di tempo compreso tra il 2021-2040 si stima una media di 6,8 giorni, tra il 2041-2060 si prevede una media di 11,3 giorni e tra il 2081-2100 si annuncia una media di 26,8 giorni. I risultati individuano un'allerta delle future condizioni di cambiamento climatico, se non si prevedono delle misure specifiche di adattamento e di mitigazione nel prossimo futuro.

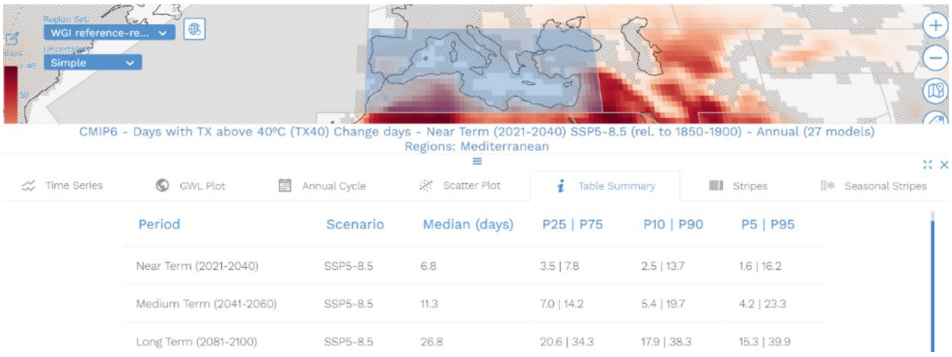


Fig. 2.5. Numero di giorni con Temperatura massima di 40°C in area Mediterranea nello scenario RCP 8.5

Proiezioni della variazione delle precipitazioni nello scenario RCP 8.5

La mappa globale ottenuta [Fig. 2.6] mostra le proiezioni future in area Mediterranea delle precipitazioni nello scenario RCP 8.5 riferiti a periodi tempo compresi tra il 2021-2040, in cui si prevede una diminuzione del 27,1%, tra il 2041-2060 si prospetta una diminuzione del 45,7% mentre tra il 2081-2100, la diminuzione raggiungerà la percentuale massima dell'83,2%.

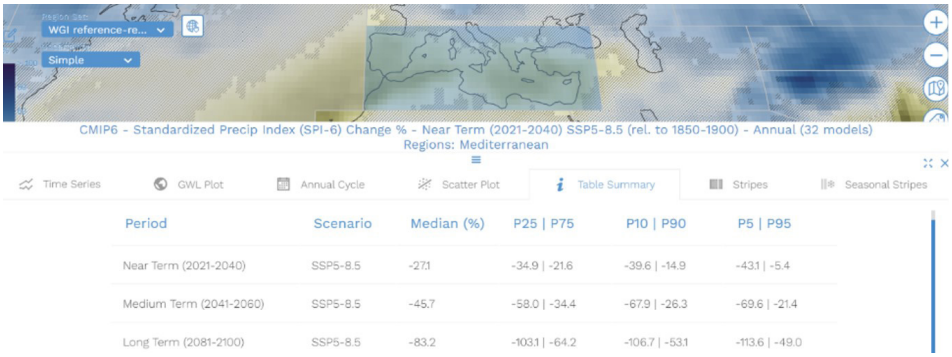


Fig. 2.6. Precipitazioni in area Mediterranea nello scenario RCP 8.5

Secondo Zittis [Zittis, et al., 2019], le proiezioni per i cambiamenti delle precipitazioni sono meno solide di quelle per le temperature ma, secondo lo scenario RCP 8.5, si prevede che la diminuzione delle precipitazioni raggiungerà il -30%, mentre per alcune parti del Mediterraneo meridionale la diminuzione delle precipitazioni raggiungerà o supererà il -40% delle precipitazioni annuali rispetto al periodo di riferimento (1986–2005).
Pertanto, mentre la quantità complessiva di precipitazioni diminuirà nel Mediterraneo, i temporali estremi prevarranno nella zona settentrionale e le inondazioni improvvise sono e probabilmente rimarranno i rischi meteorologici più pericolosi che colpiscono i Paesi medi-

terranei. La pioggia che cade in occasione di precipitazioni più brevi e concentrate potrebbe provocare frane, alluvioni e fenomeni di erosione. Una ricerca condotta sui potenziali effetti del riscaldamento sugli estremi metereologici rileva che, in Europa, si prevede che i picchi di alluvione con periodi di ritorno superiori a 100 anni raddoppieranno di frequenza entro 3 decenni [Alfieri, et al., 2015].

Da questo quadro, una domanda di ricerca a cui si vuole dare risposta nei successivi capitoli è:

Gli estremi climatici possono essere considerati indicatori di processi potenzialmente pericolosi per l'ambiente costruito e in particolare per l'involucro edilizio?

In questo contesto, per processi potenzialmente pericolosi, si intendono ad esempio alluvioni, frane, siccità, ondate di calore e incendi, dovuti al verificarsi di eventi meteorologici intensi.
I dati del rapporto "Analisi del Rischio. I cambiamenti climatici in sei città italiane" della *Fondazione del Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici*[14] CMCC, che studia gli impatti futuri in Italia, indica che i problemi legati agli allagamenti da piogge intense sono esacerbati dall'ambiente urbano a causa della densità dell'ambiente costruito, dell'impermeabilizzazione del suolo e di specifiche caratteristiche delle singole città. A Venezia, ad esempio, negli ultimi 150 anni il livello idrico relativo della città è cresciuto di oltre 30 centimetri e la soglia critica è stata superata 40 volte negli ultimi 10 anni; a Milano si sono registrati 150 eventi di piena negli ultimi 140 anni e in anni recenti si sono manifestati meno giorni piovosi, ma piogge più intense, a Napoli, piogge intense che fino ad oggi si sono verificate ogni 10 anni, potrebbero verificarsi ogni 4, a Bologna, invece, mentre la rete di drenaggio protegge la città dal rischio idraulico, secondo le proiezioni climatiche ci si aspetta per il futuro un aumento di intensità e frequenza di fenomeni di allagamento [Spano, et al., 2020]. Secondo il *Rapporto annuale dell'Osservatorio CittàClima di Legambiente* [Legambiente, 2021], in Italia aumentano gli eventi estremi e i comuni colpiti: dal 2010 al 1° novembre 2021 registrati 1.118 eventi meteorologici estremi (+17,2% rispetto alla scorsa edizione del rapporto); colpiti 602 comuni (95 in più rispetto allo scorso anno) con 261 vittime.

Sebbene sono stati riportati episodi estremi, si vuole precisare che il prossimo paragrafo sarà dedicato all'analisi del cambiamento climatico in Italia e in Spagna, per avere un quadro di confronto sul cambiamento climatico in queste Regioni e specificare il contesto specifico di riferimento per gli obiettivi della ricerca. In questo contesto, gli eventi sopra riportati hanno la finalità di sottolineare l'aumento della loro frequenza e intensità.

Negli ultimi 30 anni, in area Mediterranea, si sono anche registrati almeno una ventina di cicloni quasi tropicali, denominati "Medicane"[15] e detti anche TLC (Tropical Like Cyclones) caratterizzati da bruschi temporali, piogge torrenziali e forti venti con conseguenti allagamenti estesi con frane e danni alle costruzioni. Diversamente dagli uragani alle latitudini tropicali, l'aria fredda in alto è necessaria per migliorare lo squilibrio termodinamico e innescare la formazione di cicloni tropicali mediterranei.
La loro formazione si riscontra principalmente nelle parti centrali e occidentali del bacino durante la stagione fredda [Cavicchia, et al., 2014]. In effetti, la distribuzione spaziale dei medicane[16] ha luogo in due massimi rispettivamente sul Mediterraneo occidentale e sul Mar Ionio [Gaertner, et al., 2018]. In futuro, i cicloni delle medie latitudini dovrebbero diminuire in frequenza, ma aumenterà la loro intensità [Cavicchia, et al., 2014]. Un ultimo episodio di Medicane "Apollo" si è registrato il 25 ottobre 2021 ed ha investito la Sicilia con forti venti umidi orientali che portano intense piogge tra Messina e Catania con totali vicini a 200 mm/48 ore [Valisa, 2014].

Da questo quadro emerge che, nella Regione Mediterranea, secondo le osservazioni e le proiezioni[17] dell'IPCC e condotte per i livelli di riscaldamento globale di 1,5°C e 4,0°C:
- aumenteranno gli estremi di temperatura in tutta la Regione Mediterranea;
- diminuiranno gli estremi di freddo in tutta la Regione Mediterranea;
- aumenteranno le forti precipitazioni soprattutto nella parte Nord-Est e Nord-Ovest;
- diminuirà la velocità del vento in tutta la Regione Mediterranea.

Si prevede che i cambiamenti climatici avranno impatti significativi sull'ambiente terrestre, costiero e marino della regione mediterranea. Tra questi, l'aumento previsto dell'aridità, dovuto alla riduzione delle precipitazioni e al riscaldamento; l'aumento del rischio di incendi più frequenti e gravi, con aumenti previsti dell'area bruciata tra il 40 e il 100% [UNEP/MAP, & Plan Bleu, 2020]. Uno schema sintetico riporta le informazioni relative alle previsioni future del cambiamento dei fattori climatici [Fig. 27].

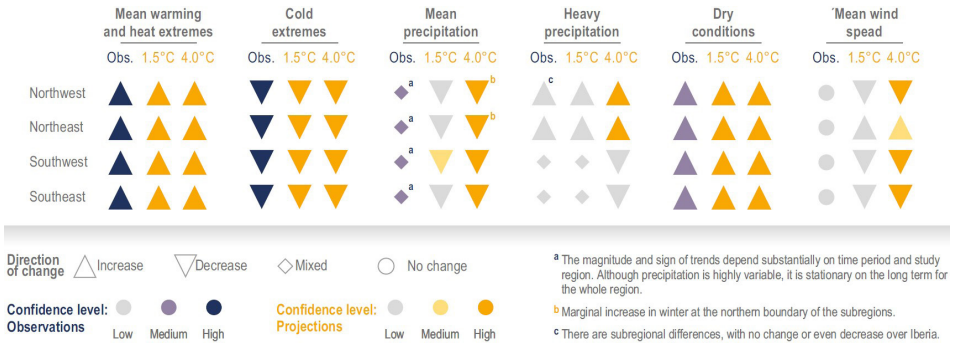


Fig. 2.7. Previsioni future del cambiamento dei fattori climatici nella Regione Mediterranea per i livelli di riscaldamento globale di 1,5°C e 4,0°C

Le proiezioni, qui riportate, confermano che il Mediterraneo potrebbe essere una regione particolarmente sensibile al cambiamento climatico globale e che questo problema non può essere sottovalutato dalla comunità scientifica e politica [Giorgi, & Lionello, 2008].
Rispetto a tutti i possibili episodi estremi previsti nella Regione Mediterranea, gli sforzi della ricerca si concentrano quindi, sulle variabili atmosferiche quali, temperatura, precipitazioni e vento che dalla letteratura di settore, sono i parametri che più influenzano il cambiamento climatico nella Regione Mediterranea. Le conseguenze, o meglio gli impatti che ne derivano sono ondate di calore e alluvioni, medicane sempre più frequenti e di intensità maggiore rispetto i fenomeni che si verificavano nel periodo pre-industriale.
Episodi che in passato erano eccezionali, oggi, tendono a rappresentare sempre più la normalità. Il cambiamento di alcuni parametri climatici, non solo rende inefficaci i regolamenti e gli strumenti di governo del territorio di cui disponiamo, ma più urgentemente svela l'incapacità delle città nell'affrontare questo scenario di forte cambiamento e di grande incertezza in cui siamo chiamati a ragionare. Ciò pone nuovi interrogativi ai quali bisognerà dare risposta nel prossimo futuro.
L'obiettivo 4 *Addressing climate change as a priority issue for the Mediterranean*[18] (Affrontare il cambiamento climatico come questione prioritaria per il Mediterraneo) della *Mediterranean Strategy For Sustainable Development 2016-2025*[19] (Strategia Mediterranea dello Sviluppo sostenibile) sottolinea l'esigenza di creare condizioni strategiche con il fine ultimo di garantire e implementare la conoscenza scientifica che porti ad un'attuazione dello sviluppo sostenibile in questa Regione [UNEP/MAP, 2016].
Come enunciato nel precedente capitolo, le città devono dotarsi di piani locali, dove strategie di mitigazione e adattamento vengono considerate in modo congiunto, al fine di renderle resilienti ai cambiamenti climatici.

Si vuole sottolineare che nelle città, gli impatti saranno elevati a causa della concentrazione di manufatti edilizi o altre tipologie di beni e servizi in stretta relazione con condizioni che possono amplificare i rischi (per esempio materiali non adeguati, possono amplificare l'effetto isola di calore urbana). Indagare questi fenomeni sull'ambiente costruito ed in particolare analizzare gli effetti che questi comportano sull'involucro edilizio (Cfr. Cap. 3) è uno degli obiettivi della tesi, al fine di dichiarare se gli estremi climatici possono essere considerati indicatori di processi progettuali adattivi.
A questo riguardo, un'azione necessaria e cruciale per la definizione di possibili indicatori è sviluppare delle serie temporali degli scenari futuri di cambiamento climatico, non più a scala globale ma a scala regionale, che viene qui inteso come un approccio innovato per costruire delle previsioni più accurate attraverso cui definire le problematiche climatiche associate agli effetti. Questa ambizione porta a codificare l'Area Mediterranea come un'area di controllo. Per restringere l'analisi degli estremi climatici, i contesti di studio sono l'Italia e la Spagna, che vengono trattati nel paragrafo successivo al fine di sviluppare un quadro di confronto sulla conoscenza degli effetti e degli impatti in queste specifiche aree mediterranee e con l'obiettivo di fornire un nuovo approccio allo sviluppo di metodi di valutazioni degli involucri edilzi che siano "non omologati" per i differenti contesti climatici.

2.2 Proiezioni dei dati climatici futuri e intensificazione dei fenomeni estremi

"The Mediterranean countries need to identify and develop
a regional approach to climate change adaptation,
with common regional priorities in order to increase
the resilience of the Mediterranean to climate change"[20]
[UNEP/MAP, 2016, p. 49]

Introduzione metodologica
La Regione Mediterranea si trova a un bivio per quanto riguarda i cambiamenti climatici e lo sviluppo sostenibile [UNEP/MAP, 2016]. La sfida per il raggiungimento degli obiettivi dello sviluppo sostenibile richiede al tempo stesso, risposte immediate e tecniche urgenti che coinvolgono le dinamiche dal livello nazionale, regionale fino a raggiungere il livello locale. Per affrontare la questione ambientale e scientifica del cambiamento climatico nella Regione Mediterranea è necessaria un'attenta valutazione che comprende una vasta quantità di dati e informazioni, inclusi i risultati del monitoraggio per ciascun paese del Mediterraneo. Prima di entrare nello specifico della trattazione, è utile fare chiarezza sui termini di *proiezione climatica* e *previsione climatica*, usati spesso in maniera interscambiabile, utilizzando le definizioni dell'IPPC.
'Una proiezione climatica è la risposta simulata del sistema climatico a uno scenario di emissioni o concentrazioni future di gas a effetto serra (GHGs) e aerosol, generalmente derivata da modelli climatici. Le proiezioni climatiche si distinguono dalle previsioni climatiche per la loro dipendenza dallo scenario di emissione/concentrazione/forzante radiativo utilizzato, che a sua volta si basa su ipotesi riguardanti, ad esempio, i futuri sviluppi socioeconomici e tecnologici che possono o meno realizzarsi' [IPCC, 2014, p. 120].
L'attenzione, in questo caso, si focalizza sulle proiezioni dei dati climatici futuri per avere un quadro completo sui possibili cambiamenti dei parametri climatici, che determineranno l'intensificazione di fenomeni estremi in determinate regioni dell'area Mediterranea. L'applicazione alle realtà regionali delle strategie di mitigazione e adattamento proposte a livello globale non può prescindere da un'attenta analisi qualitativa e quantitativa degli impatti attesi sul territorio, per avere una migliore conoscenza degli effetti dei cambiamenti climatici e per sviluppare le competenze, i metodi e le tecnologie necessari per far fronteggiarne le conseguenze.
Come sottolineato nel precedente paragrafo, le proiezioni su scala regionale è molto complessa, non solo a causa della complessità stessa del sistema climatico [Vellinga, & Ver-

seveld 2000] ma anche per le limitate strumentazioni e stazioni di monitoraggio, con la conseguenza di ricevere dati poco attendibili e affidabili. Fino a qualche decennio fa, le evidenze scientifiche relative alle variazioni delle precipitazioni intense ed estreme sono state piuttosto rare, forse a causa della difficoltà di condurre adeguate valutazioni statistiche in mancanza di dati giornalieri di buona qualità [Gaudioso, 2002]. Sebbene le indicazioni di incertezza[21] potrebbero rendere più difficile anche l'inclusione della valutazione scientifica nel processo decisionale, le attività di ricerca, i dati di monitoraggio e la generazione di altre conoscenze sui cambiamenti climatici – nella Regione Mediterranea – devono essere coordinati e sempre più 'corrispondenti al vero', al fine di orientare misure specifiche per fronteggiarne le conseguenze. Nel Piano Strategico 2019-2029 *Climate Change in the Future, Fast Changing World*[22] di CMCC[14], si afferma che fornire le conoscenze, le previsioni e gli strumenti di supporto alle decisioni, in un arco di tempo ragionevole, rappresenta un'enorme sfida intellettuale e tecnica [CMCC, 2019].

Lo sviluppo di analisi e delle proiezioni dei dati climatici futuri quindi, intende fornire una solida base su cui tracciare e definire efficaci strategie di adattamento e di mitigazione, per i diversi livelli e fasi di progettazione. I risultati scientifici, sempre più affidabili, sono ottenuti attraverso simulazioni di accresciuta affidabilità e precisione. Oggi, è possibile fare proiezioni che hanno un buon livello di attendibilità, rispetto alle variabili climatologiche quali, temperatura, precipitazioni, velocità del vento, umidità che rappresentano degli 'parametri necessari' per la valutazione dei rischi e della vulnerabilità. Altre proiezioni riguardano l'innalzamento del livello dei mari, la circolazione atmosferica, la concentrazione di CO_2 e il numero dei cicloni. Rispetto l'attività dei cicloni nel Mediterraneo, spesso associati ad eventi estremi dannosi, come forti precipitazioni, tempeste di vento, mareggiate e tempeste marine, non esiste un consenso generale sull'effetto del riscaldamento globale sull'attività dei cicloni nel bacino del Mediterraneo [Reale, et alii, 2022].

In generale, il punto di partenza per ottenere proiezioni climatiche sulle prime variabili elencate è quindi la costruzione di *modelli climatici*[23]. Secondo l'IPCC, '*un modello climatico è una rappresentazione numerica del sistema climatico basata sulle proprietà fisiche, chimiche e biologiche dei suoi componenti, sulle loro interazioni e sui processi di feedback e che tiene conto di alcune delle sue proprietà note*' [IPCC, 2014, p. 120]. Risulta necessario sottolineare la differenza tra due tipologie di modelli climatici tra cui, i Modelli di Circolazione e i Modelli Climatici Regionali.

I *Modelli di Circolazione Globali* (GCM) producono proiezioni del clima futuro a una risoluzione dell'ordine del centinaio di km. Tutto quello che succede a scale più piccole della risoluzione (cioè della grandezza di ogni singola cella) viene "parametrizzato", cioè non descritto esplicitamente ma rappresentato in modo più semplice mediante relazioni empiriche che legano il valore delle variabili "sottogriglia" a quello delle variabili risolte dal modello.

I *Modelli Climatici Regionali* (RCM) vengono "innestati" in quelli globali e hanno la specifica caratteristica di descrive i processi ad una risoluzione maggiore su scala regionale. Queste tecniche possono produrre dati per analisi a scala regionale e locale, e quindi teoricamente, molto più importanti per l'analisi di eventi estremi [García-Aristizábal, 2012].

Attraverso l'utilizzo di altri metodi statistici e/o stocastici, o meglio dire tecniche di donwnscaling[24], la risoluzione spaziale ottenuta con un modello regionale può essere ulteriormente affinata, ottenendo dei dati climatici a una risoluzione dell'ordine della decina di km. L'integrazione tra misure e modelli è davvero essenziale per una stima quantitativa dell'evoluzione del clima nei processi decenni, ma risulta difficoltosa quando non si ha la disponibilità di dati pluriennali attendibili grazie alle quali è possibile costruire regressioni che permettano di elaborare scenari futuri per le località in cui si effettuano le misure meteorologiche. I limiti[25] delle proiezioni sui dati climatici mettono in evidenza che concentrarsi sulle tendenze previste senza tener conto delle variazioni decennali, potrebbe quindi rendere le comunità più vulnerabili agli shock climatici e ai fattori di stress [Nissan, et alii, 2019].

Tuttavia, in questa sezione si prenderanno in considerazione le proiezioni legate al cambiamento climatico, rappresentate dagli scenari di emissioni elaborati dall'IPCC, mediante modelli climatici che simulano la concentrazione dei gas climalteranti, fissati a livello internazionale e indicati come R*epresentative Concentration Pathways*[26] (RCP) Percorsi Rappresentativi di Concentrazione. Gli scenari RCP sono quattro, RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6 e RCP 8.5, dove il valore accanto all'acronimo indica la forzante radiativa[27] in W/m2. Il primo percorso RCP2.6 presenta un picco di 3W/m2 a metà del secolo, tornando a 2,6 W/m2 entro il 2100 conducendo a livelli di concentrazione di gas serra fortemente ridotte; il RCP 8.5 è un percorso in cui le emissioni di gas serra continuano a crescere senza limitazioni, fino alla stabilizzazione del forzante radiativo a 8,5 W/m2, portando a un aumento della temperatura media globale di 4,3°C entro il 2100; i percorsi RCP4.5 e RCP6 sono intensi traiettorie di stabilizzazione media, con diversi livelli di mitigazione delle emissioni [Peres, & Cancelliere, 2018].

L'influenza dei cambiamenti climatici sui singoli eventi metereologici estremi è un campo di ricerca aperto, dove gli studiosi cercano di capire, su base scientifica, la relazione cambiamento climatico-fenomeni estremi. In effetti, gli sforzi della ricerca si dirigono verso la conoscenza scientifica sulla correlazione causa-effetto tra cambiamento climatico e fenomeni estremi. Risulta necessario fare riferimento ad uno studio pubblicato su *Proceedings of the National Academy of Sciences* nel 2017, dove le misurazioni statistiche hanno osservato che '*il riscaldamento storico ha aumentato la gravità e la probabilità degli eventi più caldi in più dell'80% della superficie del globo per il quale erano disponibili le osservazioni*' [Diffenbaugh, et al., 2017, p. 1]. A conferma di questo studio, oltre i rapporti scientifici dell'IPCC, il Rapporto *Explaining Extreme Events in 2020 from a Climate Perspective*[28], spiega (attraverso l'analisi di diversi eventi di fenomeni estremi) il ruolo del riscaldamento climatico globale come agente capace di aumentare la frequenza e/o l'intensità dei fenomeni meteorologici estremi. La sua influenza diretta si riferisce ai fenomeni di siccità, di ondate di calore, di alluvioni, di inondazioni con grandi impatti a livello globale. La conoscenza dei fenomeni climatici estremi riveste particolare importanza non solo nella valutazione degli impatti dei cambiamenti climatici in uno specifico contesto, ma possono concorrere alla definizione di nuove strategie al fine di mitigare le gravi conseguenze sul territorio, sulla salute, sull'economia e sull'ambiente.

Contestualizzando quanto finora detto e, sulla base della disponibilità di queste nuove fonti di informazione, che rappresentano lo stato dell'arte nelle simulazioni dei cambiamenti climatici sia globali che regionali, in questo paragrafo si intende presentare una valutazione aggiornata delle proiezioni future del cambiamento climatico nella Regione del Mediterraneo. Per gli obiettivi di questo lavoro, è possibile analizzare e mettere a confronto i dati climatici evidenziati dai modelli, indipendentemente dall'incertezza che si potrebbe rilevare nell'area geografica di interesse.

Dopo tale premessa, si vuole dichiarare che non rientra negli scopi e nelle possibilità del lavoro di ricerca stabilire la qualità dei risultati dei modelli climatici utilizzati (per fare questo bisogna sviluppare specifiche competenze in climatologia, fisica, meteorologia), in quanto questi costruiscono, in modo oggettivo, lo stato dell'arte rispetto le proiezioni a scala regionale per la Regione Mediterranea.

Infine, si sottolinea che l'analisi delle proiezioni dei dati climatici futuri è qui focalizzata solo sull'Italia e sulla Spagna, con la possibilità di fornire una breve sintesi degli impatti probabili futuri che causano l'intensificazione di eventi estremi. Ai fini degli obiettivi della ricerca, questa mappatura è necessaria per avere una migliore conoscenza rispetto agli effetti dei cambiamenti climatici rispetto ad uno specifico studio e per orientare possibili soluzioni tecniche e tecnologiche *ad hoc* per fronteggiare gli impatti e i rischi ad essi connessi.

Per ogni Nazione, vengono descritte sinteticamente le caratteristiche generali del clima e le proiezioni dei dati climatici futuri, rispetto principali variabili atmosferiche della tem-

peratura, delle precipitazioni, dell'umidità e del vento, sottolineando l'attenzione sulle conseguenze che i cambiamenti climatici comportano; ci si riferisce ai fenomeni estremi come ondate di calore, alluvioni, tempeste che saranno sempre più frequenti. Un limite allo studio degli estremi rispetto allo studio delle medie climatiche è la disponibilità di serie di dati ad elevata risoluzione temporale e spaziale, oltre che sufficientemente complete e di qualità controllata [Fioravanti, et al., 2013].

L'analisi per la simulazione della situazione climatica futura per l'Italia, viene effettuata servendosi del database *DataClime*[29] messo a disposizione dal Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC), utilizzando il modello climatico regionale definito COSMO-CLM[30] (Consortium for Small Scale Modeling) della Climate Limited-area Modelling Community[31]. Il modello COSMO-CLM è stato utilizzato per un'ampia serie di esperimenti ed è stato eseguito su un'ampia gamma di scale temporali (fino a un secolo) e risoluzioni (1–50 km) [Sørland, et al., 2021]. Gli scenari proposti tra quelli identificati dell'IPCC sono RCP 8.5, che indica uno scenario senza nessuna iniziativa di mitigazione, e RCP 4.5, uno senario intermedio che prevede alcune iniziative di controllo e riduzione delle emissioni. Rispetto ad ambedue gli scenari, e con la possibilità di simulare tre periodi futuri (2021-2050, 2041-2070, 2071-2100), vengono riportate le mappe climatiche per l'Italia costruite mediante le informazioni relative al periodo 1981-2010.

L'analisi per la simulazione della situazione climatica futura per la Spagna, è stata costruita attraverso le mappe disponibili sul Portale *Agencia Estatal de Meteorología* AEMET[32]. Le proiezioni, sia per la temperatura che per le precipitazioni, si riferiscono agli scenari di emissioni RCP 4.5, RCP 6.0 e RCP 8.5. Per quanto riguarda l'intensificazione degli eventi estremi, per ottenere un confronto e una lettura ottimizzata dei dati disponibili, è stato utilizzato il software di simulazione AdapteCCa[33], con l'obiettivo di costruire una solida base di conoscenze coerenti ed aggiornate rispetto gli scenari futuri del clima della Spagna. In questo caso, la piattaforma mette a disposizione due scenari di emissioni quali RCP 4.5 e RCP 8.5 rispetto tre periodi temporali di 30 anni: Futuro cercano: 2011-2040, Futuro medio: 2041-2070 e Futuro lejano: 2071-2100.

Lo scopo di questo specifico studio è definire un'area climatica di riferimento per indirizzare specifiche prestazionali per gli involucri edilizi, attraverso rigorosi riferimenti al panorama scientifico attuale. Seppur considerando che gli strumenti per l'analisi climatica (DataClime per l'Italia e AEMET per la Spagna) sono diversi per i contesti oggetto della ricerca, questi hanno il medesimo obiettivo di rilevare i dati climatici nello stesso periodo di riferimento (RCP 4.5 e RCP 8.5).
Si vuole mettere in evidenza la vulnerabilità agli episodi di eventi estremi per le aree Italia e Spagna (che fanno parte della Regione Mediterranea, oggetto di studio) a causa dell'elevata probabilità che in questo specifico contesto si possono verificare ondate di calore estremo, bombe d'acqua e cicloni mediterranei.

2.2.1 Italia: scenari climatici futuri rispetto a temperatura, precipitazioni, umidità, vento

"I cambiamenti climatici in Italia sono legati a incrementi della temperatura, modifiche nel regime delle precipitazioni e maggiore frequenza e durata di fenomeni climatici estremi"
[Spano, et al., 2020, p.8]

Caratteristiche generali del clima
Il clima italiano è il clima che caratterizza la regione italiana, compresa tra 47° 00′ e 35° 30′ di latitudine nord, ed è quasi interamente circondata dal Mar Mediterraneo che costituisce una fonte inesauribile di calore ed umidità.

Secondo la classificazione di Koppen, il clima è quasi completamente di tipo temperato e più precisamente clima mediterraneo e clima temperato umido. Grazie alla posizione peninsulare, l'Italia risente della presenza mitigatrice del mare: le temperature si alzano raramente sopra i 40° e scendono altrettanto sporadicamente sotto lo zero nella stagione invernale. Le stagioni intermedie (primavera e autunno) sono caratterizzate da forti precipitazioni soprattutto dettate da correnti calde nordafricane che investono la penisola dopo essersi caricate di vapore acqueo sopra il mediterraneo. Tuttavia, data la conformazione geografica e le dimensioni allungate della penisola, le condizioni climatiche variano da zona a zona; per questo motivo si possono individuare sei regioni climatiche[34], ognuna delle quali presenta caratteristiche particolari riguardanti la temperatura, l'escursione termica annua, la piovosità e il regime annuo delle precipitazioni, la frequenza dei venti.

Scenari climatici futuri: Temperatura

Secondo il Rapporto '*Analisi del rischio, I cambiamenti climatici in Italia*' [Spanò, et al., 2020], in Italia, l'analisi dei dati climatici misurati dalle reti di osservazione rileva un incremento di oltre 1,1°C della temperatura media annua nel periodo 1981-2010 rispetto al trend 1971-2000. Tuttavia gli ultimi decenni, sono stati caratterizzati da temperature elevate.
In Italia, con un'anomalia media di +0.23°C rispetto allo stesso periodo di riferimento (+1.22°C rispetto al valore medio 1961-1990) il 2021 è risultato meno caldo dei precedenti, collocandosi al di fuori della classifica dei dieci anni più caldi della serie dal 1961 [Fioravanti, et al., 2022]. Nel 2020 invece, secondo dati ISTAT[35], la temperatura media annua dei capoluoghi di provincia (calcolata come media dei valori rilevati in tutte le stazioni meteorologiche osservate) è pari a +15,8°C, in aumento (+0,3°C) sul valore medio del periodo 2006-2015.
Sebbene sia difficile fornire una mappatura esatta dei cambiamenti climatici, attraverso il modello climatico COSMO-CLM, si sono ricostruite le variazioni di temperatura media giornaliera rispetto i due scenari RCP 4,5 e RCP 8,5 simulando tre periodi futuri 2021-2050, 2041-2070, e 2071-2100, mediante le informazioni relative al periodo 1981-2010.

I risultati delle simulazioni (espresse in °C) prodotte hanno permesso di rilevare:

A) *Per lo scenario RCP 4,5* [Fig. 2.8 (a,b,c)]:
- periodo attuale compreso tra il 2021-2050, l'aumento di temperatura si prevede intorno a 1,1°C e 1,5°C;
- nel periodo 2041-2070, l'incremento della temperatura si aggira tra i 2°C e 2,5°C su tutto il territorio nazionale;
- nel periodo 2071-2100, l'aumento di temperatura giunge anche a circa 4°C nel nord-ovest della penisola italiana nel periodo estivo.

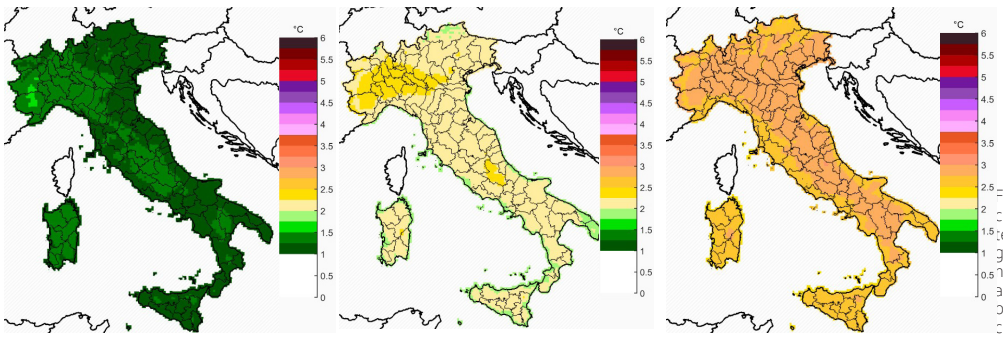


Fig. 2.8. Proiezioni climatiche future della temperatura media giornaliera per l'Italia nello scenario RCP 4,5: a) periodo 2021-2050, b) periodo 2041-2070, c) periodo2041-2070

B) *Per lo scenario RCP 8,5* [Fig. 9 (a,b,c)]:
- periodo attuale compreso tra il 2021-2050, l'aumento di temperatura si attesta a 1,5°C, su tutto il territorio nazionale;
- nel periodo 2041-2070, l'incremento della temperatura raggiunge i 3°C, su tutto il territorio nazionale;
- nel periodo 2071-2100, l'aumento di temperatura raggiunge i 5°C, ma potrebbe registrare incrementi intorno i 5,5°C e i 6°C, soprattutto nel Nord della Penisola.

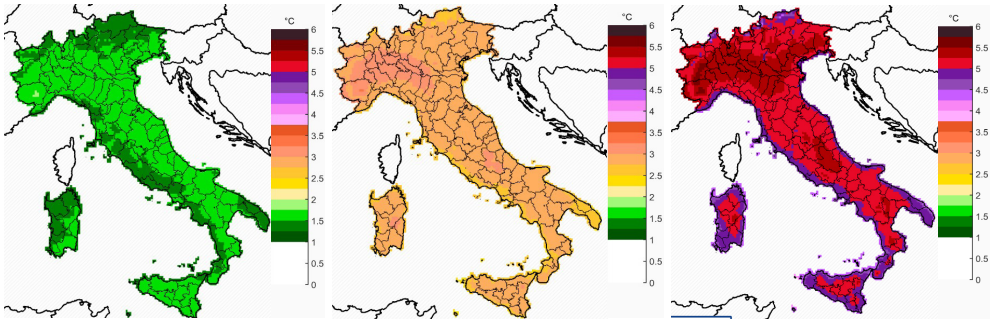


Fig. 2.9. Proiezioni climatiche future della temperatura media giornaliera per l'Italia nello scenario RCP 8,5: a) periodo 2021-2050, b) periodo 2041-2070, c) periodo 2041-2070

Scenari climatici futuri: Precipitazioni

L'aumento della temperatura media globale può comportare una maggiore evaporazione e di conseguenza un incremento delle precipitazioni. '*Le precipitazioni sono fenomeni metereologici transitori di intensità molto variabile, che interessano porzioni di territorio più o meno estese*' [Esposito, et al., 2015, p. 43].
Secondo il Rapporto '*I normali climatici 1991-2020 di temperatura e precipitazione in Italia*', a livello stagionale, le precipitazioni si distribuiscono intorno a 217.7 mm in inverno, a 203.2 mm in primavera, a 123.9 mm in estate e a 278 mm in autunno [Fioravanti, et al., 2022].
I dati ISTAT[36] rilevano che il 2020 si presenta come l'anno meno piovoso degli ultimi dieci, insieme al 2011, con una precipitazione totale annua di 661 mm (media delle stazioni osservate). Nelle principali città, sovrapposta alla tendenza ad aumento generalizzato della temperatura media, la diminuzione della precipitazione è pari a -132 mm sul corrispondente valore medio del periodo 2006-2015.

Come per le proiezioni della temperatura, attraverso il modello climatico COSMO-CLM, si sono ricostruite le variazioni della precipitazione invernale rispetto i due scenari RCP 4,5 e RCP 8,5 simulando tre periodi futuri 2021-2050, 2041-2070, e 2071-2100, mediante le informazioni relative al periodo 1981-2010. I risultati delle simulazioni (espresse in %) prodotte hanno permesso di rilevare:

C) *Per lo scenario RCP 4,5* [Fig. 2.10 (a,b,c)]:
- il periodo attuale compreso tra il 2021-2050, mostra un calo delle precipitazioni di circa il 14% su tutto il territorio nazionale;
- nel periodo 2041-2070, il calo delle precipitazioni si attesta fino al 28%, specialmente nel Sud Italia;
- nel periodo 2071-2100, si ha un incremento circa del 30%, in particolar modo, nelle regioni del Nord-Ovest dell'Italia.

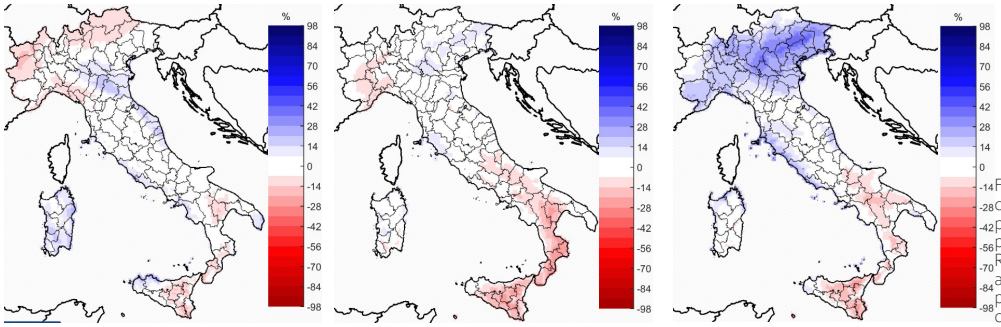


Fig. 2.10. Proiezioni climatiche future delle precipitazioni invernali per l'Italia nello scenario RCP 4,5: a) periodo 2021-2050, b) periodo 2041-2070, c) periodo 2041-2070

D) *Per lo scenario RCP 8,5* [Fig. 2.11 (a,b,c)], che conferma l'andamento dello scenario RCP 4,5, ma con anomalie accentuate:
- il periodo attuale compreso tra il 2021-2050, mostra in generale un calo delle precipitazioni su tutto il territorio nazionale: nelle regioni a Sud il calo si attesta al 14%, mentre al Nord si rileva un lieve aumento fino al 28%;
- nel periodo 2041-2070, il calo delle precipitazioni si attesta al 30%, specialmente nelle regioni a Sud;
- nel periodo 2071-2100, viene confermato la drastica riduzione del regime delle precipitazioni nelle Regioni a Sud, mentre nella parte settentrionale si prospetta un aumento intorno all'80%, specie in Friuli Venezia Giulia e in Veneto.

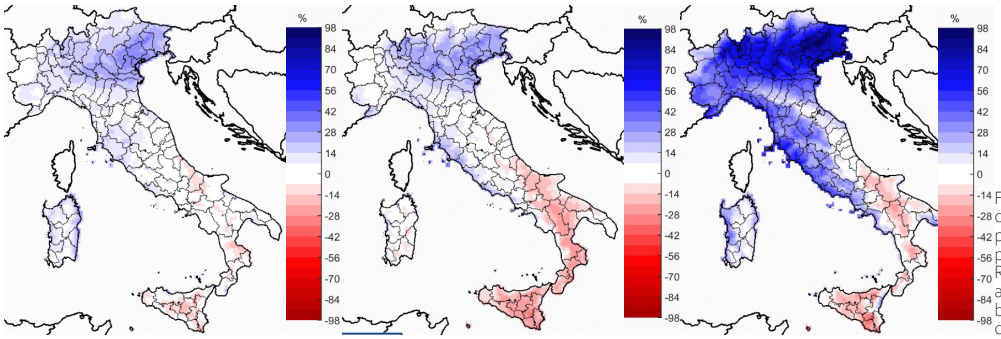
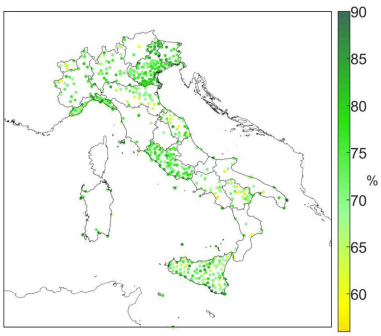


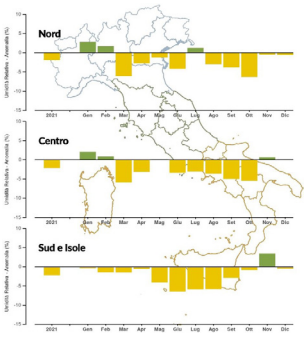
Fig. 2.11. Proiezioni climatiche future delle precipitazioni invernali per l'Italia nello scenario RCP 8,5: a) periodo 2021-2050, b) periodo 2041-2070, c) periodo 2041-2070

Scenari climatici futuri: Umidità

L'umidità svolge un ruolo fondamentale nel sistema climatico, in particolare per quanto riguarda il verificarsi di eventi estremi quali siccità e ondate di calore. La sua stima quantitativa, attraverso i modelli climatici, risulta molto complessa a causa della mancanza di una serie di dati, il che comporta delle incertezze nelle previsioni climatiche. L'umidità assoluta varia in base alla temperatura e alla pressione atmosferica ma questo valore è raramente utilizzato. In ambito meteorologico, viene impiegata l'umidità relativa[37].
Il Database *DataClime*[29] non permette di simulare in tempo reale questo parametro; per questi motivi si riportano i dati del Rapporto '*Gli indicatori del clima in Italia nel 2021*' [Fioravanti, et al., 2022, p.76], secondo cui i valori di umidità relativa media annuale[38] del 2021 sono compresi tra 57% e 96% circa [Fig. 2.12]. La figura [Fig. 2.13] riporta invece, il valore medio dell'anomalia di umidità relativa pari al -2,5%.
Un recente studio [Raymond, et alii, 2020] mostra come i climatologi ricorrono a un para-

metro chiamato "temperatura del bulbo umido" per calcolare gli effetti del caldo associato all'umidità. Analizzando le variazioni ora per ora delle condizioni atmosferiche registrate da migliaia di stazioni nel mondo nelle ultime quattro decadi, gli autori dello studio hanno individuato alcune zone del mondo in cui la soglia dei 35°C di temperatura a bulbo umido è stata già superata anche se solamente per un'ora o due alla volta. Inoltre, i climatologi hanno realizzato una mappa del mondo interattiva[37] che mostra istanze documentate, con colori più caldi dal giallo al rosso che indicano le peggiori combinazioni misurate sulla scala centigrada del "bulbo umido". Il valore più alto si attesta al 33% in Puglia [Fig. 2.14].





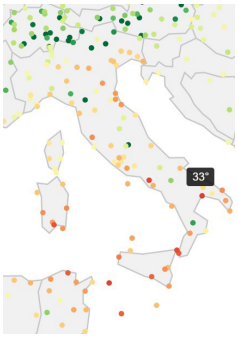


Fig. 2.12. Valori dell'umidità relativa media annuale calcolati per il 2021

Fig. 2.13. Anomalia media 2021 (annuale e mensile) dell'umidità relativa media rispetto al valore normale 1991–2020

Fig. 2.14. Valori di temperatura a bulbo umido registrati per l'Italia

Scenari climatici futuri: Vento

Il database DataClime non supporta le proiezioni climatiche future per lo spostamento di masse d'aria, cioè il vento. Attualmente le problematiche maggiori permangono per la previsione di fenomeni molto violenti fortemente localizzati quali per esempio gli episodi di vento all'interno di temporali forti. Va comunque sottolineato un significativo rinforzo delle tempeste di vento, wind storm, la cui frequenza e intensità sta aumentando in tutto il mondo [Gozzini, 2020]. Per questo parametro climatico, emerge la necessità di costruire modelli per prevedere la sua evoluzione.

Intensificazione dei fenomeni estremi

L'esistenza di un processo accelerato di cambiamento climatico in Italia, è assodato dalla comunità scientifica. Tuttavia, riuscire ad analizzare fenomeni sempre più complessi e connessi rappresenta un punto critico ma allo stesso tempo decisivo da cui partire per indirizzare nuove misure di adattamento ed in linea con le trasformazioni del cambiamento climatico nel prossimo futuro. -Si sottolinea che l'Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) del CLIVAR Working Group on Climate Change Detection della Commissione per la Climatologia dell'organizzazione Meteorologica Mondiale, ha definito un insieme di 27 indici, idonei a descrivere gli estremi di temperatura e precipitazione in termini di frequenza, intensità e durata-. Di questi 27 indici, attraverso il database DataClime, si possono simulare gli scenari climatici e gli eventi estremi utilizzando 10 indicatori[39] - tra cui temperatura media giornaliera e precipitazioni invernali che sono state analizzate precedentemente - come ad esempio: giorni consecutivi senza pioggia, giorni di freddo intenso, giorni di precipitazione intensa. L'uso di indici permette non solo di identificare con certezza statistica un evento estremo, ma anche di osservarne il trend nel corso dei decenni, in termini di frequenza, durata e intensità. È chiaro che non rientra negli obiettivi del lavoro analizzare tutti gli indicatori estremi e riportare per ciascuno i risultati, ma è necessario indicare quali sono i fenomeni estremi più frequenti che stanno caratterizzando l'Italia [WWF, 2016].

In considerazione dei risultati delle mappe climatiche sopra riportate, risulta che negli ultimi decenni, l'Italia è stata caratterizzata un aumento significativo della temperatura e delle precipitazioni intense, che vengono qui intesi come due fattori che permettono di caratterizzare gli eventi climatici estremi.

Ondate di calore
Definizione: Non esiste una definizione[40] univoca e riconosciuta di ondata di calore, ma diversi centri di ricerca e istituti (ad esempio l'Ispra) utilizzano indici codificati e scientificamente riconosciuti, come il WSDI (Warm Spell Duration Index) indicato dalla World Meteorological Organization (Wmo). L'indice WSDI identifica un'ondata di calore quando si verifica un periodo di almeno sei giorni consecutivi durante i quali le temperature sono al di sopra del 90° percentile, spesso accostate ad alti tassi di umidità e in assenza di correnti ventose [Fioravanti, et al., 2022].
Le ondate di calore possono essere definite come un tipo specifico di evento di temperatura estrema [Perkins-Kirkpatrick, & Lewis, 2022].

Rispetto ai vari scenari analizzati, l'incremento delle temperature medie ed estreme si va rafforzandosi, comportando di conseguenza un incremento sia nella frequenza che nella durata delle ondate di calore. La combinazione estrema di temperatura e umidità intensifica il fenomeno delle ondate di calore, che rappresentano uno dei segnali più evidenti del cambiamento climatico in Italia. Inoltre, le temperature estreme, combinate con la riduzione delle precipitazioni causano periodi di siccità molto più lunghi.
Per un'analisi sistemica degli estremi di temperatura è stato preso in considerazione l'*indicatore giorni di freddo intenso* FD, in uno scenario RCP 4,5 per il periodo di riferimento 2021-2050: già da questa mappa [Fig. 2.15] si evince un significativo incremento della temperatura su tutto il territorio nazionale.
Nell'ultimo decennio le notti e i giorni freddi sono stati quasi sempre inferiori alla media climatologica 1991-2020, mentre le notti e i giorni caldi sono stati quasi sempre superiori alla media. Nel 2021, la Calabria ha registrato 28 periodi di caldo intenso, seguita dalla Puglia (25 periodi), Campania (24,5), Abruzzo e Basilicata (24).

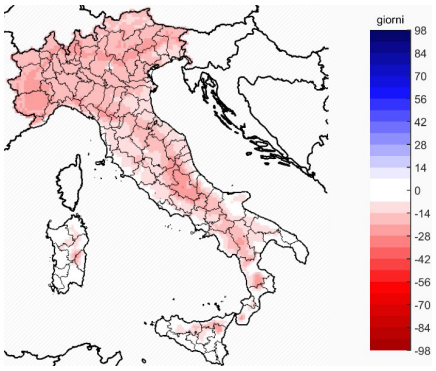


Fig. 2.15. Proiezioni climaticEstremi di temperatura calcolati attraverso l'indice giorni di freddo intenso per l'Italia nello scenario RCP 4,5, periodo 2021-2050

Al fine di esplicitare meglio le analisi fin qui condotte, attraverso la mappa del rischio climatico delle città italiane[41] messa a disposizione da Legambiente, si sono analizzate per l'anno 2022 le temperature estreme in città: sono state registrate 8 temperature estreme in 8 città diverse. A Palermo il 17 agosto è stata registrata la temperatura record di 44°C anche a causa del vento di scirocco, mentre nella parte settentrionale dell'Italia, sia a Brescia che a Cremona, i sistemi di monitoraggio hanno registrato i 39,5°C, nelle giornate del 23 e 24

luglio. Le città sono e saranno sempre più calde. Da questi dati, si deduce che le ondate di calore non si verificano soprattutto e soltanto al Meridione, ma anche il Settentrione è oggetto di variazioni anomale.
L'andamento riscontrato in Italia risulta in linea con quanto osservato in Europa e documentato negli ultimi report dell'IPCC: nel prossimo futuro si prevede un ulteriore aumento nel numero e nell'intensità delle ondate di calore, dovuto al continuo aumento della temperatura. Secondo quanto sostenuto dal *Copernicus european health*[42], nel periodo 2021-2050, il numero di giorni di ondate di calore salirà in media tra il 370 e il 400%, con un ulteriore aumento nel periodo 2050-2080 fino a 1100%. Si può affermare che la situazione appena descritta, potrà causare maggiori impatti per gli scenari che non includono consistenti interventi di contenimento del riscaldamento globale [ISPRA, 2020].

Precipitazioni intense
Definizione: Quando si concentra una considerevole quantità di acqua in breve tempo su aree relativamente ristrette, può quindi dare luogo a precipitazioni di forte intensità che si verificano a carattere estremamente irregolare e discontinuo sul territorio. Quando gli eventi di forti precipitazioni presentano elevata intensità e breve durata possono essere spesso associati ad eventi convettivi [Cipolla, et al., 2020]. Per le loro caratteristiche, soprattutto quando colpiscono piccoli bacini con bassi tempi di concentrazione, possono provocare inondazioni improvvise [Forestieri, et al., 2016].

Dagli scenari climatici, precedentemente analizzati, risulta un drastico calo per il regime delle precipitazioni. Al fine di rendere ancora più chiara la situazione delle precipitazioni, si prende in considerazione l'indice *95° percentile delle precipitazioni* R95p, che rappresenta la somma nell'anno delle precipitazioni giornaliere superiori al 950 percentile della distribuzione delle precipitazioni giornaliere nei giorni piovosi nel periodo climatologico 1981-2010. Studiando lo scenario RCP 4,5 per il periodo di riferimento 2021-2050 [Fig. 2.16], si nota un trend in calo su tutto il territorio nazionale.
Questo dato mette in evidenza che le precipitazioni sono aumentate di intensità. In effetti, l'indice che viene utilizzato per rappresentare le precipitazioni molto intense è il numero di giorni di pioggia intensi, *Number of severe rain days* R50mm, che rappresenta il numero di giorni dell'anno in cui la precipitazione totale giornaliera supera o è uguale a 50 mm. Nel 2021, per più della metà delle regioni italiane i giorni di precipitazione molto intensa non differiscono dalla mediana climatica [Fig. 2.17] (calcolata per il periodo di riferimento 1981-2010). Un aumento si osserva nelle Marche, in Campania e in Calabria e in misura minore in Friuli-Venezia Giulia, mentre valori negativi si concentrano nel Nord, con un minimo di -1,5 giorni in Piemonte [ISTAT, 2022].

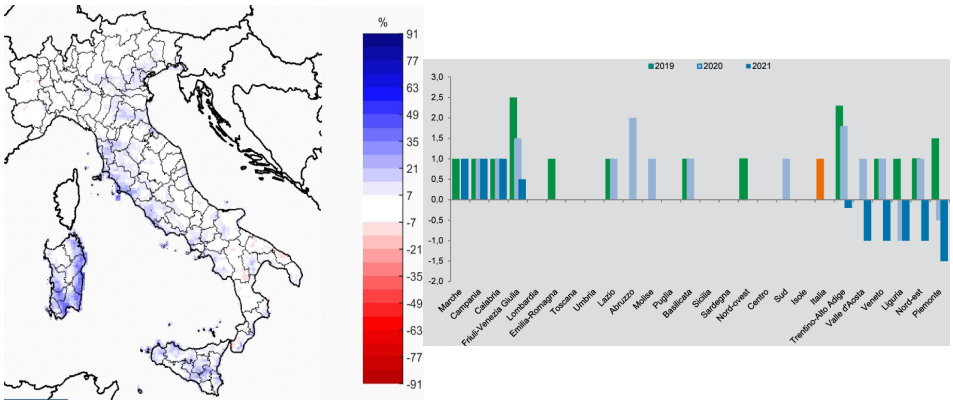


Fig. 2.16. Estremi di precipitazione calcolati attraverso l'indice R95p per l'Italia nello scenario RCP 4,5, periodo 2021-2050

Fig. 2.17. Indice di precipitazioni molto intense (R50mm): scarti dalla mediana climatica (periodo di riferimento 1981-2010) per regioni e ripartizione geografica. Anni 2019-2021

Secondo il rapporto 2021 dell'Osservatorio di Legambiente CittàClima, *'tra il 2010 ed il 2021, sono avvenuti 352 casi di allagamenti da piogge intense (su 486 totali) e 94 esondazioni fluviali (su 134 totali). La tendenza ormai consolidata degli ultimi eventi rilevanti è di una maggiore frequenza ed intensità dei fenomeni meteorologici estremi, spesso rapidi, seguiti da periodi più lunghi di siccità'* [Legambiente, 2021, pag. 21].
Di solito, alle precipitazioni intense, sono associati eventi disastrosi come alluvioni e frane. Le precipitazioni intense contribuiscono a un ulteriore aumento del rischio idraulico per piccoli bacini e del rischio associato a fenomeni franosi superficiali nelle aree con suoli con maggior permeabilità. La mappa interattiva di *Legambiente*[43], riporta ben 68 episodi di allagamenti da piogge intense nel 2022. Il record di precipitazioni, rispetto agli ultimi 10 anni con 420 mm di pioggia in 7 ore si è registrato con l'alluvione delle Marche, avvenuta il 16 settembre. Il numero delle frane (avvenute nel periodo estivo compreso tra luglio e settembre) nel 2022 risulta pari a 7, di cui 3 in Lombardia.
In base a quanto riportato, si prospetta nel futuro un incremento dei periodi senza pioggia e un aumento di eventi di precipitazione intensa.

Altri fenomeni estremi

Oltre alle ondate di calore, le precipitazioni intense, in Italia, si stanno verificando più frequentemente i cosiddetti *Medicane*[15] (con potenziale simile ad un uragano di categoria 1), ossia una sorta di "uragani del mediterraneo", che si formano quando una bassa pressione viene alimentata dalle acque calde del Mediterraneo e sviluppa caratteristiche da tempesta tropicale. Diversi studi mostrano una tendenza crescente di Medicane più forti nel prossimo futuro soprattutto nelle regioni con clima più caldo che può causare l'insorgenza di questi eventi disastrosi di forte intensità e frequenza [Koseki, et alii, 2021]. L'aumento in frequenza ed in intensità è strettamente legato all'aumento delle temperature (con un alto tasso di umidità) vista la maggiore differenza termica tra le acque e la terraferma, sviluppando temporali, piogge a carattere torrenziali e venti forti.
Temporali molto forti accompagnati da grandinate diffuse e raffiche di vento, possono generare anche trombe d'aria (n° 69 nel 2022). In Italia, oltre alla Pianura Padana e alle conche prossime alle Alpi, si possono verificare in tutte le zone pianeggianti, i litorali (quello Laziale in modo particolare), ma non sono esenti anche le zone appenniniche. Le trombe marine invece, si possono formare in tutto il Mediterraneo che, per sua natura di Mare quasi chiuso, in estate tende a riscaldarsi molto in superficie.

In conclusione, il cambiamento climatico sta provocando eventi meteorologici estremi come cicloni tropicali, innalzamento del livello del mare, siccità, ondate di calore o una combinazione di tutti questi eventi sempre più frequente.
Per questi motivi, la valutazione della variazione in frequenza, intensità e persistenza dei fenomeni estremi qui riportati, risulta cruciale per la definizione di soluzioni (anche predittive e trasformative) rispetto ai cambiamenti e alla variabilità del clima nella Regione Mediterranea.
Un aspetto critico e limitante nella stima quantitativa degli estremi climatici è dovuto non solo alla disponibilità dei dati di monitoraggio su serie temporali trentennali ma anche alle diverse tipologie di indicatori che, sebbene danno differenti informazioni sulla variabilità dei cambiamenti climatici nella Regione Mediterranea, dall'altro non facilitano la misurazione degli impatti comportano una lettura non univoca dei dati disponibili.

2.2.2 Spagna: scenari climatici futuri rispetto a temperatura, precipitazioni, umidità, vento

"Il 2020 è stato un anno estremamente caldo in Spagna: la temperatura media di 14,8°C è stata di 1°C superiore alla media annuale del periodo di riferimento 1981-2010" [AEMET, 2021, p. 6]

Caratteristiche generali del clima

La Spagna è caratterizzata da una forte variabilità climatica[44], dovuta alla posizione geografica e alla particolare conformazione del territorio. Vengono individuate tre zone climatiche principali: clima mediterraneo, caratterizzato da estati secche e calde, il clima steppico dove la stagione secca si estende oltre l'estate e il clima atlantico caratterizzato da molte più precipitazioni in estate.

Attraverso il Portale *Agencia Estatal de Meteorología* AEMET (che supporta lo sviluppo di politiche di adattamento studiando la sensibilità al clima in diverse attività per la valutazione delle alternative politiche, lavorando insieme al Ministero per la Transizione Ecologica e la Sfida Demografica) si riportano le mappe delle previsioni climatiche future della Spagna.

Scenari climatici futuri: Temperatura

Prima di analizzare gli scenari futuri è utile riportare il quadro climatico della Spagna per l'anno 2021. Nel Rapporto sullo stato del clima in Spagna dell'anno 2021 [AEMET, 2021], è stato indicato che il 2021 è stato molto caldo, con una temperatura media nella Spagna continentale di 14,2 ºC, 0,5 ºC [Fig. 2.18] al di sopra del valore medio annuo (periodo di riferimento 1981-2010. È stato il decimo anno più caldo dall'inizio della serie nel 1961 e l'ottavo più caldo del 21° secolo nel nostro paese; Inoltre, è stato l'ottavo anno consecutivo con una temperatura media annuale superiore al valore medio.

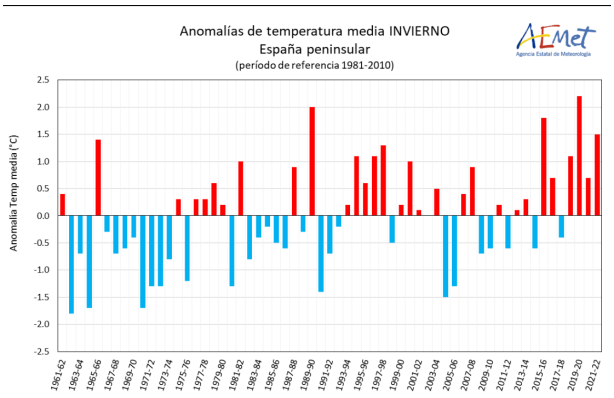


Fig. 18. Anomalia della temperatura media annuale

Le anomalie della temperatura si sono registrate in inverno 2020-2021, con una temperatura media sulla Spagna continentale di 7,1ºC, superiore di 0,7ºC alla media di questo periodo (le temperature più alte nei principali osservatori sono state osservate negli ultimi giorni di gennaio, con i 29,8 ºC registrati ad Alicante).

La primavera è stata piuttosto calda, con una temperatura media sulla Spagna continentale di 12,5ºC, superiore di 0,4 ºC alla media di questa stagione; mentre le temperature più alte dell'estate sono state osservate durante l'ondata di calore di metà agosto: tra gli osservatori principali di Alcantarilla/base aerea si è registrato il valore di 47,0 ºC, i 46,9 ºC a Córdoba/aeroporto, i 46,2 ºC a Murcia e i 46,0 ºC a Granada/aeroporto.

Le proiezioni costruite dall'AEMET, per misurare la variabilità climatica rispetto la temperatura, considerano tre scenari RCP 4.5, RCP 6.0 e lo scenario RCP 8.5. Il grafico della temperatura massima annuale indica che questa potrebbe aumentare di 6°C fino all'anno 2100 rispetto il peggior scenario climatico RCP8.5; gli scenari RCP 4.5 e RCP 6.0 prevedono un aumento della temperatura intorno ai 2°C [Fig. 2.19]. Un indicatore utilizzato nella previsione dei dati climatici futuri sull'innalzamento delle temperature è il *numero dei giorni caldi*, che si possono approssimare al 50% dei giorni caldi annuali, rispetto il peggior scenario climatico RCP 8.5 [Fig. 2.20].

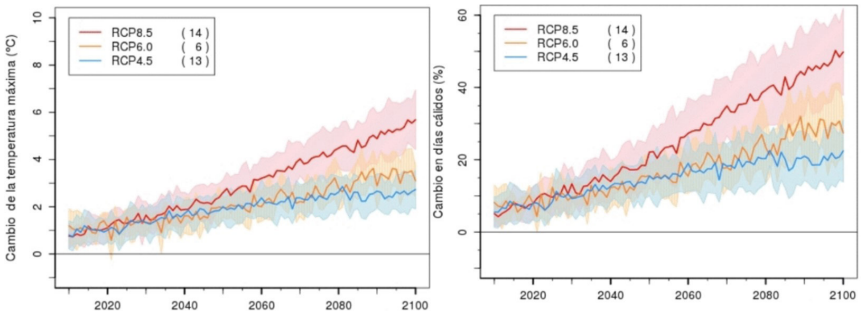


Fig. 2.19. Proiezioni temperatura massima annuale, scenari RCP 4.5, RCP, 6.0 e RCP 8.5

Fig.2.20. Proiezioni della variazione del numero dei giorni caldi, scenari RCP 4.5, RCP, 6.0 e RCP 8.5

Scenari climatici futuri: Precipitazioni

L'anno 2021 è stato secco in termini di precipitazioni, con un valore medio delle precipitazioni sulla Spagna continentale di 569 mm, l'89% del valore normale per il mese (periodo di riferimento: 1981-2010). Era il quattordicesimo anno più secco dall'inizio della serie nel 1961 e l'ottavo nel ventunesimo secolo [Fig. 2.21].

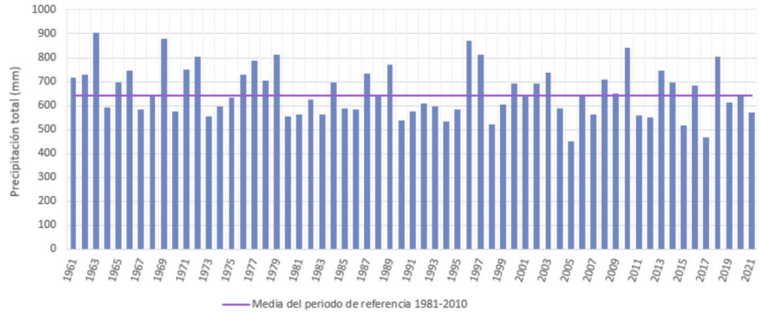


Fig.2.21. Serie di precipitazioni medie annue per la Spagna peninsulare a partire dal 1961

In inverno, le precipitazioni sono state superiori alla media nella maggior parte delle zone nord-occidentali e centrali del Paese, con quantità accumulate superiori al valore medio di oltre il 50%. Le precipitazioni giornaliere più elevate registrate negli osservatori principali si sono avute a Ceuta, dove sono stati misurati 134 mm il 5 marzo. In termini di precipitazioni totali accumulate nei mesi estivi, il più importante si distingue la stazione di Teruel, che ha registrato 222,0 mm accumulati nel trimestre, il valore più alto della serie. La stazione ha inoltre raggiunto il record di giorni di temporali registrati in estate, con 26 giorni di temporali. Riferendosi alle proiezioni sulle precipitazioni, rispetto il peggior scenario climatico RCP8.5, si registra una diminuzione della precipitazione di circa 15%, mentre per gli sce-

nari RCP 4.5 e RCP 6.0, si prevede un calo della precipitazione tra il 10-15% [Fig. 2.22]. Un aspetto interessante da sottolineare è la variazione del regime delle precipitazioni intense, dove si registra un aumento anche se irregolare, in tutti gli scenari considerati [Fig. 2.23].

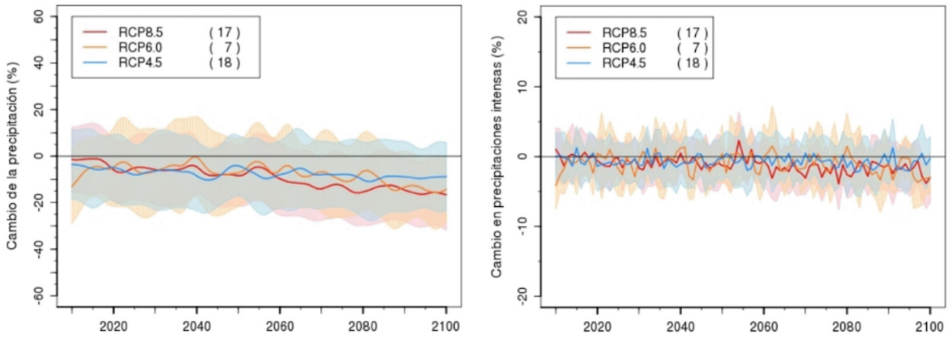


Fig. 2.22. Proiezioni della variabilità delle precipitazioni, negli scenari RCP 4.5, RCP 6.0 e RCP 8.5

Fig. 2.23. Proiezioni della variabilità delle precipitazioni intense, negli scenari RCP 4.5, RCP 6.0 e RCP 8.5

Scenari climatici futuri: Velocità del Vento

L'AEMET mette a disposizione le proiezioni sulla velocità del vento, considerando due scenari RCP 4.5 e RCP 8.5. Per lo scenario RCP 8.5 [Fig. 2.24 (a, b)] (periodo di riferimento 2046-2065 e 2081-2100), si prevede un aumento di più di 10 m/s, anche se questo aumento è altamente incerto.

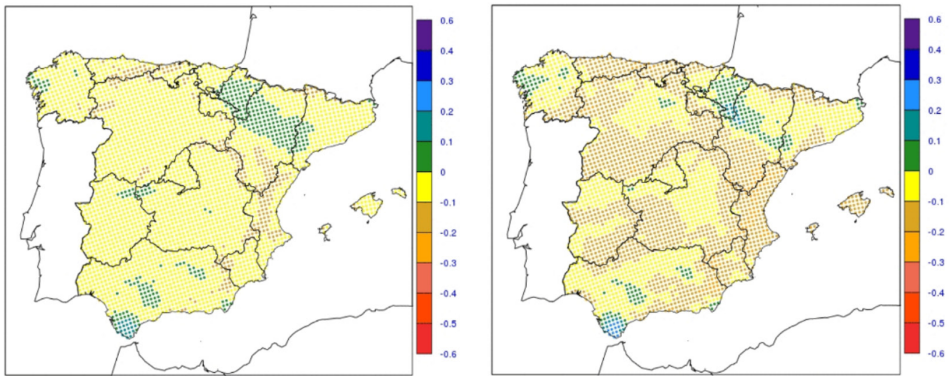


Fig. 2.24. Proiezioni della velocità del vento, nello scenario RCP 8.5:
a) periodo di riferimento 2046-2065;
b) periodo di riferimento 2081-2100)

I modelli regionali EURO-CORDEX non mostrano significativi cambiamenti di consenso nel valore di ritorno a 50 anni della velocità giornaliera del vento e, in termini generali, il cambiamento previsto per tutte le stazioni e i periodi oscilla intorno a 0 m/s, con valori positivi e negativi [Sanz, & Galán, 2021]. In alcuni casi (ad esempio l'inverno per il periodo 2071-2100 o l'autunno per i periodi 2011-2040 e 2041-2070) si prevede un aumento di oltre 10 m/s, sebbene tale aumento sia altamente incerto.

Scenari climatici futuri: Umidità

Per le proiezioni sull'umidità relativa, viene preso in considerazione lo scenario intermedio di emissioni A1B, che mostra una tendenza alla diminuzione di circa -5%. Dal grafico [Fig. 2.25], si può notare che gli scenari di emissione A1B e A2 (scenario di emissione alto) ten-

dono ad avere effetti simili nella tendenza negativa dell'umidità relativa tra il -5% e il -10% entro la fine del XXI secolo. La diminuzione è in linea con i dati climatici futuri rispetto alla tendenza negativa stimata per il calo delle precipitazioni, maggiore nei mesi estivi piuttosto che in quelli invernali [Mestre Guillén, et al., 2015].

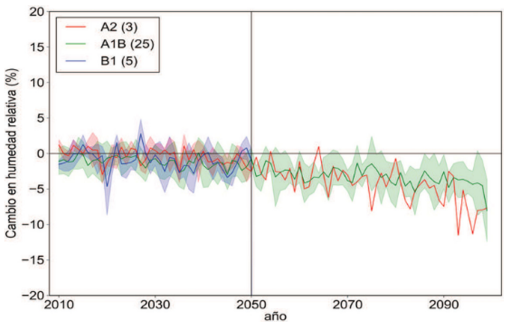


Fig.2.25. Proiezioni dell'evoluzione dell'umidità relativa, per gli scenari di emissione A2, A1B, B1

Intensificazione dei fenomeni estremi

È assodato che Il cambiamento climatico comporta anche cambiamenti nella frequenza e gravità di eventi estremi come ondate di calore, siccità, piogge torrenziali e inondazioni, forti venti o mareggiate. L'aumento di questi fenomeni meteorologici a causa del cambiamento climatico potrebbe far sì che questi eventi estremi, in Spagna, diventino sempre più frequenti entro la fine del secolo.
Ad esempio, le ondate di calore saranno più lunghe, più frequenti e di maggiore intensità, con questi incrementi più pronunciati nello scenario delle emissioni più elevate (RCP8.5) e alla fine del 21° secolo. Allo stesso modo, è previsto un aumento del numero di notti calde e una diminuzione del numero di notti fredde. In particolare nella penisola iberica, si prevede che i periodi di siccità diventino più frequenti, con un rischio crescente di desertificazione in varie aree.
La costruzione di un quadro di eventi estremi costituisce uno dei punti di partenza essenziali per valutare le esigenze future di adattamento ai cambiamenti climatici.
La valutazione di alcuni indici estremi associati alla temperatura massima e alle precipitazioni è avvenuta attraverso la piattaforma AdapteCCa. Gli scenari che possono essere simulati sono RCP 4.5 e RCP 8.5 riferiti ai periodi 2011-2040 (Futuro cercano), 2041-2070 (Futuro medio) e 2071-2100 (Futuro lejano).

Ondate di calore
Secondo il rapporto annuale del clima del 2021 [AEMET, 2021], si sono registrate due ondate di calore nella Penisola Iberica e nelle Isole Baleari e tre nelle Isole Canarie.
Le temperature più alte del 2021 sono state osservate durante l'ondata di caldo di metà agosto, evidenziando tra i principali osservatori i 47,0 °C di Alcantarilla/base aerea il 15, i 46,9 °C di Córdoba/aeroporto il 14, i 46,2 °C a Murcia il 15 e 46,0 °C a Granada/aeroporto il 14.
Tra gli estremi legati alla temperatura massima, sono stati selezionati, sulla piattaforma AdapteCCa, due indici estremi: il numero di giorni caldi e la durata massima delle ondate di calore, calcolati per gli scenari RCP 4.5 e RCP 8.5.
Un giorno caldo è solitamente definito come un giorno la cui temperatura massima supera il 90° percentile delle temperature massime di quel giorno nel periodo di riferimento, ottenuto da una finestra di 5 giorni centrata su quel giorno.

Entro la fine del secolo, la percentuale di giorni caldi dovrebbe aumentare di quasi il 50% (tra il 34% e il 58%) per lo scenario più emissivo RCP 8.5 [Fig. 2.26], mentre per lo scenario di stabilizzazione RCP4.5 questo aumento dovrebbe essere di circa il 24% (tra il 14% e il 31%) [Fig. 2.27], con un aumento dell'incertezza delle stime nel corso del secolo.

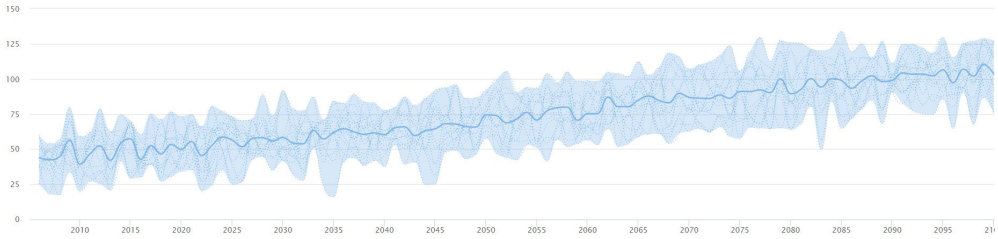


Fig. 2.26. Numero dei giorni caldi nello scenario di emissione RCP 8.5

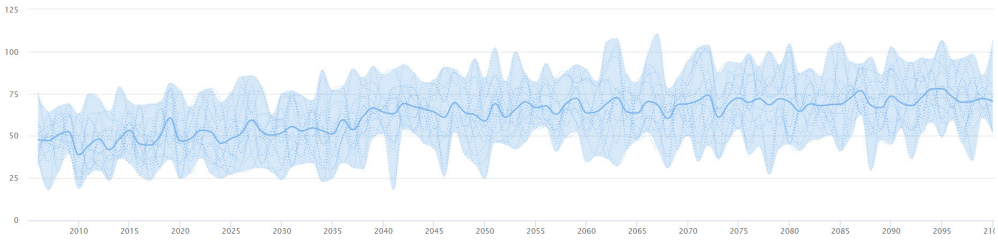


Fig. 2.27. Numero dei giorni caldi nello scenario di emissione RCP 4.5

Questi andamenti sono coerenti con gli scenari climatici sull'evoluzione della temperatura analizzati precedentemente.
Per quanto riguarda la durata dell'ondata di calore, questa è definita come la durata del periodo più lungo di giorni caldi consecutivi, purché sia maggiore o uguale a cinque.
Tutte le proiezioni e le tecniche di regionalizzazione concordano sul fatto che le ondate di calore saranno più lunghe, con un aumento più pronunciato nello scenario più emissivo RCP8.5 e alla fine del XXI secolo [Fig. 2.28], con un numero minimo di 26 giorni.
Nello scenario RCP 4.5, si registra un numero minimo di 13 giorni rispetto la durata massima dell'ondata di calore [Fig. 2.29].

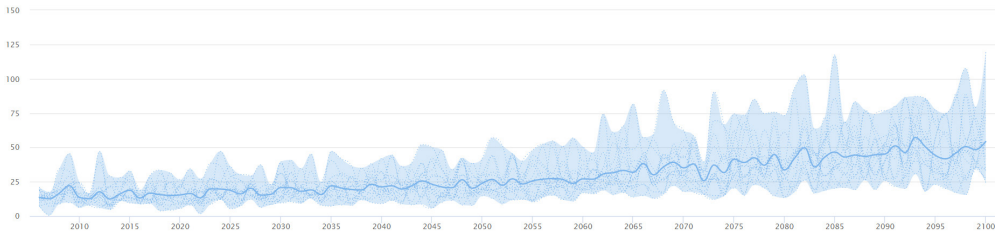


Fig.2.28. Durata massima dell'ondata di calore nello scenario di emissione RCP 8.5

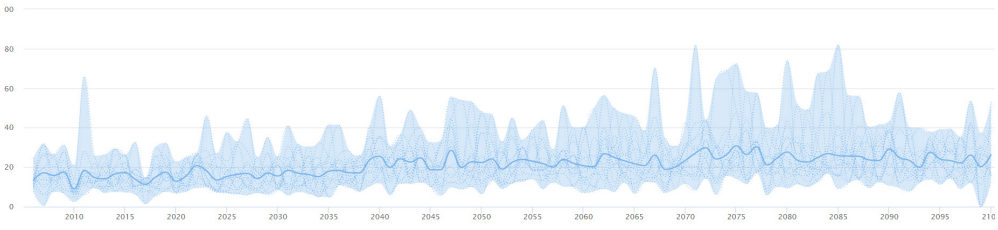


Fig. 2.29. Durata massima dell'ondata di calore nello scenario di emissione RCP 4.5

La maggiore dispersione nell'entità della loro variazione tra le proiezioni, in parte indotta dalle tecniche di regionalizzazione, si traduce in un aumento della gamma di valori probabili per la fine del secolo, dove, in media, la durata dell'ondata di calore più lunga sarebbe da 15 a 50 giorni più lunga della sua media [Amblar, et al., 2021].
Ad avvalorare tali scenari, le proiezioni per la temperatura massima estrema (calcolate sulla piattaforma AdapteCCa) prevedono per lo scenario RCP 4.5 un valore compreso tra i 36°C e i 37°C, mentre per lo scenario RCP 8.5 la temperatura massima estrema potrà raggiungere i 40°C, entro la fine del secolo.

Precipitazioni intense
L'innalzamento delle temperature negli ultimi decenni descritto nei punti precedenti è strettamente correlato alle variazioni di alcune componenti del ciclo idrologico e dei sistemi idrologici, tra cui l'aumento dell'evaporazione e l'aumento del vapore acqueo atmosferico e, di conseguenza, un maggiore potere di rilascio calore latente quando si sviluppano i fenomeni convettivi presenti in situazioni di piogge torrenziali autunnali e di fine estate.
Per quanto riguarda il cambiamento dei modelli delle precipitazioni e la maggiore torrenzialità nell'area mediterranea, diversi studi recenti indicano un aumento della frequenza e dell'intensificarsi di situazioni che causano piogge molto abbondanti o torrenziali e di estensione significativa in tutto il Mediterraneo spagnolo [Mirò, et al., 2018].
Secondo il rapporto annuale del clima del 2021 [AEMET, 2021], tra i valori massimi di precipitazione giornaliera registrati in un osservatorio principale nell'anno 2021, spiccano i 134 mm registrati a Ceuta il 5 marzo, i 125 mm di Tortosa il 22 novembre, un valore che costituisce un nuovo massimo assoluto di precipitazione giornaliera in questa stazione dall'inizio della serie nel 1920, e i 101 mm di Hondarribia il 9 dicembre e i 95 mm di Daroca registrati il 1° settembre.
Per l'analisi sulle precipitazioni intense, è stato preso in considerazione l'indice estremo quale: numero di giorni con pioggia, calcolato attraverso AdapteCCa negli scenari RCP 4.5 e RCP 8.5. Nello scenario RCP 8.5 si registrano in media 65 giorni con pioggia, nel periodo di tempo 2041-2070; mentre nel periodo 2071-2100, la media scende a circa 60 giorni di pioggia [Fig. 2.30].

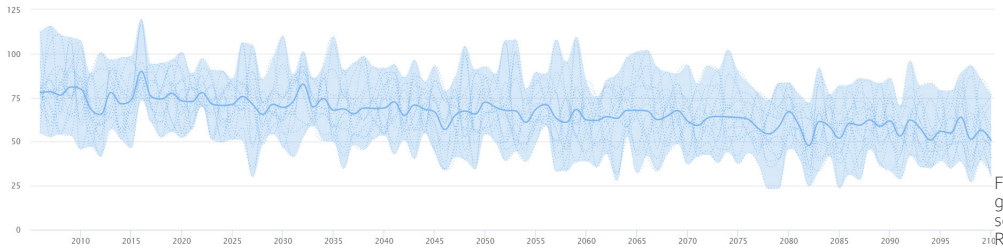


Fig. 2.30. Numero di giorni con pioggia nello scenario di emissione RCP 8.5

Una ricerca che analizza le precipitazioni estreme nella penisola iberica, secondo gli scenari RCP 8.5, mostra risultati coerenti con un impatto elevato derivato, da un lato, da una desertificazione per l'assenza di piogge e, dall'altro, una maggiore presenza di precipitazioni torrenziali, soprattutto durante l'autunno e l'inverno nel Mediterraneo e nella valle dell'Ebro [Cardoso Pereira, et al., 2020].
Nello scenario RCP 4.5, si registrano in media 68 giorni con pioggia, nel periodo di tempo 2041-2070; mentre nel periodo 2071-2100, la media sale a circa 73 giorni di pioggia [Fig. 2.31].Questo aumento indica che la maggior parte delle precipitazioni proviene da eventi estremi.

Queste variazioni, che portano a più energia e vapore acqueo disponibile nell'atmosfera, possono portare a precipitazioni torrenziali più intense quando si verifica una situazione meteorologica simile a quella che è probabilmente già in atto.

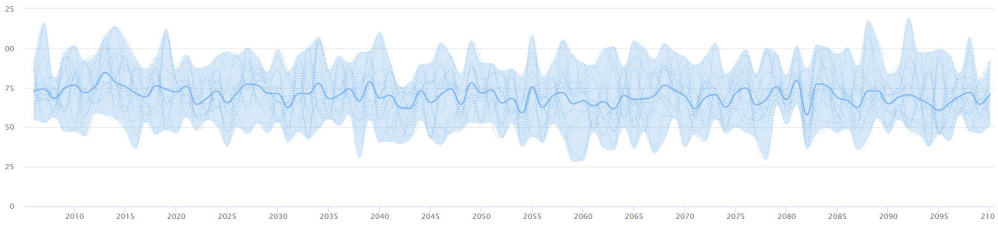


Fig. 2.31. Numero di giorni con pioggia nello scenario di emissione RCP 4.5

Per quanto riguarda l'evoluzione delle precipitazioni intense, c'è un alto grado di incertezza sulla sua evoluzione futura. Tali dati sono soggetti ad un elevato grado di incertezza determinato e rafforzato dalle caratteristiche geografiche e climatiche del territorio.
La Spagna presenta una distribuzione spaziale e temporale delle precipitazioni molto eterogenea, molto più pronunciata che in altri paesi, a cui si unisce una straordinaria variabilità nel tempo dei parametri climatici. A livello locale, le riduzioni relative più importanti sono attese in inverno, nei bacini idrografici del sud e del Levante e nei due arcipelaghi.
Quasi tutti i modelli prevedono riduzioni delle precipitazioni per la primavera e l'autunno e l'intensificazione delle precipitazioni intense, ma uno studio sottolinea le incertezze dei modelli climatici nella proiezione dei futuri cambiamenti delle precipitazioni per gli anni 2050, dovuto all'uso di intervalli di 30 anni, portando alla conclusione che tali intervalli sono troppo brevi per essere utilizzati in condizioni di variabilità annuale come si trova nella penisola iberica [Guerreiro, et al., 2016].

Altri fenomeni estremi

La Spagna è stata in una situazione di ondata di caldo per 26 giorni nell'estate del 2022, diventando la seconda estate con il maggior numero di giorni in questa situazione fino ad oggi, superata solo dall'estate del 2015, con 29 giorni di ondata di caldo. Questi aumenti di temperatura sono associati a un'intensificazione e a una maggiore frequenza delle ondate di calore marine [Darmaraki, et al., 2019].
L'insolita persistenza delle alte temperature, insieme alla diminuzione delle precipitazioni, favorisce lo sviluppo di precipitazioni sotto forma di tempeste che possono raggiungere intensità molto forti o addirittura torrenziali, ed essere accompagnate da grandine.
Tuttavia, questi eventi, da soli, non aiutano a diminuire il pericolo della siccità e, in altri casi quando l'umidità relativa è molto bassa (soprattutto negli episodi di ondata di calore) possono portare a eventi dannosi, come gli incendi boschivi. Nel gennaio 2020, la tempesta Gloria ha colpito la Spagna, caratterizzata da venti che hanno sfiorato i 130 chilometri orari di velocità causando violente mareggiate sulle zone costiere.
Questa tempesta, definita storica, ha battuto il record di precipitazioni straordinarie (3 giorni consecutivi di precipitazioni estreme), superando i 300 l/mq. Insieme a Gloria, spicca l'episodio di inizio novembre 1987, considerato l'evento con la maggiore piovosità del XX secolo nelle zone di Alicante e Valencia (817 mm a Oliva e 720 mm a Gandía).
Nel novembre 2020, in un altro episodio di tempesta, ad Alginet si è registrata la massima precipitazione accumulata con 426,9 l/mq. Un'intensa corrente di vento umido e instabile insieme alle precipitazioni di intensità torrenziale ha generato un temporale, con intervalli di forza del vento da nord-est 7 e mare agitato, con onde che superavano i 3 metri.

I dati VAD (Velocity Azimuth Display) del radar di Valencia, hanno registrato una velocità del vento pari a 40 nodi. Date le enormi ripercussioni e gli impatti sulla società causati dalle recenti tempeste estreme di pioggia nel Mediterraneo, risulta un argomento rilevante su cui indagare nel prossimo futuro.
Altri studi stimano i cambiamenti futuri di fenomeni estremi come i cicloni tropicali, noti come 'Medicanes' caratterizzati da venti tra 110 km/h e 170 km/h [Romero, & Emanuel, 2017].
La figura [Fig. 2.32] mostra la cronologia dei fenomeni metereologici e climatici estremi che si sono verificati in Spagna durante il corso dell'anno 2020.

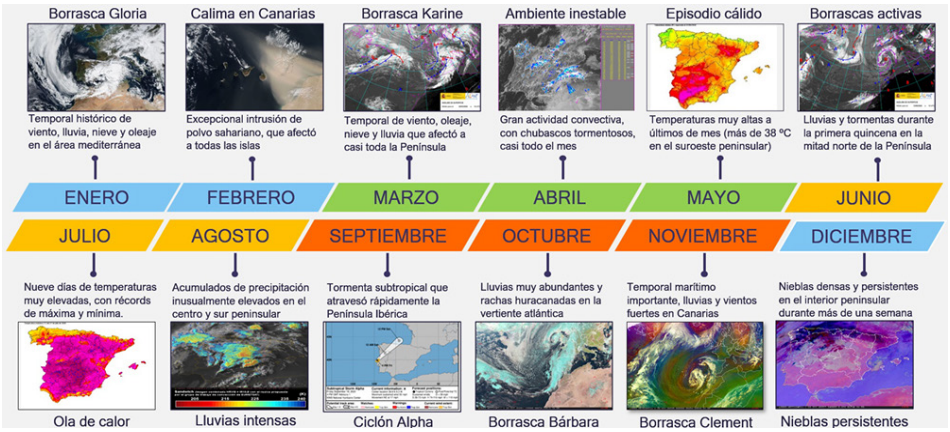


Fig. 2.32.Cronologia degli eventi estremi che si sono verificati in Spagna durante il corso dell'anno 2020.

Come per l'Italia, anche in Spagna, gli andamenti riscontrati agli estremi delle distribuzioni delle precipitazioni indicano un aumento della frequenza e dell'intensificarsi di situazioni che causano piogge molto abbondanti o torrenziali e di notevole estensione nell'intero Mediterraneo spagnolo. Questi estremi possono causare allagamenti, inondazioni e alluvioni; a questi si aggiunge che, negli ultimi 30 anni, il numero effettivo di registrazioni giornaliere di alta temperatura è molto superiore ai valori pre-industriali, registrando l'intensificazione del fenomeno ondata di calore.
A tal proposito, l'AEMET mette a disposizione i grafici di evoluzione, secondo modelli statistici, della durata dell'ondata di calore rispetto alle differenti aree geografiche che identificano la Spagna. Nello specifico per la *Comunidad de Madrid*, in uno scenario RCP 8.5, la durata dell'ondata di calore potrebbe superare i 25 giorni entro la fine del secolo; mentre in uno scenario intermedio RCP 4.5, la durata potrebbe approssimarsi a 10 giorni.
Sebbene i risultati di questi modelli climatici esplicitano impatti negativi futuri, risulta evidente l'urgenza di azioni di adattamento e mitigazione alle varie scale della progettazione, in modo tale da prevenire effetti ancora più devastanti sulla città, quindi sull'ambiente costruito a causa della variabilità imprevedibile del clima.

2.3 Valutazioni critiche: Quadro di confronto

> "Per stimare molti estremi, come i massimi giornalieri di temperatura e gli eventi di precipitazione intensa, è necessariauna risoluzione giornaliera o, in modo ottimale, oraria"
> [Lionello, et al., 2012, p. liii]

La Comunità scientifica è concorde nell'affermare che, la velocità con la quale i fenomeni climatici si stanno verificando, porterà conseguenze mai sperimentate nelle epoche stori-

che, specialmente rispetto al verificarsi di episodi di eventi estremi sempre più frequenti.

Lo scenario tracciato dalle proiezioni climatiche rileva che la Regione Mediterranea e, nello specifico, l'Italia e la Spagna, dovrà affrontare un aumento della temperatura superiore alla media globale, con ondate di caldo sempre più prolungate e un maggior numero di notti tropicali e una diminuzione delle precipitazioni (durante l'autunno e l'inverno) con intensificazione di eventi di pioggia estremi.
Sembra ormai assodato che questa maggiore intensità e frequenza dei fenomeni estivi avversi, specie quelli legati alle ondate di calore o all'innalzamento della temperatura dell'acqua di mare, si stia già verificando e, almeno per quanto riguarda la Regione Mediterranea, vi è anche un aumento della frequenza e dell'intensificarsi di situazioni che causano piogge molto abbondanti o torrenziali e di notevole estensione.
Nel contesto geoclimatico mediterraneo, il mare svolge un ruolo fondamentale come regolatore del sistema climatico attraverso le interazioni mare-atmosfera, come gli scambi energetici e di umidità [Pastor, et alii, 2020]. Sebbene in questo studio, non è stata trattata la problematica relativa all'innalzamento della temperatura del mare, appare importante sottolineare che l'eccesso di calore atmosferico potrebbe causare un aumento del livello del mare di 3 cm al decennio, con conseguenze prevedibili sull'erosione costiera e sulle inondazioni.

In questo contesto, l'attenzione si concentra sull'individuazione dei parametri climatici da controllare, al fine di indirizzare strategie e soluzioni tecniche/tecnologiche che possano mitigare gli impatti dovuti al cambiamento climatico nella Regione Mediterranea e, allo stesso tempo, declinare nuovi indicatori che possano facilitare la lettura dei fenomeni del cambiamento climatico e gli impatti ad essi associati.
Anche se è difficile fornire una mappatura esatta di tutti i possibili impatti dei cambiamenti climatici, questa sezione intende fornire una breve sintesi di confronto relativa alla variabilità climatica e all'intensificazione dei fenomeni estremi in Italia e in Spagna.
L'approfondimento del ruolo del cambiamento climatico e la sua possibile relazione con l'aumento del numero di eventi estremi, tra cui ondate di calore e precipitazioni intense e intensificazione del carico da vento, è il tema centrale su cui si innestano gli studi della ricerca.

In particolare, gli scenari mostrano che fino al 2100 ci si attende un aumento di temperatura che in alcune aree può superare i 3 gradi, che è molto di più degli 1,5 gradi a cui punta l'Accordo vincolante di Parigi sottoscritto nel 2015. Dai grafici della temperatura sopra analizzati, sia l'Italia che la Spagna, saranno sottoposte a temperature ben più alte; infatti, senza alcun controllo delle emissioni di gas serra, le proiezioni di temperatura mostrano un aumento pronunciato nei massimi, che può raggiungere i 6°C nel periodo 2071–2100 e nello scenario RCP 8.5 (mentre per la temperatura minima, questo aumento è compreso tra 2°C e 5°C).
Per quanto riguarda lo scenario RCP 4.5, i diversi modelli climatici sono concordi nel prevedere un aumento fino a 2°C nel periodo 2021-2050 sia per l'Italia che per la Sagna.
Da letteratura, l'innalzamento della temperatura superficiale dell'aria combinato con l'aumento dell'umidità determinano un livello ancora maggiore dell'indice di calore (una misura degli effetti combinati di temperatura e umidità) [Cubasch, et al., 2001].
Il riscaldamento, che sta già provocando un aumento delle temperature estreme, aumenta l'incidenza degli eventi di caldo estremo: le ondate di calore saranno più lunghe e più frequenti e di maggiore intensità, nello scenario delle emissioni più elevate RCP 8.5 entro la fine del XXI secolo, con anomalie delle temperature anche nelle stagioni autunnali e invernali.

Pertanto, il fenomeno delle ondate di calore (heat waves) colpirà in modo eterogeneo le due aree analizzate.
Nello specifico, attraverso le simulazioni condotte con il software di AdapteCCa e i dati messi a disposizione dall'Agenzia AEMET, il valore minimo della durata dell'ondata di calore si prevede da 13 giorni (scenario RCP 4.5) a 26 giorni (scenario RCP 8.5) fino ad arrivare ad un massimo di 50 giorni più lunga rispetto la sua media nella Spagna peninsulare.
A questi dati, si aggiunge un aumento dei giorni di caldo consecutivi.
Per questi motivi, una migliore conoscenza di questi impatti risulta cruciale per lo sviluppo di specifiche strategie che rispondano in modo puntuale alle condizioni climatiche della Regione Mediterranea.
Inoltre, i modelli climatici prevedono una consistente diminuzione delle precipitazioni nel corso del XXI secolo per l'intero bacino del Mediterraneo durante la stagione calda (da aprile a settembre, con la massima entità in estate) e in inverno per la maggior parte del Mediterraneo, ad eccezione per l'Italia, delle regioni più settentrionali (ad esempio, le Alpi), dove sono previste condizioni più umide. Le proiezioni climatiche future, costruite con la piattaforma di simulazione climatica DataClime, indicano uno spostamento predominante verso un regime di precipitazioni con una maggiore intensità e maggiori eventi estremi (soprattutto in inverno, primavera e autunno, ma non nelle aree meridionali), una diminuzione della frequenza delle precipitazioni e periodi di siccità più lunghi (soprattutto in estate e nei Paesi meridionali).
Quindi, si può affermare che precipitazioni e siccità estreme, combinate con l'innalzamento del livello del mare, contribuiranno ad aumentare i rischi di inondazioni ed erosione costiera e gli impatti potrebbero essere ancora più alti lungo le coste meridionali e orientali, dove i sistemi di monitoraggio sono limitati e la capacità di adattamento è generalmente inferiore rispetto al nord.
In Spagna, la piovosità potrebbe essere compresa tra il 15% e il 30% rispetto alle precipitazioni del periodo 1961-1990, ma le proiezioni delle precipitazioni mostrano una maggiore dispersione dei risultati, a causa della variabilità climatica calcolata nel breve periodo di tempo di 30 anni. Per queste ragioni, l'obiettivo è fornire un modello climatico regionale affidabile e preciso che possa costituire una solida base per future strategie di gestione del rischio e superare la carenza nella conoscenza e comprensione delle tendenze degli eventi piovosi estremi [Benabdelouahab, et al., 2020].

Da quanto analizzato, si evince che le aree analizzate, Italia e Spagna, mostrano problematiche climatiche e ambientali simili, dovute ad una conformazione geografica non uniforme nell'estensione delle due penisole, con climi differenti e con un'influenza significativa del Mar Mediterraneo in grado di determinare un equilibrio termico.
In generale, oltre all'innalzamento della temperatura, emerge anche una sostanziale modifica del regime delle precipitazioni, più complessa di quanto appaia per la temperatura. Sebbene le precipitazioni sono in tutte e due le aree analizzate in diminuzione, soprattutto nei periodi estivi, i valori estremi al contrario sembrano aumentare in termini di frequenza ed intensità.
Le conseguenze si riscontrano negli episodi di bombe d'acqua, alluvioni, inondazioni e micro-tifoni conosciuti come 'Medicane', cicloni formati nel Mediterraneo.
In estrema sintesi, si può affermare che nello scenario peggiore di lungo periodo (RCP 8.5), si prevede un innalzamento della temperatura tra i 5°C e i 6°C, una diminuzione delle precipitazioni intorno al 20% (nei mesi invernali e autunnali, si aggira intorno al 40%) con conseguenze anomale mai sperimentate prima.

Difatti, i risultati delle proiezioni costruite utilizzando le piattaforme DataClime per l'italia e AdapteCCa per la Spagna hanno permesso di evidenziare - per tutte e due le aree della

Regione Mediterranea- un intensificarsi degli eventi climatici estremi, soprattutto ondate di calore e precipitazioni intense, che rappresentano due fattori amplificatori degli impatti climatici sull'ambiente costruito e, in particolare, sull'involucro edilizio (a cui verrà dedicato il Cap.3). Alla variabilità e all'incertezza che questi eventi si possano verificare nel prossimo futuro nella Regione Mediterranea, si inserisce un 'elemento' che non è possibile studiarlo solo in funzione delle condizioni ambientali e climatiche: la risposta prestazionale e tecnologica dell'involucro edilizio rispetto la sua capacità di adattamento a questi eventi estremi.

L'involucro edilizio e, in particolar modo la tipologia di facciata continua, viene qui intesa come elemento vulnerabile agli effetti derivanti da eventi estremi, come l'aumento della temperatura e delle precipitazioni e di conseguenza più sollecitata dai flussi energetici esterni.
L'obiettivo della ricerca è quello di soddisfare le esigenze di migliorare le prestazioni delle facciate continue riducendo gli impatti derivanti dagli eventi estremi di cambiamento climatico, attraverso lo sviluppo di un metodo di valutazione prestazionale - risultato della ricerca - in grado di verificare le caratteristiche degli involucri edilizi in reazione a specifiche condizioni climatiche estreme.

Per mettere a punto degli scenari di simulazione e di sperimentazione applicativa, è stato necessario individuare ed analizzare un contesto climatico di riferimento.
Questa attività è importante per comprendere da un lato quali sono i parametri climatici da controllare in uno specifico contesto dall'altro, indirizzare delle soluzioni tecnologiche (per facciate continue) che garantiscano delle soglie prestazionali costanti e calibrate, non solo in risposta alla normativa di settore, ma agli scenari di cambiamento climatico di un dato contesto. Un altro aspetto da considerare riguarda il cambiamento di alcuni parametri climatici, che non solo rende inefficaci i regolamenti, le normative e gli strumenti di governo del territorio di cui disponiamo, ma più urgentemente svela l'incapacità dell'ambiente costruito nell'affrontare questo scenario di forte cambiamento e di grande incertezza.

In conclusione, gli scenari climatici costruiti sulla più recente letteratura sull'argomento e analizzati per l'Italia e la Spagna rappresentano quindi un punto di partenza essenziale per valutare i possibili impatti e le esigenze future di adattamento per gli involucri edilizi.
Visto che l'Italia e la Spagna dovranno affrontare le stesse problematiche climatiche (anche se l'ondata di calore sarà più accentuata in Spagna) e rispetto a tutti i possibili eventi estremi previsti nella Regione Mediterranea, le attività della ricerca si concentrano sulla definizione di una procedura di valutazione prestazionale attraverso sperimentazione applicativa e simulazione di una facciata continua rispetto agli effetti dell'innalzamento della temperatura con conseguente ondata di calore ed eventi di precipitazione estrema.
Inoltre, queste attività di analisi della ricerca intendono sottolineare che l'emergenza climatica della Regione Mediterranea non deve essere sottovalutata, ma migliorata attraverso strumenti scientifici che consentano di evidenziare quanto le città, o meglio il nostro ambiente costruito, sia altamente esposto agli eventi estremi attesi nei prossimi anni, con l'opportunità di indirizzare strategie e soluzioni concrete che possano mitigare i rischi.
In questo senso, si intende mettere in evidenza il 'nuovo ruolo dell'architetto-previsore', che può essere assistito da strumenti specializzati che derivano dalla simulazione e dal testing e che consentano in modo più efficace e diretto l'analisi di tali fenomeni estremi sull'involucro edilizio e rispetto un'area climatica di riferimento.
A tal proposito, nel capitolo successivo, l'attenzione si sposta sugli effetti del cambiamento climatico sull'involucro edilizio per mettere in evidenza i suoi potenziali limiti e verificare come l'involucro possa amplificare i diversi fenomeni estremi.

Note

1. "Negli ultimi decenni, le osservazioni di diverse variabili forniscono prove del cambiamento climatico antropogenico in corso nella regione mediterranea, in particolare l'aumento delle temperature medie ed estreme e le condizioni ambientali di siccità". La Regione del Mediterraneo sarà tra le più colpite dagli effetti del cambiamento climatico, in particolare si verificheranno episodi estremi in termini di innalzamento della temperatura e del livello del mare insieme ad una variazione del ciclo delle precipitazioni. Cherif, S., Doblas-Miranda, E., Lionello, P., Borrego, C., Giorgi, F., Iglesias, A., Jebari, S., Mahmoudi, E., Moriondo, M., Pringault, O., Rilov, G., Somot, S., Tsikliras, A., Vila, M., & Zittis, G. (2020). Drivers of change. In: *Climate and Environmental Change in the Mediterranean Basin – Current Situation and Risks for the Future. First Mediterranean Assessment Report* [Cramer W, Guiot J, Marini K (eds.)] p.5. Union for the Mediterranean, Plan Bleu, UNEP/MAP. Marseille, France. pp. 128, in press.

2. Secondo la Classificazione climatica di Koppen, il clima mediterraneo è un clima temperato (caratterizzato dalla temperatura del mese più freddo compresa tra -2°C e 15°C) ed è denominato Cs ed è definito come quel clima per il quale il totale delle precipitazioni misurate nel mese più secco del semestre caldo sono: inferiori a 30 mm e inferiori ad un terzo delle precipitazioni del mese più piovoso del semestre freddo. E' particolarmente secco nel periodo estivo e mite in quello invernale. L'inverno non è rigido anche se le temperature invernali possono talvolta scendere al di sotto dello zero. La vicinanza delle regioni mediterranee al mare limita l'escursione termica delle temperature nel corso dell'anno. La stagione primaverile è calda e piovosa, quella autunnale è mite e umida.

3. Il Mar Mediterraneo è situato tra Europa, Nord-Africa e Asia occidentale. È un mare dipendente dall'Oceano Atlantico, a cui è connesso tramite lo stretto di Gibilterra; il Canale di Suez, artificiale, lo collega invece al Mar Rosso e quindi all'Oceano Indiano. La sua superficie totale ammonta a circa 2,5 milioni di km2, mentre le temperature dell'acqua hanno estremi compresi fra gli 11 e i 32 °C. In genere, si oscilla fra i 12~18 °C nei mesi invernali fino ai 23~30 °C nei mesi estivi, a seconda delle zone. Per quanto riguarda la topografia del fondale viene diviso in due parti principali: il *Mediterraneo occidentale*, delimitato dal canale di Sicilia e caratterizzato da ampie piane abissali e il *Mediterraneo orientale*, molto più accidentato e dominato dal sistema della dorsale Mediterranea.

4. Gli hot spot, ovvero punti caldi, individuano delle aree in cui il cambiamento avviene con maggiore rapidità, facendo osservare variazioni importanti nei valori medi, sia di temperature, che di precipitazioni. L'individuazione dei punti caldi è il risultato di una ricerca condotta da un gruppo di ricercatori del Consiglio nazionale delle ricerche, composto da Marco Turco, Elisa Palazzi e Jost von Hardenberg dell'Istituto di Scienze dell'atmosfera e del clima (Isac-Cnr) di Torino e Antonello Provenzale, direttore dell'Istituto di Geoscienze e Georisorse (Igg-Cnr) di Pisa. Gli hot spot possono rappresentare informazioni importanti per i decisori, in quanto possono aiutare a definire le aree di intervento più importanti per decisioni di adattamento efficaci su orizzonti temporali vicini. Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://www.cnr.it/it/comunicato-stampa/6128/gli-hot-spot-del-cambiamento-climatico

5. I risultati di questa ricerca e le mappe relative agli spot dell'Area Mediterranea rispetto agli scenari climatici futuri di breve e lungo termine (2041–2060 e 2081–2100) possono essere visualizzati attraverso un'app interattiva al seguente link: https://earth.bsc.es/shiny/medprojections-shiny_app/

6. Il Primo Rapporto di Valutazione del Mediterraneo (MAR1), pubblicato a novembre 2020, è stato preparato dalla rete indipendente di esperti mediterranei sui cambiamenti climatici e ambientali (MedECC, nota 6). Il rapporto valuta le migliori conoscenze scientifiche disponibili sui cambiamenti climatici e ambientali e sui rischi associati nel bacino del Mediterraneo al fine di renderle accessibili ai responsabili politici, alle parti interessate e ai cittadini. Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://www.medecc.org/medecc-reports/climate-and-environmental-change-in-the-mediterranean-basin-current-situation-and-risks-for-the-future-1st-mediterranean-assessment-report/

7. MedECC, acronimo di Mediterranean Experts on Climate and environmental Change, fondata nel 2015, è una rete indipendente di scienziati che lavorano sulle questioni del cambiamento climatico e ambientale nel Mediterraneo con l'obiettivo di consolidare le conoscenze esistenti e renderle disponibili ai responsabili politici e ai cittadini. La sua attività si basa sull'identificazione delle possibili lacune e/o limiti nell'attuale ricerca sul cambiamento climatico e i suoi impatti nel Mediterraneo al fine di interagire con le agenzie di finanziamento per lo sviluppo di nuovi programmi di ricerca per colmare queste lacune. Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://www.medecc.org/organisation/

8. Per ogni anno, i quantili 95 e 99 (Q95 e Q99) sono le soglie corrispondenti al 95% e al 99% dei valori di tutti i dati piovosi giornalieri (365 valori per anno) classificati secondo l'intensità da giorni secchi a giorni piovosi. Generalmente, Q95 e Q99 agiscono come soglie di allarme estreme che riflettono l'intensità di un fenomeno (pioggia, inondazione e caldo). Le quantità di precipitazioni per i quantili 95 e 99 (AQ 99 e AQ 95) sono le precipitazioni cumulate maggiori rispettivamente delle soglie del 95% e del 99%.
L'indice di contributo delle precipitazioni estreme (ERCI) è una metrica basata su pixel calcolata per ogni anno come rapporto tra la somma degli importi degli eventi piovosi, che sono maggiori delle soglie del 95% e del 99%, e la somma di i restanti eventi piovosi. È il rapporto tra gli eventi estremi e la piovosità totale annua (AR Tot). Di conseguenza, ERCI è inversamente proporzionale alle quantità di precipitazioni per i quantili 95 e 99 (AQ95, AQ99).
Benabdelouahab, T., Gadouali, F., Boudhar, A., Lebrini, Y., Hadria, R., & Salhi, A. (2020). Analysis and trends of rainfall amounts and extreme events in the Western Mediterranean region. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 141(1), p. 312. DOI:10.1007/s00704-020-03205-4

9. La frequenza e l'intensità della siccità e delle precipitazioni intense sono già aumentate dal 1950 e si prevede che continueranno a crescere. Un riscaldamento globale di 2°C sarà probabilmente accompagnato da una riduzione delle precipitazioni estive di circa il 10-15% in alcune aree, mentre un aumento da 2 a 4°C comporterebbe una riduzione delle precipitazioni fino al 30% nell'Europa meridionale, soprattutto in primavera e in estate. È probabile che gli eventi di pioggia intensa si intensifichino del 10-20% in tutte le stagioni, ad eccezione dell'estate.

10. La temperatura delle acque del Mediterraneo do-

vrebbe aumentare tra +1,8°C e +3,5°C entro il 2100, con punti caldi previsti nella Spagna orientale e nel Mar Mediterraneo orientale. Inoltre, si prevede un aumento del livello del mare di circa 3 centimetri per decennio; un forte aumento rispetto al periodo 1945-2000 (0,7 millimetri all'anno) e simile all'aumento globale del livello del mare.

11. L'Atlante interattivo IPCC WGI è un nuovo strumento per analisi spaziali e temporali flessibili di gran parte delle informazioni sui cambiamenti climatici osservate e previste alla base del contributo del Gruppo di Lavoro I al Sesto Rapporto di Valutazione, inclusa la sintesi regionale per i fattori determinanti dell'impatto climatico. L'Atlante interattivo ha due componenti: il primo (informazioni regionali) include la capacità di generare mappe globali e una serie di prodotti aggregati a livello regionale (serie temporali, grafici a dispersione, tabelle, strisce climatiche, ecc.) per i cambiamenti climatici osservati e previsti per periodi di tempo, scenari di emissioni o livelli di interesse del riscaldamento globale. La seconda componente (sintesi regionale) fornisce informazioni qualitative sui cambiamenti nei fattori determinanti l'impatto climatico (CID) in diverse categorie come caldo e freddo, umido e secco, o costiero e oceanico. Gli utenti possono selezionare uno o più fattori di impatto e visualizzare le tendenze storiche regionali e i cambiamenti previsti nelle regioni di riferimento subcontinentali. Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://interactive-atlas.ipcc.ch/

12. Le ondate di calore (in inglese heat-waves) sono condizioni meteorologiche estreme che si verificano durante la stagione estiva, caratterizzate da temperature elevate, al di sopra dei valori usuali, spesso associate a tassi elevati di umidità, forte irraggiamento solare e assenza di ventilazione, che possono durare giorni o settimane. Negli anni le ondate di calore sono diventate un fenomeno sempre più rilevante, registrando un aumento consistente soprattutto nel meridione. A causare questo incremento è il cambiamento climatico, che ha comportato un aumento delle temperature medie, con un'intensificazione dei periodi di forte caldo. Secondo il glossario Istat del 2017, con "indice di durata dei periodi di caldo" si intende il numero di giorni nell'anno in cui la temperatura massima è superiore al 90° percentile per almeno 6 giorni consecutivi.

13. Agencia Estatal de Meteorología AEMET: Il servizio meteorologico nazionale spagnolo fu istituito il 12 agosto 1887 con la denominazione di Instituto Central Meteorológico. Nel corso del tempo, l'ente ha assunto varie denominazioni, fino all'8 febbraio 2008, data in cui è stata creata l'agenzia di meteorologia attualmente operante. Ha il compito di "sviluppare, implementare e fornire servizi meteorologici che rientrano nelle competenze dello Stato, nonché di sostenere altre attività pubbliche e private che migliorino la sicurezza e la qualità della vita della società spagnola". Le attività svolte da AEMET sono il monitoraggio e le previsioni meteo, la ricerca scientifica nell'ambito dei modelli numerici per la previsione del tempo. L'ente si occupa anche della raccolta e dell'archiviazione dei dati meteorologici rilevati da un gran numero di stazioni meteorologiche: alcune di esse risultano presidiate da personale e svolgono anche funzioni di assistenza alla navigazione aerea, mentre la maggior parte sono di tipo automatico e svolgono in prevalenza funzioni di tipo climatologico. Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://www.aemet.es/es/portada

14. Il Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC), fondato nel 2005 con il supporto finanziario del Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca (MIUR) e del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio (MATT), diventa pienamente operativo nel 2006. Il CMCC è organizzato nella forma di un network che connette entità pubbliche e private che lavorano insieme su ricerche multidisciplinari di interesse per le scienze del clima. La sua attività si basa sulla realizzazione di studi e modelli del nostro sistema climatico e delle sue interazioni con la società per garantire risultati affidabili, tempestivi e rigorosi al fine di stimolare una crescita sostenibile, proteggere l'ambiente e sviluppare, nel contesto dei cambiamenti climatici, politiche di adattamento e mitigazione fondate su conoscenze scientifiche. Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://www.cmcc.it/it/chi-siamo/cmcc-foundation

15. In meteorologia, il ciclone tropicale mediterraneo (detto anche medicane, dalla fusione dei termini inglesi MEDIterranean hurriCANE "uragano mediterraneo") è un sistema di bassa pressione caratterizzato da un nucleo caldo, convezione temporalesca attorno ad un centro di venti ben definito, piogge torrenziali, forti venti, che tipicamente compare nell'area del bacino del Mediterraneo. Questi sistemi si caratterizzano per essere particolarmente intensi rispetto ai comuni cicloni mediterranei, a tal punto da presentare delle caratteristiche simili ai cicloni tropicali. Nello specifico, questi sono dei vortici baroclini (un'atmosfera baroclina è quella per cui la densità dipende sia dalla pressione che dalla temperatura) che si formano sul Mar Glaciale Artico, quando aria gelida, proveniente dalla banchisa, si trova a scorrere sulle acque dell'oceano rese più calde dalla Corrente del Golfo.

16. "La distribuzione spaziale dei medicane è molto simile in queste climatologie, con due massimi rispettivamente sul Mediterraneo occidentale e sul Mar Ionio. Questa distribuzione differisce nettamente da quella dei più frequenti cicloni mediterranei extratropicali. La distribuzione stagionale mostra l'attività più alta in autunno e in inverno, mentre in estate si osservano pochissimi medicane, nonostante l'elevata temperatura superficiale del mare (SST) in questa stagione. In queste tempeste, l'interazione aria-mare gioca un ruolo fondamentale nella loro formazione e intensificazione, meccanismo diverso da quello dei cicloni extratropicali, dove prevale il meccanismo dell'instabilità baroclina (un'atmosfera baroclina è quella per cui la densità dipende sia dalla pressione che dalla temperatura). Nel quadro degli impatti dei cambiamenti climatici sui cicloni tropicali, una questione importante è se le aree che attualmente supportano solo marginalmente lo sviluppo dei cicloni tropicali, come il Mar Mediterraneo, sperimenteranno in futuro un aumento dell'attività dei cicloni tropicali". Gaertner, M. Á., González-Alemán, J. J., Romera, R., Domínguez, M., Gil, V., Sánchez, E., ... & Nikulin, G. (2018). Simulation of medicanes over the Mediterranean Sea in a regional climate model ensemble: impact of ocean–atmosphere coupling and increased resolution. *Climate dynamics*, Vol. 51(3), pp. 1042. DOI 10.1007/s00382-016-3456-1

17. Altre proiezioni includono:
- La temperatura delle acque superficiali aumenterà di 1-4 °C nel corso del 21° secolo, a seconda dei diversi scenari;
- Una riduzione media delle precipitazioni del 4% per grado di riscaldamento climatico, pari a una diminuzione complessiva del 4-22% entro il 2100, a seconda dei diversi scenari;
- Il livello medio del Mar Mediterraneo è aumentato di 6 cm negli ultimi due decenni. Questa tendenza accelererà in tutto il mondo fino a raggiungere 43-84 cm di

innalzamento del livello del mare entro il 2100.

18. Obiettivo 4: Affrontare il cambiamento climatico come questione prioritaria per il Mediterraneo. La Strategia invita a progredire verso una regione mediterranea verde, a basse emissioni di carbonio e resiliente al clima, promuovendo direzioni strategiche complementari, come segue: Aumentare le conoscenze scientifiche, sensibilizzare e sviluppare le capacità tecniche per affrontare i cambiamenti climatici e garantire un processo decisionale informato a tutti i livelli, riconoscendo e proteggendo i servizi di adattamento al clima e di mitigazione degli ecosistemi naturali; accelerare l'adozione di risposte intelligenti e resilienti al clima; sfruttare i meccanismi di finanziamento del clima esistenti ed emergenti, compresi gli strumenti internazionali e nazionali, e migliorare l'impegno del settore privato e finanziario; incoraggiare le riforme istituzionali, politiche e legali per un'efficace integrazione delle risposte ai cambiamenti climatici nei quadri di sviluppo nazionali e locali, in particolare nel settore energetico.
UNEP/MAP (2016). Mediterranean Strategy for Sustainable Development 2016-2025. Valbonne. Plan Bleu, Regional Activity Centre. p.9. ISBN 978-92-807-3576-5

19. La Strategia Mediterranea per lo Sviluppo Sostenibile (MSSD) 2016-2025 fornisce un quadro politico integrativo per tutte le parti interessate, compresi i partner MAP, per tradurre l'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile e gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (OSS) a livello regionale, subregionale, nazionale e livelli locali nella regione mediterranea. La Strategia segue una struttura basata su sei obiettivi che si collocano all'interno dell'interfaccia tra ambiente e sviluppo e sono stati scelti per dare spazio a un approccio integrato per affrontare le questioni legate alla sostenibilità.
I sei obiettivi sono: 1. Garantire lo sviluppo sostenibile delle aree marine e costiere; 2. Promuovere la gestione delle risorse, la produzione e la sicurezza alimentare attraverso forme sostenibili di sviluppo rurale; 3. Pianificare e gestire città mediterranee sostenibili; 4. Affrontare il cambiamento climatico come questione prioritaria per il Mediterraneo; 5. Transizione verso un'economia verde e blu; 6. Migliorare la governance a sostegno dello sviluppo sostenibile. Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://www.unep.org/unepmap/what-we-do/mediterranean-strategy-sustainable-development-mssd

20. "I Paesi del Mediterraneo devono identificare e sviluppare un approccio regionale all'adattamento ai cambiamenti climatici, con priorità regionali comuni, al fine di aumentare la resilienza del Mediterraneo ai cambiamenti climatici". UNEP/MAP (2016). Mediterranean Strategy for Sustainable Development 2016-2025. Valbonne. Plan Bleu, Regional Activity Centre. p. 49. ISBN 978-92-807-3576-5

21. Secondo l'IPCC, l'incertezza è uno stato di conoscenza incompleta che può derivare da una mancanza di informazioni o da un disaccordo su ciò che è noto o addirittura conoscibile. Può avere molti tipi di fonti, dall'imprecisione dei dati a concetti o terminologia definiti in modo ambiguo, o a proiezioni incerte del comportamento umano. L'incertezza può quindi essere rappresentata da misure quantitative (ad esempio, una funzione di densità di probabilità) o da affermazioni qualitative (ad esempio, riflettendo il giudizio di un gruppo di esperti). IPCC. (2014). Annex II: Glossary [Mach, K.J., S. Planton and C. von Stechow (eds.)]. In: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 117-130.

22. Climate Change in the Future, Fast Changing World. Strategic Plan 2019-2029 è stato redatto dal Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC). L'obiettivo è studiare e modellare il nostro sistema climatico e le sue interazioni con la società per fornire risultati scientifici affidabili, rigorosi e tempestivi per stimolare la crescita sostenibile, proteggere l'ambiente e sviluppare politiche di adattamento e mitigazione basate sulla scienza in un clima che cambia. Il piano ha lo scopo di incoraggiare la convergenza delle discipline per stimolare idee nuove e creative e per garantire che le osservazioni, le analisi, le previsioni e i servizi ambientali soddisfino le esigenze della società nel modo più efficace. Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://www.cmcc.it/it/chi-siamo/piano-strategico-2019-2029

23. Il sistema climatico può essere rappresentato da modelli di varia complessità; in altre parole, per ogni componente o combinazione di componenti è possibile identificare uno spettro o una gerarchia di modelli, che differiscono per aspetti quali il numero di dimensioni spaziali, la misura in cui i processi fisici, chimici o biologici sono rappresentati esplicitamente o il livello di parametrizzazione empirica. I modelli di circolazione generale accoppiati atmosfera-oceano Atmosphere–Ocean General Circulation Models (AOGCM) forniscono una rappresentazione del sistema climatico che si avvicina o si colloca all'estremità più completa dello spettro attualmente disponibile. È in corso un'evoluzione verso modelli più complessi con chimica e biologia interattive. IPCC (2014). Annex II: Glossary [Mach, K.J., S. Planton and C. von Stechow (eds.)]. In: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 117-130.

24. Il downscaling rappresenta lo strumento per incrementare la risoluzione spaziale dei modelli GCM e rappresentare meglio i fenomeni a scala regionale e locale. Si distingue tra downscaling dinamico (DD) e downscaling statistico (SD). Il downscaling dinamico consiste nell'utilizzo di un modello RCM (Regional Climate Model) che, innestandosi su un modello GCM da cui vengono acquisite le condizioni iniziali e al contorno, produce le proiezioni climatiche su un'area limitata (tipicamente dell'ordine di 5000 x 5000 km2) con risoluzione spaziale più elevata (tipicamente dell'ordine di 10-50 km). Ciò garantisce una rappresentazione più dettagliata delle caratteristiche geografiche e dei processi fisici che influenzano il clima nel dominio di interesse. Il downscaling statistico rappresenta un approccio alternativo o complementare, per ottenere simulazioni a scala locale. L'idea di base consiste nell'individuare, per il presente e il passato, robuste relazioni empirico-statistiche fra le variabili a larga scala (predittori) simulate da un modello globale o regionale e le variabili osservate a scala locale (predittandi) oggetto di interesse e successivamente nell'applicare tali relazioni alle simulazioni future. ISPRA (2015). *Calibrazione e test di metodi per il downscaling empirico-statistico e la correzione degli errori dei modelli climatici.* Vol. 56/2015. pp. 1-59. ISBN 978-88-448-0707-8

25. Le proiezioni sui cambiamenti climatici soffrono anche di diversi problemi fondamentali ben documentati che ne limitano l'utilità nel processo decisionale pratico, quali: errori nel modello climatico, downscaling regionale, profonda incertezza e variabilità naturale, quest'ultima dovrebbe essere presa in considerazione nelle informazioni sul clima a lungo

termine per indirizzare decisioni politiche. Nissan, H., Goddard, L., de Perez, E. C., Furlow, J., Baethgen, W., Thomson, M. C., & Mason, S. J. (2019). On the use and misuse of climate change projections in international development. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 10(3), e579. DOI: 10.1002/wcc.579

26. I Representative Concentration Pathways (RCP) sono insiemi coerenti di proiezioni delle sole componenti della forzatura radiativa e servono da input per la modellazione climatica, il ridimensionamento del modello e la modellazione della chimica atmosferica. Gli RCP sono quattro percorsi indipendenti sviluppati da quattro singoli gruppi di modellizzazione:
- RCP 2.6: è sviluppato dal team di modellazione IMAGE dell'Agenzia olandese per la valutazione ambientale. Si tratta di un cosiddetto scenario di "picco": il suo livello di forzante radiativo raggiunge dapprima un valore intorno a 3,1 W/m2 a metà del secolo, per tornare a 2,6 W/m2 entro il 2100;
- RCP 4.5: è sviluppato dal team di modellazione MiniCAM presso il Joint Global Change Research Institute (JGCRI) del Pacific Northwest National Laboratory. È uno scenario di stabilizzazione in cui il forzante radiativo totale è stabilizzato prima del 2100 dall'impiego di una serie di tecnologie e strategie per ridurre le emissioni di gas serra.
- RCP 6.0: è sviluppato dal team di modellazione AIM presso il National Institute for Environmental Studies (NIES), Giappone. È uno scenario di stabilizzazione in cui il forzante radiativo totale viene stabilizzato dopo il 2100 senza superamento mediante l'impiego di una serie di tecnologie e strategie per ridurre le emissioni di gas serra.
- RCP 8.5: è sviluppato dal team di modellazione MESSAGE e dall'IIASA Integrated Assessment Framework presso l'International Institute for Applies Systems Analysis (IIASA), Austria. L'RCP 8.5 è caratterizzato da un aumento delle emissioni di gas serra nel tempo rappresentativo di scenari in letteratura che portano a livelli elevati di concentrazione di gas serra.

27. La forzante radiativa, espresso in W/m2 (Watt su metro quadrato), consente di esprimere l'influenza di un fattore sul bilancio energetico terrestre. Un valore positivo indica che il fattore è in grado di aumentare la quantità di energia trattenuta dal sistema Terra, facendo crescere la temperatura del pianeta; al contrario, un valore negativo indica che il fattore diminuisce la quantità di energia trattenuta dal pianeta, facendone calare così la temperatura.

28. La decima edizione del rapporto, *Explaining Extreme Events in 2020 from a Climate Perspective*, presenta 18 nuove analisi di condizioni meteorologiche estreme provenienti da tutto il mondo durante il 2020. La ricerca di 89 scienziati di nove paesi ha l'obiettivo di esaminare sia le osservazioni storiche che simulazioni di modelli per determinare se e in che misura il cambiamento climatico possa aver influenzato particolari eventi estremi. Per ulteriori informazioni, consultare il link: https://www.ametsoc.org/ams/index.cfm/publications/bulletin-of-the-american-meteorological-society-bams/explaining-extreme-events-from-a-climate-perspective/

29. Le simulazioni sono elaborate attraverso DataClime, il servizio progettato per fornire analisi climatiche utilizzando sia le proiezioni climatiche ad alta risoluzione sviluppate dal CMCC, che quelle rese disponibili attraverso altri programmi e progetti. Per ciascuno dei tre periodi (2021-2050; 2041-2070, 2071-2100) riferito a ciascuno dei due scenari RCP 4,5 e RCP 8,5, le mappe indicano le anomalie in termini di valori medi in riferimento al periodo 1981-2010. Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://www.cmcc.it/it/scenari-climatici-per-litalia

30. COSMO-CLM (Consortium for Small Scale Modeling) è un Modello Climatico Regionale (RCM) realizzato nell'ambito del consorzio europeo CLM Assembly. L'obiettivo del modello meteorologico e climatico regionale è un adattamento a condizioni speciali su piccola scala. Questo modello copre il territorio italiano con una risoluzione spaziale di circa 8 km. In questo caso, le simulazioni climatiche sono disponibili dal 1971 al 2100 per due scenari IPCC (RCP4.5 e RCP8.5). In Italia, un gran numero di istituzioni pubbliche e private ha adottato questo modello nell'ambito di specifici studi volti alla valutazione del rischio climatico e alla definizione di strategie e azioni di adattamento, su scala sia regionale sia locale.

31. La Climate Limited-area Modeling Community (CLM-Community) è una rete internazionale aperta di scienziati che lavorano nell'area della modellazione climatica regionale e del cambiamento climatico. I membri della CLM-Community sviluppano insieme i modelli climatici regionali COSMO-CLM e ICON-CLM, applicano i modelli per un'ampia gamma di applicazioni e collaborano a progetti scientifici. Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://clmcom.scrollhelp.site/clm-community/

32. AEMET, Agencia Estatal de Meteorología è il servizio meteorologico nazionale della Spagna accreditato presso l'Organizzazione Meteorologica Mondiale, dal 1887. Opera per il ministero dell'agricoltura, dell'alimentazione e dell'ambiente. L'ente collabora anche con il Centro europeo per le previsioni meteorologiche a medio termine (ECMWF) e con EUMETSAT, l'organizzazione europea per la gestione dei satelliti meteorologici. Per ulteriori informazioni, consultare il sito: http://www.aemet.es/es/portada

33. AdapteCCa è una piattaforma di visualizzazione degli scenari del clima della Spagna, con l'opportunità di consultare informazioni su impatti, vulnerabilità e adattamento ai cambiamenti climatici. Gli obiettivi della piattaforma sono: 1. Facilitare l'accesso a dati, informazioni e conoscenze sull'adattamento ai cambiamenti climatici costruendo una solida base di conoscenze coerenti e aggiornate; 2. Essere uno strumento di scambio aperto che faciliti la comunicazione multidirezionale e il lavoro coordinato tra i diversi attori nel campo dell'adattamento: amministrazioni spagnole, comunità scientifica, pianificatori, manager pubblici e privati, ecc. La sezione della piattaforma "Scenario viewer" consente di accedere a dati e grafici simulando delle proiezioni dei cambiamenti climatici regionalizzati. Per ulteriori informazioni, consultare il sito: http://adaptecca.es/

34. Si riportano le caratteristiche generali delle sei regioni climatiche italiane. La *regione alpina* ha inverni lunghi e freddi con abbondanti nevicate ed estati fresche e piovose. La *regione appenninica* è caratterizzata, in generale, da inverni freddi, con frequenti nevicate, soprattutto nelle zone più elevate. Le temperature, però, sono meno rigide che sulle Alpi, perché qui l'altitudine è inferiore. Le estati sono fresche. Il clima diventa più mite a mano a mano che si scende verso sud. La *regione padano-veneta* ha un clima continentale: inverni freddi, umidi e con nebbie ed estati calde e afose. Le precipitazioni sono più frequenti in autunno e in primavera. La *regione ligure-tirrenica*, grazie alla presenza del mare e dell'Appennino, che ferma i venti freddi da est, ha inverni miti ma piovosi ed estati calde ma ventilate. La *regione adriatica* ha inverni freddi, perché l'Adriatico non è molto profondo e quindi non accumula grandi quantità di calore; inoltre da nord-est soffiano venti freddi. Le estati sono calde ma poco

afose. Le precipitazioni sono frequenti in inverno e in primavera. La *regione mediterranea* ha un clima caldo e secco. Gli inverni sono tiepidi, con scarse precipitazioni, e le estati lunghe e calde.

35. L'Istat ha aggiornato al 2020 la Banca Dati Meteo delle variabili meteo-climatiche (temperatura minima, temperatura media, temperatura massima, precipitazione totale annua, umidità) utilizzando dati raccolti presso Enti gestori (unità di rilevazione) di reti di stazioni termo-pluviometriche di misura (unità di analisi). Per la temperatura, gli aumenti interessano 82 città, le più significative a Ravenna (+1,8°C), Sondrio (+1,5), Mantova (+1,4), Parma (+1,3) e Bologna (+1,2). Considerando i soli capoluoghi di regione, l'anomalia di temperatura media ai attesta su +1,2°C rispetto al CLINO. Rialzi della temperatura sia minima che massima vanno a determinare anomalie positive per tutte le 21 città esaminate, le più alte a Perugia (+2,1°C) e Roma (+2), seguite da Milano (+1,9), Bologna (+1,8) e Torino (+1,7). Dati del Rapporto: Temperatura e precipitazione nei comuni capoluogo di provincia. anno 2020 e serie storica 2010-2020. Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://www.istat.it/it/archivio/268397

36. Nel 2020, la precipitazione totale annua dei capoluoghi di provincia è pari a 769 mm, in media -94 mm sul valore medio 2006-2015. Differenze negative si registrano in 79 città con in testa Napoli (-423,5), Catanzaro (-416), Pordenone (-401,3). Nelle restanti città, si hanno scostamenti positivi con punte per Arezzo (+220,9 mm), Pisa (+204,1) e Lecco (+170,4). Fra gli Indici di estremi meteoclimatici di precipitazione, risultano in calo i giorni piovosi in media -10 sul valore del decennio 2006-2015. Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://www.istat.it/it/archivio/268397

37. L'umidità relativa è misurata in percentuale e indica il rapporto tra la quantità di vapore acqueo contenuto da una massa d'aria e la quantità massima che il volume d'aria potrebbe contenere nelle stesse condizioni di temperatura e pressione.

38. L'umidità relativa annuale è stata ovunque inferiore alla media climatologica 1961-1990, con il valore di anomalia più basso registrato al Centro (-4.4%), seguito dal Nord (-3.6%) e infine da Sud e Isole (-2.8%). Tutti i mesi del 2020 sono stati ovunque più secchi della norma, tranne ottobre e dicembre al Nord (fino a +6.1%), ottobre, novembre e dicembre al Centro (fino a +5.5%), novembre e dicembre al Sud e Isole (fino a +2.9%); i picchi di anomalia negativa dell'umidità relativa si sono registrati al Nord a febbraio (-12.5%), al Centro ad aprile (-10.5%), al Sud e Isole a maggio (-7.0%). Il valore medio di anomalia di umidità relativa (-2.4%) colloca il 2020 al sesto posto tra gli anni più secchi a partire dal 1961.

39. La mappa interattiva Interactive Map: Daily Maximum Wet-Bulb Temperature (°C) riporta i valori della temperatura a bulbo umido per le diverse Nazioni del Mondo; i valori possono essere letti passando il mouse sopra i vari punti. È accessibile mediante il seguente link: https://news.climate.columbia.edu/wp-content/themes/sotp-foundation/dataviz/heat-humidity-map/ Accessed: 20 ottobre 2022

40. I 10 indicatori alla base delle simulazioni del database interattivo DataClime sono: Temperatura media giornaliera (Tmean), Giorni di precipitazione intensa (R20), Giorni di freddo intenso (FD), Giorni estivi (SU95P), Precipitazioni invernali (WP), Precipitazioni estive (SP), Giorni consecutivi senza pioggia (CDD), 95° percentile delle precipitazioni (PR95percentile), Heating Degree Days (HDDs), Cooling Degree Days (CDDs).

41. Un'altra definizione di ondata di calore usata in Italia è quella che stabilisce che si ha una ondata di calore quando si verifica un periodo di 3-6 giorni consecutivi (ondata di calore di breve durata) o almeno 7 giorni consecutivi (ondata di calore di lunga durata) con temperatura media giornaliera superiore di almeno una deviazione standard (calcolata sul periodo 1981-2010 o se disponibile 1991-2020) rispetto alla temperatura media giornaliera "normale".

42. La mappa di Legambiente è un sistema interattivo che in questa prima elaborazione ha preso in considerazione i danni provocati da fenomeni meteorologici avvenuti dal 2010 ad oggi, e sarà periodicamente aggiornata. L'aggiornamento della mappa avrà come obiettivo proprio di leggere in maniera integrata l'impatto dei fenomeni climatici nei Comuni, mettendo assieme informazioni, immagini, analisi e dati sugli episodi e provare così a comprendere le possibili cause antropiche, le scelte insediative o i fenomeni di abusivismo edilizio, che ne hanno aggravato gli impatti, e arrivare a individuare oltre alle aree a maggiore rischio per i cambiamenti climatici anche nuove strategie di adattamento per le città. Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://cittaclima.it/mappa/

43. *Copernicus european health* è un ente facente parte del servizio sanitario europeo che fornisce agli utenti informazioni climatiche su misura per il settore sanitario. Il servizio fornisce prove relative agli impatti sulla salute del clima passato, presente e futuro, fornendo supporto alle sfide decisionali che attualmente devono far fronte a esigenze insoddisfatte di dati sul clima. Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://climate.copernicus.eu/european-health-service

44. Nella Meseta il clima è di tipo continentale con inverni rigidi e secchi ed estati torride con le scarse precipitazioni concentrate nelle stagioni intermedie. Nella fascia costiera settentrionale il clima è di tipo atlantico, con inverni miti, estati fresche e precipitazioni abbondanti tutto l'anno, La costa meridionale occidentale gode di un clima temperato, mentre più a sud le temperature aumentano considerevolmente, le precipitazioni sono scarse. Nelle aree meridionali il clima è mite. Oltre ai climi principali, ci sono anche dei sottoclimi, come per esempio quello alpino caratteristico della catena montuosa dei Pirenei e della Serra Nevada e quello subtropicale che è presente nell'area della Costa Brava.

References

AEMET (2021). *Resumen anual climatologico 2021*. AEMET. pp.1-16. Online avaible at: https://www.aemet.es/es/noticias/2022/01/2021_resumen_climatico Accessed: 22 ottobre 2022. Cit. pag. 69+.

Cherif, S., Doblas-Miranda, E., Lionello, P., Borrego, C., Giorgi, F., Iglesias, A., Jebari, S., Mahmoudi, E., Moriondo, M., Pringault, O., Rilov, G., Somot, S., Tsikliras, A., Vila, M., & Zittis, G. (2020). Drivers of change. In: *Climate and Environmental Change in the Mediterranean Basin – Current Situation and Risks for the Future. First Mediterranean Assessment Report* [Cramer W, Guiot J, Marini K (eds.)]. Union for the Mediterranean, Plan Bleu, UNEP/MAP. Marseille, France. pp. 128, in press. Cit. pag. 5.

Diffenbaugh, N. S., Singh, D., Mankin, J. S., Horton, D. E., Swain, D. L., Touma, D., ... & Rajaratnam, B. (2017). Quantifying the influence of global warming on unprecedented extreme climate events. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(19), pp. 4881-4886. DOI: 10.1073/pnas.1618082114. Cit. pag. 1.

Fioravanti, G., Fraschetti, P., Lena, F., Perconti, W., Piervitali, E., & Pavan Valentina (2022). Gli indicatori del clima in Italia nel 2021. Anno XVII. ISPRA, Stato dell'Ambiente, Vol. 98/2022, pp. 1-82. ISBN 978-88-448-1119-8. Cit. pag. 76.

IPCC (2014). Annex II: Glossary [Mach, K.J., S. Planton and C. von Stechow (eds.)]. In: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 117-130. Cit. pag. 120.

Lionello, P., Abrantes, F., Congedi, L., Dulac, F., Gacic, M., Gomis, D., Goodess, C., Hoff, H., Kutiel, H., Luterbacher, J., Planton, S., Reale, M., Schröder, K., Vittoria Struglia, M., Toreti, A., Tsimplis, M., Ulbrich, U., Xoplaki, E. (2012). I*ntroduction: Mediterranean Climate—Background Information. In The Climate of the Mediterranean Region*. Elsevier, Oxford. DOI: 10.1016/B978-0-12-416042-2.00012-4. Cit. pag. liii.

UNEP/MAP (2016). *Mediterranean Strategy for Sustainable Development 2016-2025*. Valbonne. Plan Bleu, Regional Activity Centre.ISBN 978-92-807-3576-5. Cit. pag. 49.



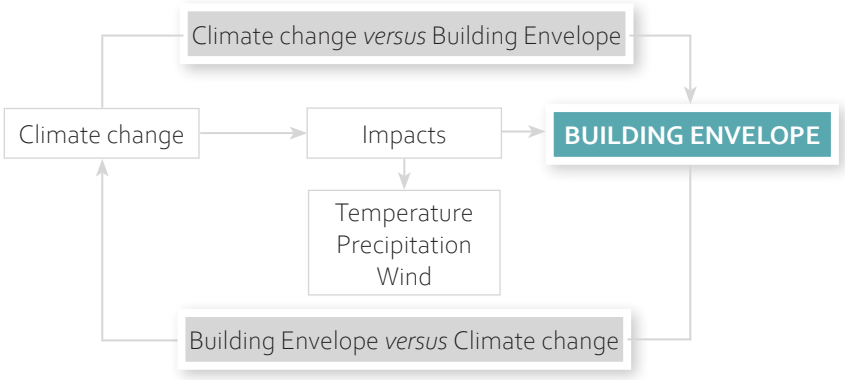
Capitolo 3

Il problema scientifico
Cambiamenti climatici ed involucro edilizio

Abstract

Chapter 3 aims to present the dynamic analysis of the impacts of climate change on buildings (Climate change *versus* Building envelope) and their inverse relationship, i.e. buildings as elements that can amplify impacts and trigger climate change phenomena (Building envelope *versus* Climate change). In this study, the extreme events that are taken into account are temperature increase, intense precipitation, and increase in wind speed. From the analysis, it emerges that for both 'Climate change & Building envelope' and 'Building envelope versus Climate change', transparent surfaces are responsible for heat loss and water infiltration and are highly exposed to the impact of debris transported by the wind, failing their constituent elements. Solutions that aim to reduce impacts from and on the envelope, require an accurate technology and material analysis to allow the envelope's level of response to a given extreme event to be maintained and thus limit the performance decay level of the entire system.
The specificity of this work is to promote the creation of new design tools and processes that act on the built environment, giving adaptive design to improve the performance and response of building envelopes. However, for the building sector stakeholders, it is strategic and indispensable to measure with the new simulation and experimentation tools, to validate and verify the building performance to specific environmental contexts, and to direct an innovation from which a design increasingly adapted to the climate derives.

Key-words
climate change, construction sector, extreme events, impacts, building envelope



Capitolo 3: Thematic Flow-Chart - Fase Istruttoria

3.1 Cosa significa il cambiamento climatico per il futuro del settore delle costruzioni?

"The built environment generally has a design life of 40–100 years,
and the urban form has even greater longevity.
This makes climate change a current, rather than a future issue"[1]
[Cherif, et al., 2020, p. 5]

Le proiezioni climatiche, analizzate nel capitolo precedente, indicano che gli effetti del cambiamento climatico stanno avendo un impatto crescente in differenti settori ed è inevitabile affermare che questi impatti riguardano il settore delle costruzioni. L'edilizia non fa eccezione a questi cambiamenti, essendo una componente chiave della nostra qualità di vita [Newton, et al., 2009]. D'altro canto, il consenso scientifico sul riscaldamento globale causato dalle attività antropiche, con la diretta conseguenza degli impatti e dell'aumento delle concentrazioni di anidride carbonica in atmosfera, costituisce uno dei temi di forte interesse negli ultimi decenni [Myers, et al., 2021].
Gli impatti includono l'innalzamento della temperatura, piogge intense, incendi più frequenti, forti tempeste e inondazioni. Riprendendo la definizione dell'IPCC [2022, p.2912], gli impatti rappresentano '*le conseguenze dei rischi realizzati sui sistemi naturali e umani, dove i rischi derivano dalle interazioni tra i pericoli legati al clima (compresi gli eventi climatici/meteorologici estremi), l'esposizione e la vulnerabilità*'.

In questo contesto, è centrale per lo sviluppo delle attività stesse della ricerca, porsi una domanda-chiave:

Come si può affrontare il cambiamento climatico dal punto di vista della costruzione?

In primo luogo, appare utile restituire una definizione di ambiente costruito. Il termine ambiente costruito[2] si riferisce all'insieme delle realizzazioni da parte dell'uomo che trasformano l'ambiente naturale. La principale attività di trasformazione è dovuta al settore delle costruzioni attraverso la realizzazione di edifici, manufatti e infrastrutture di collegamento che costituiscono la città. "Forma urbana e infrastrutture influenzano in modo significativo le emissioni dirette e indirette di gas climalteranti e sono fortemente legate alla distribuzione di materiali ed energia, ai rifiuti che generano e all'efficienza di sistema della città" [De Lauretis, & Taurino, 2014, p.5].
A tal proposito, già nel 1833, Luke Howard nel suo studio sistematico sulle variabili che regolano il rapporto clima e città, dimostrava che la struttura morfologica della città stessa era una componente che influenzava significativamente il clima locale, intervenendo su alcuni parametrici climatici come la temperatura, l'umidità e il vento [Howard, 1833].
La citazione, sopra riportata, riflette in modo sostanziale come architetti, ingegneri e produttori del settore debbano tenere conto della variabilità del clima prevista nel corso di questo secolo non solo nelle fasi progettuali, ma anche negli interventi di manutenzione e ristrutturazione per accelerare quel necessario processo di adattamento dell'ambiente costruito.
In molte aree infatti, si stanno verificando nuovi fenomeni metereologici [Fig. 3. 1]- la cui frequenza, portata e intensità sono aumentate a causa dei cambiamenti climatici - per i quali l'ambiente costruito, ma anche quello naturale, non è ancora preparato [Zięba, et al., 2020]. Di conseguenza, è logico supporre una forte e complessa relazione tra cambiamento climatico e ambiente costruito.

Ad avvalorare tale scenario, il nuovo rapporto della *Global Alliance for Buildings and Construction*[3] (GlobalABC), "2021 Global Status Report for Building and Construction. Towards a Zero-Emission, Efficient and Resilience Buildings and Construction Sector" [UNEP, 2021],

rileva che nel 2020 il settore delle costruzioni ha rappresentato il 36% del consumo energetico finale globale e il 37% delle emissioni di CO_2 legate all'energia, rispetto ad altri settori (trasporti e altre industrie). La quota consistente delle emissioni di CO_2 proviene, ad esempio, dall'utilizzo dell'energia richiesta per la produzione e il trasporto dei materiali da costruzione, dallo smaltimento dei rifiuti da costruzione e dal fabbisogno e trasporto di attrezzature da costruzione [Yan, et al., 2010].

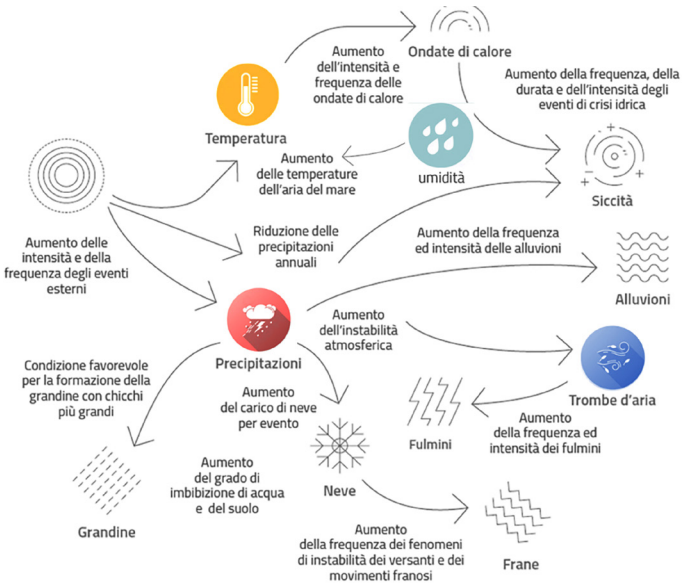


Fig. 3.1. Conseguenze degli eventi estremi di cambiamento climatico. Elaborazione grafica a cura della Dottoranda E. Grillo

Rispetto al 2019, il livello di emissioni all'interno del settore è inferiore del 10%, raggiungendo livelli minimi che non si vedevano dal 2007, ciò è però in gran misura dovuto alla pandemia da Covid-19 che ha causato un rallentamento delle economie e delle attività di costruzione. L'impatto più significativo sull'uso dell'energia nell'ambiente costruito si verificherebbe nei climi caldi d'estate e d'inverno, dove l'uso dell'energia negli edifici è dominato dal fabbisogno di raffreddamento [Li, Yang, & Lam, 2012].
Gli edifici vengono qui intesi come strutture complesse dove giocano un ruolo fondamentale le interazioni variabili nel tempo e nello spazio tra le condizioni meteorologiche locali, i carichi interni e i sistemi di riscaldamento e raffreddamento di tipo naturale o meccanico-controllato [Crawley, 2003].
Ciò implica che gli edifici devono essere progettati per funzionare, mantenendo la qualità delle loro caratteristiche prestazionali, sia nel clima attuale che in quello futuro e con l'obiettivo di ridurre il carico di emissioni di gas serra [De Wilde, & Coley, 2012]. Quindi il cambiamento climatico e gli eventi metereologici estremi avranno un impatto sostanziale sul consumo energetico degli edifici e, al contempo, comporteranno gravi conseguenze ad un ambiente costruito progettato nell'ipotesi di condizioni stabili [Stagrum, et al., 2020].

Come analizzato nel precedente capitolo, tra i fenomeni che possono incidere sull'ambiente costruito vi sono l'aumento della temperatura e la variazione del regime delle precipitazioni che possono essere aggravati dalle caratteristiche proprie della città e fa risultare gli edifici più vulnerabili a questi effetti.

I principali impatti che ne derivano sono:

- *isola di calore*: che spesso coincide con il peggioramento della qualità dell'aria e diventano più pronunciate la sera a causa del lento rilascio di calore dei materiali urbani, di conseguenza vi è un aumento del consumo energetico degli edifici, soprattutto nel periodo estivo;
- *ondate di calore*: che influisce sull'aumento dell'inquinamento da polveri, dovute agli incendi, specie in estate, rappresentando anche un rischio per la salute;

- *pluvial flooding*: che si verifica a seguito di elevate precipitazioni e possono derivare dall'efficienza limitata o ridotta del drenaggio superficiale [Palla, et al., 2018].

Da evidenziare che le variabili meteorologiche che maggiormente influenzano l'intensità di questi fenomeni sono la velocità del vento e la nuvolosità, poiché modificano rispettivamente la turbolenza atmosferica e l'irraggiamento solare. Gli effetti climatici localizzati, in questo caso ondate di calore e precipitazioni intense, influiscono da un lato sulla componente energetica degli edifici e dall'altro su sistemi, materiali e componenti che realizzano nello specifico l'involucro edilizio.

Un aspetto critico da sottolineare è che diversi edifici sono progettati solo per soddisfare i criteri imposti da normative di settore e dai regolamenti edilizi, non risultando idonei alla variabilità del clima. In aggiunta, un elemento che spesso non viene considerato nella progettazione è il *microclima*[4] che potrebbe risultare diverso dal clima locale; di conseguenza gli edifici sono considerati degli oggetti geometrici disposti in un contesto aperto senza elementi che possano interferire e interagire tra loro.
Circa 40 anni fa, Oke [1982] individuava nella geometria di un edificio, un fattore influenzante il microclima a livello urbano in differenti modi: aumenta la superficie esposta ai processi di scambio termico; controlla e complica la distribuzione spaziale della radiazione solare e delle precipitazioni e provoca un'interazione radiativa tra le diverse superfici.
Difatti, un aspetto che influisce sul regime termico (una delle problematiche riscontrate nella Regione Mediterranea) dell'ambiente costruito è la disposizione geometrica degli edifici, che è in grado di modificare i percorsi della radiazione.
Si distingue così il noto effetto *canyon urbano*[5], a causa del quale il fenomeno dell'isola di calore può durare anche nelle ore notturne, aumentando il discomfort termico. In questo caso, l'emissività delle facciate degli edifici rappresenta un parametro che influenza il microclima locale, soprattutto nella stagione invernale, in quanto le superfici dell'edificio presentano una temperatura più alta di quella dell'aria [Naboni, et al., 2020].
Riconoscendo queste problematiche, il settore delle costruzioni diventa consapevole delle sue dirette conseguenze sull'ambiente costruito. In linea generale, le conseguenze negative derivanti dall'innalzamento della temperatura, soprattutto durante la stagione estiva, implicano la massima richiesta annuale di potenza elettrica da parte degli edifici, che contribuisce ad aumentare l'effetto di isola di calore.
L'utilizzo massiccio degli impianti di condizionamento, oltre a provocare maggiori emissioni di calore antropogenico che aumentano ulteriormente la temperatura, determina maggiori emissioni di gas serra e di inquinanti, riducendo la qualità dell'aria.
Ad esempio, nella Regione Mediterranea, è da sempre diffuso l'utilizzo di sistemi per il raffrescamento passivo ed in particolare per la ventilazione naturale, per far fronte alle difficili condizioni climatiche estive. Sono quindi necessarie delle strategie di mitigazione e adattamento, i cui effetti/benefici si riscontrano nella minore temperatura delle superfici degli edifici che consente di ridurre la necessità di energia elettrica per la climatizzazione con un miglioramento della qualità dell'aria esterna e un conseguente risparmio economico.

In accordo a ciò, risulta fondamentale trasferire queste informazioni per un miglior controllo e una più efficiente gestione dell'energia rispetto un contesto climatico di riferimento. L'opportunità di realizzare sistemi a basse emissioni di carbonio è determinata dall'introduzione di un nuovo concetto emergente di 'edificio ad energia positiva', ovvero P*ositive Energy Building* PEB, con l'obiettivo di aumentare la quota di produzione di energia rinnovabile nell'ambiente costruito al fine di equilibrare le reti energetiche locali [Ala-Juusela, et al., 2021]. La variabilità degli scenari climatici ha portato ad una revisione critica sulle tradizionali soluzioni tecnologiche di efficientamento energetico degli edifici, concentrando lo studio del loro comportamento non soltanto in regime estivo ma anche in quello invernale, promuovendo la necessità di una costruzione di tipo adattiva.
Pertanto, i professionisti del settore devono tenere conto del rischio climatico e degli eventi estremi, sia nei casi di progettazione ex-novo che per la ristrutturazione di edifici esistenti, nonostante quest'ultima potrebbe risultare più complessa.

Sebbene lo scopo del lavoro riportato in questo paragrafo non sia l'individuazione delle strategie di mitigazione e adattamento per l'ambiente costruito, è necessario mettere in evidenza che il primo passo per la progettazione di involucri resilienti al clima (climate resilient) – riprendendo i concetti definiti nel primo capitolo – è la conoscenza delle condizioni ambientali del contesto, al fine di mettere in relazione caratteristiche di temperatura, direzione del vento, radiazione solare con quelle caratteristiche tecniche e tecnologiche che aumentano la capacità di reazione agli effetti climatici.
In risposta alla questione sopra riportata, non si tratta di sviluppare nuovi materiali che possano reagire ad esempio ad elevate temperature, ma di sviluppare nuovi approcci di valutazione prestazionale degli involucri edilizi e spostare l'attenzione dallo studio di parametri generali del clima a quelli locali, per prevenire gli impatti causati da eventi estremi.
Queste azioni non devono essere intese come strumenti già consolidati, ma come un insieme in continua evoluzione e in linea con gli scenari climatici del prossimo futuro.
Dal punto di vista scientifico, risulta complesso fornire un'affidabile strumento di supporto ai fenomeni di cambiamento climatico che investono il settore delle costruzioni, in quanto vi sono diverse barriere che dipendono dalla disponibilità di dati, dalla difficile lettura dei meccanismi di feedback che si instaurano tra clima ed edificio.

Se a questo quadro si affiancano le nuove esigenze abitative relative al miglioramento del comfort, queste non sembrano essere soltanto legate all'efficienza energetica ma a nuove soglie prestazionali da garantire in termini di innovazione tecnologica e integrazione di sistemi complessi. Anche se la letteratura esistente su questo argomento è aumentata negli ultimi anni, sono ancora necessarie ulteriori ricerche poiché gli impatti dei cambiamenti climatici variano a seconda della località, delle stagioni, influenzando anche l'efficienza, la qualità dell'aria interna e il comfort termico degli edifici [Yau, & Hasbi, 2013].

È su questi assunti che la specificità della ricerca conduce ad approfondire i temi dell'innovazione del settore delle costruzioni, rispetto agli obiettivi trasversali del settore della tecnologia, individuati nel rapporto tra clima ed edificio. Poiché il settore delle costruzioni è un fattore causale del cambiamento climatico [Anthonia, et al., 2010], gli sforzi della ricerca si spingono sulla definizione e sullo sviluppo di parametri, codici e indicatori che possano indirizzare la costruzione ad essere in linea con i parametri e le variabili climatiche di un contesto, dato che il clima cambia da un luogo all'altro.
Il settore delle costruzioni è quindi direttamente coinvolto in questo processo ed è chiamato a definire nuovi processi, metodi applicativi e soluzioni tecnologiche innovative che siano in grado di innalzare i livelli di qualità e adattamento dell'ambiente costruito e contribuire in modo significativo agli obiettivi delle politiche Europee.

Questo significa che il settore delle costruzioni deve impegnarsi a mantenere la temperatura al di sotto dell'1,5°C e contribuire alla riduzione dei gas-climalteranti, attraverso una progettazione adattiva e quindi, orientata al clima che cambia. In questo senso, l'adattamento ha come obiettivo il controllo delle proprietà fisiche di componenti e sistemi edilizi utilizzando gradienti di variabili ambientali esterne, al fine di migliorare il comfort esterno ed interno e ridurre i consumi di energia.
In tale scenario, la definizione di uno stato di equilibrio adattivo sembra essere la strada più promettente da perseguire, per garantire al tempo stesso, una migliore gestione dei flussi (materiali ed energetici) nell'ambiente costruito e facilitare la mitigazione degli impatti a scala dell'edificio, auspicando una validità, in termini qualitativi, a lungo termine.
Questo comporta l'esigenza di ampliare la conoscenza sulle dinamiche di trasformazione naturali e indotte, prefigurando un approccio sistemico e strutturale alla progettazione.

In tal senso, la conoscenza degli effetti del cambiamento climatico dovrebbe facilitare la creazione di nuovi strumenti e processi progettuali che agiscano sull'ambiente costruito, affidando alla progettazione adattiva il compito di migliorare le prestazioni e la risposta degli edifici, delle infrastrutture e dell'ambiente costruito e naturale nel suo complesso. Tuttavia, per gli attori del settore delle costruzioni risulta strategico e indispensabile *misurarsi* con i nuovi strumenti di simulazione e testing, al fine di validare e verificare i funzionamenti degli edifici rispetto a specifici contesti ambientali e indirizzare un'innovazione da cui deriva una progettazione sempre più *adatta al clima*.

La sfida è favorire lo sviluppo di approcci di gestione flessibile in risposta all'evolversi del clima con misure tecnologiche, ambientali ed in linea con gli obiettivi dell'articolazione '*5.5.2 Cambiamento climatico, mitigazione e adattamento*'[6] del PNR 21-27: "individuare strategie tempestive per intervenire sulle cause (strategie di mitigazione per una riduzione delle emissioni clima-alteranti nazionali di almeno ogni anno il 5% a partire dal 2020/21) e sugli effetti (strategie di adattamento)" [MUR, 2020, p. 122].

Rafforzando quanto detto finora, uno degli obiettivi della presente ricerca è analizzare gli impatti del cambiamento climatico non sull'ambiente costruito, ma sull'involucro edilizio, mettendo in evidenza i suoi limiti prestazionali ai fenomeni estremi e soprattutto verificare come l'involucro possa innescare questo tipo di fenomeni a piccola scala, tema che viene affrontato nel prossimo paragrafo.
Questo tipo di approccio mette in conto la volontà di gestire più aspetti contemporaneamente, al fine di soddisfare i requisiti principali e funzionali di un edificio e proteggere gli interni da fattori ambientali come vento, precipitazioni, umidità, temperatura esterna e radiazione solare. Le attività della ricerca, quindi, si indirizzano verso l'analisi di soluzioni tecnologiche che, operando sull'involucro siano capaci di garantire appropriate risposte nella gestione della relazione edificio/contesto/impatti, in modo tale da influenzare positivamente il microclima dell'ambiente costruito.
Lo scopo è quello di contribuire a colmare lacune conoscitive in tema di fenomeni ed eventi estremi di cambiamento climatico sugli involucri edilizi, definendo le tipologie di impatti su cui andranno calibrate le procedure di valutazione e possibili soluzioni tecnologiche per gli involucri edilizi.

3.2 Una lettura dinamica del cambiamento climatico e l'involucro edilizio

"Los edificios corren grandes riesgos de sufrir daños por los impactos previstos del cambio climático, habiendo ya experimentado un gran aumento de daños por el clima extremo en las últimas décadas. Es probable que la intensidad y la naturaleza de dichos impactos varíen en gran medida según la región"[7]
[Chalmers, 2014, p. 4]

Introduzione metodologica
La necessità di una lettura sistemica degli effetti e dei potenziali impatti dovuti al cambiamento climatico, può essere intesa in termini *multilayer*, incorporando e sovrapponendo funzioni e relazioni tra componenti materiali e immateriali che costituiscono l'ambiente costruito.

Il nodo centrale è *decifrare* le caratteristiche che determinano la qualità dell'ambiente costruito, costretto a convivere, nei prossimi decenni, con eventi estremi, quali precipitazioni intense, alluvioni e ondate di calore, tipici della Regione Mediterranea.

Dati allarmati provengono dall'Agenzia Europea dell'Ambiente EEA, che ha pubblicato un report sui danni causati dagli eventi climatici e meteorologici estremi. Il report rileva che, tra il 1980 e il 2020, i disastri naturali in Europa hanno causato la morte di circa 140 mila persone e danni finanziari per oltre 520 miliardi di euro.
In particolare, la quota maggiore delle ripercussioni economiche è stata causata dalle inondazioni (circa il 40%), seguite dalle tempeste di vento (25%), dalla siccità (circa il 10%) e dalle ondate di caldo (circa il 5%) [EEA, 2022].
Questa rassegna dei *macro* fenomeni associati ai cambiamenti climatici evidenzia gli sforzi per rivedere concretamente gli approcci alle diverse scale della progettazione al fine di un innalzamento prestazionale della risposta dell'ambiente costruito ai diversi impatti ed eventi estremi.È noto come la strutturazione e l'organizzazione fisico-spaziale di ambienti costruiti, ad esempio come quello delle città, non solo siano sempre più complessi, ma spesso si rivelino scarsamente congruenti ai funzionamenti microclimatici dei contesti, subendone gli esiti e influenzando in modo sostanziale la qualità sia del costruito che degli spazi di relazione. Se in passato la città era progettata per essere costituita da edifici che sfruttavano i benefici del clima, oggi la città sembra essere formata da un denso insieme di edifici caratterizzati da un'omogeneità di materiali (anche a basso costo) e di forma, senza tenere in considerazione delle influenze microclimatiche esterne e interne.
Appare quindi chiaro che, per promuovere la ricerca e l'innovazione in tema di cambiamenti climatici, è indispensabile indagare sugli effetti che questo provoca sull'ambiente costruito e di come le variazioni climatiche e, in particolar modo quelle microclimatiche, dipendono da fattori caratterizzanti (morfologici, tecnologici, fisici) propri degli edifici.

In questo contesto, si vuole mettere in evidenza come un elemento apparentemente 'lontano' dalla scala delle relazioni macro-dinamiche di una città, ovvero l'involucro edilizio (a cui viene dedicato il Cap. 4), sia riconosciuto come uno dei maggiori driver del ciclo energetico e giochi un ruolo fondamentale nell'amplificare fenomeni di cambiamento climatico, come l'innalzamento della temperatura [Milardi, 2021].

In generale, si può affermare che gli edifici hanno una lunga durata, superiore ai 50 anni e, per questo motivo, risulta importante poter analizzare come gli edifici risponderanno ai cambiamenti climatici rispetto alle previsioni degli scenari climatici e valutare i potenziali cambiamenti anche nell'uso dell'energia [Wong, et al., 2010].
In tal senso, gli edifici costruiti oggi devono essere progettati in funzione del clima attuale e in previsione di quello futuro [De Wilde & Coley, 2012]. Ciò ha generato un aumento di

studi, approcci, sviluppi di ricerca che mirano a simulare scenari, proporre soluzioni progettuali e valutare prestazioni tecnologiche e ambientali, definire metodologie, procedure e strumenti operativi in grado di indirizzare gli interventi sull'ambiente costruito verso adeguati gradi di *Adaptive and Resilient Climate Design* in relazione al rischio climatico, secondo un approccio eco-sistemico, procedurale e di innovazione tecnologica [Zinn, Fitzsimons, 2014].

Sebbene, la valutazione e la misurazione delle prestazioni degli edifici risulta difficoltosa, poiché ogni elemento del sistema edificio presenta le proprie vulnerabilità a stress specifici e mutevoli (dovuti a cause antropiche e naturali), risulta indispensabile conoscere almeno le caratteristiche che ne determinano la stabilità, affinché queste siano progettate adeguatamente evitando potenziali rischi che possono compromettere la stabilità dell'intero sistema.
Tuttavia, nella progettazione, le scelte dei progettisti non devono riguardare principalmente i requisiti strutturali degli edifici, bensì selezionare, attraverso l'analisi e il confronto, i diversi componenti che concorrono alla realizzazione degli edifici, prendendo in considerazione i parametri e le possibili sollecitazioni climatiche del contesto [Žigart, et al., 2018].
In considerazione delle crescenti problematiche ambientali, che *legano* e *collegano* l'edificio al contesto climatico ambientale di riferimento, l'innovazione del processo progettuale e produttivo deve spingersi verso la costruzione di materiali ed elementi tecnici innovativi che ottimizzino le prestazioni ambientali.

Dopo tale premessa, l'analisi delle implicazioni degli impatti del cambiamento climatico nelle complesse interazioni tra gli edifici è il focus attorno al quale ruotano le attività di simulazione e testing rispetto agli step della ricerca.
Questo lavoro vuole però concentrarsi sulla discussione non solo sugli impatti che il cambiamento climatico comporta agli edifici (climate change *versus* building envelope) ma sulla loro relazione inversa, ovvero gli edifici come elementi che possono amplificare gli impatti e innescare i fenomeni del cambiamento climatico (building envelope *versus* climate change).

Lo studio dei fenomeni climatici alla scala dell'edificio intende costituire un avanzamento sia rispetto alle possibilità di miglioramento dei singoli edifici e per un'ottimizzazione del comportamento globale del sistema e sia per indirizzare strategie e azioni sperimentali per aumentare la qualità ambientale, compromessa oggi dai cambiamenti climatici.
Si intende così sviluppare una nuova lettura della relazione cambiamento climatico e involucro edilizio, al fine di comprendere le differenti azioni di 'innesco' e 'passività'.

Le domande centrali affrontate in questo studio sono le seguenti:
1) *Quali sono i potenziali impatti dei cambiamenti climatici sui materiali che caratterizzano l'involucro edilizio?*

2) *In che modo l'involucro edilizio può innescare variazioni microclimatiche?*

I termini della lettura
Per restringere il campo di indagine della ricerca, l'attenzione si focalizza sugli edifici che stanno assumendo un ruolo sempre più determinante nella prospettiva di superare le crescenti problematiche ambientali ed energetiche.
La duplice funzione degli edifici viene qui studiata da un lato come elementi che subiscono gli effetti indesiderati del cambiamento climatico, dall'altro come elementi che sono in grado accrescere e innescare variazioni microclimatiche.

Un termine che acquisisce un particolare e rilevante significato è l'avverbio latino *versus* (verso) a sua volta derivato del verbo *verto*, cioè voltare, volgere. In questo contesto, infatti non ci si riferisce al significato *negativo* (derivato dall'etimologia della parola) 'in confronto a, in opposizione a, contro' ma ad un'accezione positiva (di derivazione latina) 'verso, in direzione di, alla volta di', indicando quindi un orientamento, un indirizzo verso un cambiamento o una trasformazione.
Riferendosi alla relazione dinamica tra cambiamento climatico e involucro edilizio, questa non viene intesa come una relazione di confitto (contro), al contrario, si considera la positività attraverso la quale, un involucro edilizio non è più visto come un elemento in controtendenza, ma come un elemento che si oppone in modo positivo (in direzione di) e controlla/regola i diversi effetti del cambiamento climatico in un dato contesto.

Si configura così, l'aspetto *caratteristico* di un edificio che può assumersi una volta come *target* e una volta come *sorgente*. Per edificio 'target', si vuole intendere un edificio che subisce gli impatti dovuti agli effetti del cambiamento climatico (climate change *versus* building envelope) e diventa 'sorgente' quando ha la possibilità di reagire e ridurre al minimo la sua vulnerabilità in caso di eventi metereologici estremi (building envelope *versus* climate change).
Al fine di chiarire meglio questo concetto, basterebbe prendere in prestito alcuni termini relativi al linguaggio canonico della progettazione di tipo bioclimatica quali, *intercettazione* (della sollecitazione negativa) e *captazione* (della sollecitazione positiva), risultando delle funzioni che vengono svolte dallo stesso elemento tecnologico [Lucarelli, et al., 2020] ma che spesso non risulta essere capace di gestire la complessità fenomenica a cui è sottoposto.
Da quanto sopra emerso, risulta utile elaborare una *lettura innovativa e dinamica*, che possa coniugare informazioni reperibili del contesto ambientale con le indicazioni sulle prestazioni tecnologiche e il controllo degli edifici in regime di cambiamento climatico. La specificità di questo lavoro vuole configurarsi nella definizione di un quadro di conoscenze utili a svolgere le fasi successive della ricerca fino alle azioni applicative-sperimentali da proporre.

I paragrafi che seguono sostanziano questi concetti.

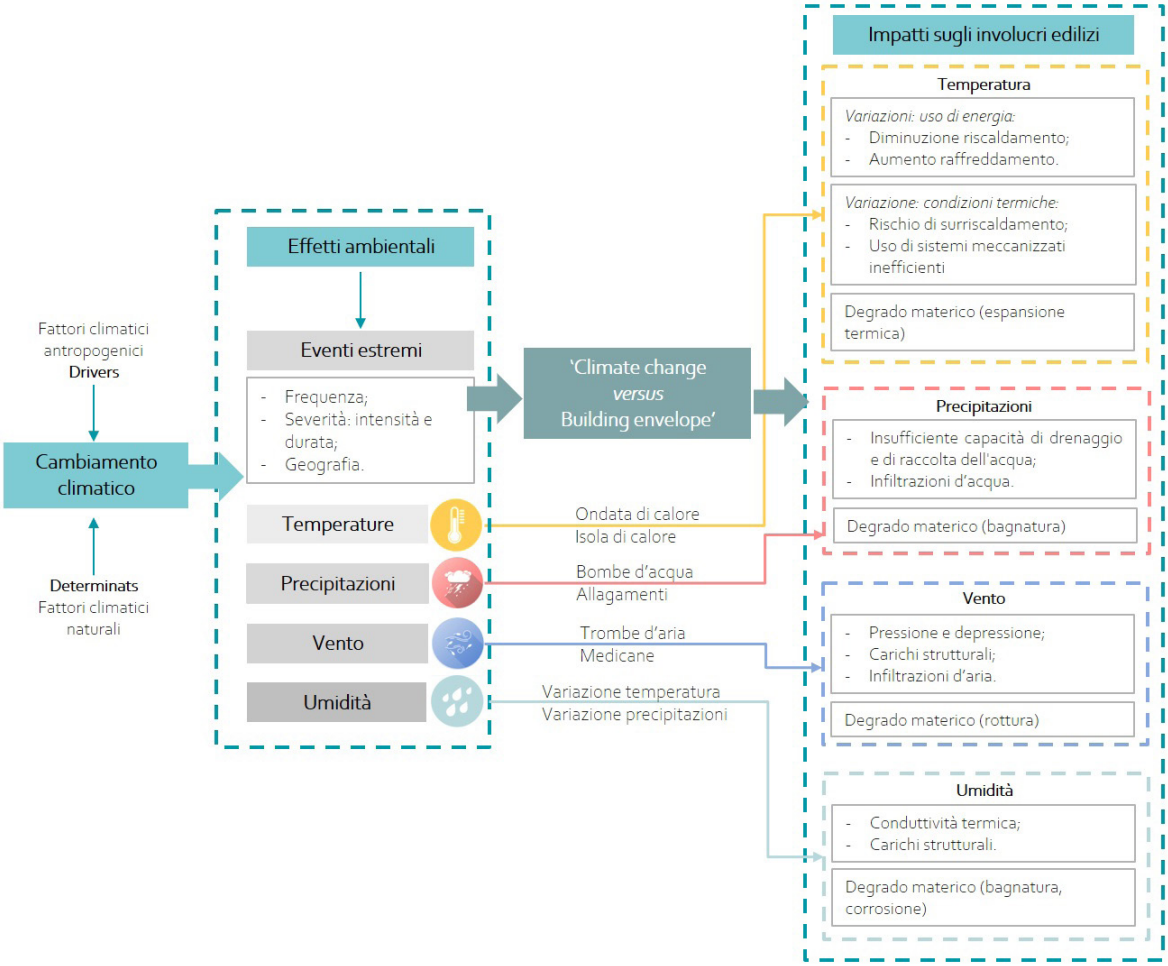
3.2.1 Climate change *versus* building envelope

"Climate change presents not only changes in weather conditions
but also imposes uncertainties on building performance."[8]
[Laminou, et al., 2019, p. 1425]

Come introdotto, effetti come l'innalzamento delle temperature e l'aumento delle precipitazioni intense, stanno apportando sostanziali modifiche sull'ambiente costruito e portano a riflettere su come rinnovare le nostre città al fine di migliorare la qualità delle condizioni ambientali. La casistica dei diversi effetti del cambiamento climatico come ondate di calore (a causa dell'aumento di calore delle superfici artificiali), precipitazioni intense, la maggiore frequenza e intensità di raffiche di vento, nonché i cicloni Medicanes (nella Regione Mediterranea) tracciano in modo inequivocabile la loro influenza sugli edifici, i quali affrontano i maggiori rischi derivanti da questi fenomeni, incidendo negativamente sul loro comportamento e funzionamento prestazionale.
Ad esempio, gli edifici esistenti (anche storici) in cemento armato (uno dei materiali più utilizzati per le costruzioni della Regione Mediterranea) si rivelano spesso carenti nella mitigazione degli stress termici e nel mantenimento delle condizioni favorevoli della ventilazione: forma, funzione, tecnologia e orientazione sono i principali fattori che devono essere presi in considerazione per un'adeguata progettazione.

È su questi aspetti che si delinea la relazione 'Climate change versus Building envelope', configurando l'esigenza di un approccio climatico-tecnologico delle azioni progettuali.
Il cambiamento climatico è ancora un ambito di studio aperto e gli edifici costituiscono un'interfaccia tra l'ambiente interno e l'ambiente esterno che è soggetto ai diversi fenomeni del cambiamento climatico.
Lo schema riassuntivo [Fig. 3.2], vuole mettere in evidenza questa complessa relazione e identificare da un lato gli effetti del cambiamento climatico più frequenti della Regione Mediterranea collegandoli con i probabili impatti sugli edifici.

Fig. 3.2. 'Climate change versus Building envelope': Impatti dei cambiamenti climatici sugli involucri edilizi. Elaborazione a cura della Dottoranda E. Grillo



Vengono presi in considerazione i possibili impatti derivanti da temperature estreme, precipitazioni intense, aumento della velocità del vento e dell'umidità:

- *Temperature estreme*: l'innalzamento della temperatura sopra la media globale potrebbe comportare un beneficio (in termini economici e efficienza energetica) nella stagione invernale dovuto ad una riduzione dell'accensione degli impianti di riscaldamento mentre nella stagione estiva assume un'inversione di rotta in quanto il bisogno di raffrescamento all'interno degli edifici aumenta il consumo energetico e, di conseguenza un ulteriore im-

missione di Co2 in atmosfera. Le temperature estreme sulle superfici esterne degli edifici, comprese parete verticali, copertura e sugli elementi vetrati, come gli infissi, influenzano direttamente le caratteristiche prestazionale dei materiali di cui sono fatti, che può contribuire a un decadimento prestazionale globale del sistema edificio.
In generale, per gli edifici della Regione Mediterranea è importante tenere in considerazione un adeguato isolamento termico al fine di avere una buona trasmittanza termica, sebbene questo parametro non sia l'unico a garantire un adeguato comfort interno;

- *Precipitazioni intense*: sempre più spesso si utilizza il termine *bomba d'acqua*[9] per indicare fenomeni di precipitazione intensa (l'intensità di una precipitazione è il parametro significativo e caratterizzante la pericolosità di questi eventi) [Fig. 3.3].



Fig. 3.3. Bomba d'acqua a Cagliari, settembre 2021

Il termine bomba d'acqua è utilizzato per identificare le precipitazioni con intensità superiore ai 100mm/hr, ben più forti rispetto ad un semplice nubifragio. Durante queste piogge intense, la capacità di drenaggio dei sistemi di raccolta delle acque piovane può non rivelarsi idonea a contenere questa quantità d'acqua precipitata in un arco di tempo breve.
A causa di questa elevata intensità spesso le strutture di drenaggio sia naturale che soprattutto artificiale, a scala dell'ambiente costruito, non riescono a smaltire la portata di acqua in arrivo e pertanto essa si accumula in superficie causando allagamenti, danni alle tubazioni della rete fognaria. In inverno e nelle aree montuose, gli accumuli delle precipitazioni combinati al rialzo del limite delle nevicate aumenta la percentuale di precipitazione e ne accelera pertanto il deflusso.

A scala dell'edificio, bisognerebbe controllare la capacità di drenaggio del sistema di allontanamento delle acque piovane, la cui dimensione è direttamente collegata alla portata d'acqua di uno specifico luogo. Per ridurre il volume d'acqua, durante una precipitazione intensa che è a sua volta concausa di possibili allagamenti, gli edifici dovrebbero essere dotati di un canale di scolo con capacità idraulica maggiore rispetto alle precipitazioni previste per evitare allagamenti e un difficile smaltimento dell'acqua.

L'errata dimensione del sistema di raccolta e l'installazione del canale di scolo ad una pendenza sbagliata rappresentano due fattori che rendono difficoltoso il passaggio del flusso dell'acqua con il conseguente ristagno del liquido. Inoltre, queste piogge aumentano i problemi legati alle infiltrazioni che, se non adeguatamente risolti, possono causare danni più importanti relativi alle strutture, al degrado dei materiali con diminuzione del comfort abitativo.
Le sollecitazioni dinamiche e fisiche cui sono sottoposte le strutture da impermeabilizzare (come coperture, terrazzi, balconi) implicano che lo strato impermeabilizzante possegga elevate caratteristiche prestazionali, in quanto non solo deve garantire l'impermeabilità, ma deve anche aumentare la durabilità della struttura assecondandola nelle sue deformazioni. Queste funzioni devono essere garantire anche dalle superfici esterne dell'edificio dove risulta di fondamentale importanza la corretta posa in opera dei materiali che fungono anche da impermeabilizzanti, soprattutto nei punti critici, ad esempio nelle connessioni parete e infisso. Quest'ultimo considerato un punto critico per le infiltrazioni d'acqua.
Oltre alle bombe d'acqua, un fenomeno da non sottovalutare come intensificazione delle precipitazioni estreme, è la *grandine*[10] che rappresenta una forma di precipitazione allo stato solido; più precisamente è composta da cristalli di ghiaccio, di dimensioni e forma variabili.
A seconda delle dimensioni, la grandine può causare danni diretti ai componenti vetrati (più fragili) o al manto di copertura [Fig. 3.4], di conseguenza si può assistere anche in questo a infiltrazioni d'acqua all'interno dell'edificio, contribuendo alla riduzione delle performance di permeabilità all'aria;



Fig. 3.4. Danni causati da grandine, Liguria 2022

- *Aumento della velocità del vento*: il vento, la cui direzione si considera generalmente orizzontale, esercita sugli edifici delle azioni che variano nel tempo e nello spazio provocando effetti dinamici, quali vibrazioni trasversali, agendo negativamente sui carichi strutturali (condizioni estreme).
Le azioni statiche del vento invece sono costituite da pressioni e depressioni agenti normal-

mente alle superfici, esterne che interne, degli elementi che compongono l'edificio.
Le superfici esterne di un qualsiasi edificio, possono essere investite direttamente o indirettamente dall'azione del vento. In particolare, possono essere soggette a pressioni o depressioni individuando così le superfici sopravento, cioè quelle superfici investite in maniera diretta dal vento e le superfici sottovento, ovvero quelle superfici non investite in maniera diretta dal vento o investite da vento radente.
Nel caso delle superfici verticali di un edificio, quelle tipo sopravento sono sempre soggette a azione di pressione e quelle sottovento sono sempre soggette ad azione di depressione. Nel caso di superfici inclinate, invece, considerando l'azione del vento parallela al suolo, le superfici sopravento possono essere soggette sia a pressione che depressione.
Questi fattori incidono sulla direzione e sull'intensità del flusso d'aria sulle superfici esterne degli edifici. L'effetto del vento sugli edifici può causare infiltrazioni d'aria indesiderate, che possono portare ad un maggiore consumo di energia, ventilazione e condensazione, con conseguente scarso confort abitativo. In particolari situazioni metereologiche, possono formarsi le *trombe d'aria*[11], che a seconda della sua intensità può comportare una rottura dei vetri degli infissi, scoperchiamento totale dei tetti o lesioni alle strutture degli edifici (condizioni estreme), In questi casi, le trombe d'aria possono causare sradicamenti degli alberi, con conseguenze disastrose sul sistema edificio;

- *Aumento dell'umidità*: sebbene vi siano diverse cause che caratterizzano l'insorgenza di questo fenomeno, l'umidità combinata con temperature elevate è una componente di corrosione metallica, a carico del sistema strutturale di un edificio (condizioni estreme).
Un'altra problematica riguarda l'aumento in modo significativo la conduttività termica delle murature con conseguenti perdite, del grado di isolamento termico dall'ambiente esterno. Inoltre, quando l'umidità condensa diventa energia ed è quella che causa eventi di pioggia.

Rispetto questa sintetica disamina, si può dichiarare che i fattori di cambiamento climatico che possono avere un diretto impatto, in particolar modo, sulle superfici esterne degli edifici, quindi sull'involucro, includono:

1. una maggiore radiazione solare che si traduce in livelli alti di temperatura superficiale esterna, che combinata con la temperatura alta dell'aria esterna, comporta cambiamenti nella frequenza, intensità e quindi longevità di isola di calore e ondate di calore, contribuendo all'intensificazione del fenomeno delle temperature estreme;

2. i cambiamenti nei modelli di precipitazione possono anche aumentare il numero di volte in cui i diversi componenti degli edifici, possono subire bagnatura e essiccazione e aumentare così la penetrazione del gelo;

3. aumento della frequenza e dell'intensità degli eventi di vento forte, con il rischio di formazione di trombe d'aria che aumentano il rischio di danno diretto da rottura per i componenti degli edifici;

4. spostamenti nei picchi e frequenza di alti livelli di umidità che possono contribuire al deterioramento prematuro o accelerato della parte strutturale dell'edificio visto che è un fenomeno che ha conseguenze molto impattanti se combinato (e anche causato) dall'innalzamento delle temperature e dagli eventi di pioggia.

Questi impatti quindi contribuiscono singolarmente ad un decadimento prestazionale dell'involucro edilizio e se combinati con altri fenomeni, ad esempio vento-pioggia, temperatura-umidità, questi hanno un effetto moltiplicatore, che aggravano ulteriormente il

rischio di danni agli edifici.
Come sostenuto da Nijland [Nijland, et al., 2010] indipendentemente dalla causa del cambiamento climatico, le variazioni nei parametri climatici analizzati possono influenzare le prestazioni dei materiali sia da soli che in combinazione.
Come si evince, un aspetto di fondamentale importanza che comprende i diversi cambiamenti nella temperatura, nei livelli di umidità e nelle forme di precipitazione che agiscono sui sistemi di involucro, è che questi possono portare a cambiamenti dimensionali dei materiali, quindi impatti negativi che a loro volta possono causare fessurazioni con riduzione della resistenza localizzata del materiale.
L'andamento continuo di queste sollecitazioni e stress (non solo termici) sull'involucro riduce altresì il sistema di reazione e di risposta dei materiali, mettendo in evidenza l'esigenza di una lettura sistematica della relazione tra materiali e velocità di risposta, che prescinde un'analisi delle caratteristiche materiche e la velocità attraverso la quale un materiale è in grado di rispondere alla propagazione all'impatto.
A tal proposito, le fessurazioni possono essere ricondotte a diverse cause che includono un assorbimento disomogeneo dell'umidità per via dell'escursione termica, un'esposizione prolungata alle temperature (anche per via di un incendio) e corrosione di travi e pilastri che mettono a repentaglio la sicurezza strutturale dell'edificio e quella degli occupanti.
Progettare quindi tenendo conto di condizioni variabili nel tempo è un imperativo a cui oggi dobbiamo sottostare tenendo sempre conto delle fonti di incertezza degli scenari climatici.

In risposta alla domanda sopra riportata:
Quali sono i potenziali impatti dei cambiamenti climatici sui materiali che caratterizzano l'involucro edilizio?
risulta necessario delineare sinteticamente le tendenze generali degli impatti rispetto ai diversi eventi estremi analizzati per la Regione Mediterranea quali, temperature estreme, precipitazioni intense, carico da vento e umidità (Cfr. Cap. 2) che possono influenzare la durabilità dei materiali che costituiscono gli edifici.
L'attenzione si concentra sui possibili impatti nei materiali da costruzione maggiormente utilizzati nella Regione Mediterranea, quali calcestruzzo, ferro, vetro, materie plastiche [Fig. 3.5].
Si vuole sottolineare che è una lettura generica d'insieme, in quanto risultano mancanti dati importanti sull'impatto, sui materiali specifici e sugli effetti. Ad esempio, l'effetto di vari regimi di temperatura sul coefficiente di assorbimento d'acqua dei comuni materiali da costruzione, in particolare per le superfici di rivestimento dell'involucro, non è stato adeguatamente studiato, ma è di grande importanza per determinare il meccanismo di degrado all'interno del singolo materiale [Mukhopadhyaya, et al., 2002; Karagiannis, et al., 2016]. Un'altra delle principali carenze per la stima dell'impatto dell'innalzamento della temperatura è la mancanza di una lettura complessiva e quindi di un'integrazione degli strumenti di simulazione e monitoraggio dei flussi termici con i metodi di analisi strutturale, in cui vengono valutate non solo le condizioni strutturali ma anche le interazioni tra danni strutturali e degrado dei materiali [Cavalagli, et al., 2019].

In generale, un aspetto che limita una stima quantitativa dei possibili danni ai materiali è di incrociare le caratteristiche prestazionali dei singoli materiali con le proiezioni climatiche rispetto al clima futuro. In aggiunta, esistono incertezze sul modo in cui i cambiamenti climatici influenzeranno gli effetti dell'azione sui materiali, sui componenti strutturali e sui sistemi di costruzione.
Rispetto a questa problematica, vengono prese in considerazione due soluzioni: la prima consiste nel modificare la composizione dei materiali delle strutture e la loro robustezza strutturale per adattarsi ai cambiamenti attesi nelle condizioni operative; la seconda si ri-

Nella pagina accanto

Fig. 3.5. Problematiche relative alla durabilità di alcuni materiali a causa dell'effetto degli eventi estremi. Elaborazione a cura della Dottoranda E. Grillo

Materiali	Calcestruzzo	Ferro	Vetro	M. Plastiche
Problematiche relative alla durabilità dei materiali	- Corrosione dell'armatura; - Carbonatazione; - Attacco chimico e salino	- Variazione dei meccanismi di corrosione	- Guasti nelle guarnizioni; - Deterioramento a causa della radiazione UV ; - Espansione per stress termico	- Deterioramento a causa della radiazione UV; - Invecchiamento termico; - Espansione termica
Condizioni estreme	- Sicurezza strutturale; - Perdita requisiti resistenza al fuoco	- Sicurezza strutturale; - Perdita requisiti resistenza al fuoco	- Rottura; - Cedimenti guarnizioni; - Perdita requisiti di resistenza al fuoco, all'aria e all'acqua	- Rottura; - Perdita requisiti di resistenza al fuoco, all'aria
Eventi estremi	- Temperature; - Precipitazioni; - Effetto combinato di temperature e precipitazioni	- Temperature; - Precipitazioni	- Temperature; - Precipitazioni; - Effetto combinato di temperature e Umidità; - Effetto combinato Precipitazioni e Vento	- Temperature; - Effetto combinato di temperature e Umidità

ferisce a un aumento della manutenzione per raggiungere la durata di vita prevista delle strutture o dei prodotti da costruzione [Athanasopoulou, et al., 2020].

I possibili impatti del cambiamento climatico che incidono sulla durabilità dei materiali degli edifici sono riferiti a:

- *Temperature estreme:* possono provocare deformazioni termiche differenziate, cioè non omogenee e non simultanee, che si producono nei vari materiali a causa di variazioni della temperatura ambientale, provocando, negli stati limite, tensioni che a loro volta possono comportare la rottura del materiale stesso. La crescita delle temperature attesa nella Regione Mediterranea nei prossimi anni ha la capacità di accelerare il processo di corrosione delle strutture in acciaio o delle barre d'acciaio presenti all'interno del cemento armato, minandone l'azione di resistenza e quindi mettendo a repentaglio la sicurezza degli edifici. L'aumento della frequenza e dell'entità delle ondate di calore potrebbe avere un impatto sulle strutture sensibili alla temperatura e sui loro componenti (ad esempio sui ponti e sui loro appoggi e sui giunti di dilatazione) e potrebbe incidere sulle sollecitazioni e sulle variazioni di volume nelle strutture non vincolate. Questa variazione può verificarsi anche quando vi è un aumento di temperatura all'ombra [Markova, 2021];

- *Precipitazioni intese*: possono provocare infiltrazioni d'acqua all'interno dell'edificio, a seconda delle caratteristiche di igroscopicità del materiale. I materiali che subiscono frequentemente bagnatura e asciugatura sono più esposti alla penetrazione del gelo.
Un fattore che amplifica questo impatti è la pressione esercitata del vento che facilita le

lesioni delle superfici esterne di un edificio, contribuendo alla problematica relativa alle infiltrazioni d'acqua. Tuttavia, l'acqua piovana assorbita dalla superficie esterna tenderà, almeno nei materiali macro-porosi durevoli, a drenare verso la base [Richardson, 2002]. L'effetto di un maggiore deflusso potenziale è difficile da valutare. I cambiamenti climatici influenzano anche la frequenza dei cicli di gelo-disgelo [Grossi, et. al., 2007] che producono sollecitazioni meccaniche sulle superfici, causando il suo degrado;

- *Aumento della velocità del vento*: che provoca un aumento degli effetti soprattutto negli edifici alti, accelerare i meccanismi di danneggiamento, come lesioni o rotture, incidendo sul calo di livello prestazionale dei materiali, soprattutto se il carico da vento è in combinazione con una maggiore quantità e intensità di pioggia;

- *Aumento dell'umidità*: le temperature più elevate e le maggiori precipitazioni influenzeranno l'umidità atmosferica e relativa, con effetti diretti e interferenze saline, in misura maggiore sui materiali edilizi porosi. Questa condizione non solo facilita l'ingresso di altri agenti aggressivi (come le polveri), ma può causare dei rigonfiamenti con la conseguenza di possibili distacchi del materiale dalla struttura di supporto. Le fluttuazioni del contenuto di umidità causano variazioni dimensionali che spiegano alcuni dei problemi di movimento strutturale [Richardson, 2002].

Da quanto sopra riportato, il cambiamento climatico avrà un effetto sul tasso di degrado dei materiali da costruzione e, nel peggiore dei casi, porterà ad un'accelerazione del decadimento dei materiali, che aumenterà il livello di manutenzione necessario per sostenere gli edifici senza difetti [Phillipson, et al., 2016]. Gli impatti dei singoli fenomeni climatici analizzati possono rafforzarsi a vicenda, come nel caso si una combinazione di temperature più elevate e precipitazioni intense, che esacerbano il danneggiamento dei materiali da costruzione [Nijland, et al., 2010].
È opportuno ribadire che non si tratta di una misurazione diretta o una stima quantitativa dei diversi fenomeni analizzati per la Regione Mediterranea su differenti materiali da costruzione, ma un'indagine basata sulla letteratura di settore che mette in evidenza le possibili azioni future della ricerca stessa in contrasto agli effetti del cambiamento climatico sugli involucri edilizi. In situazioni complesse definite da un quadro climatico incerto e da edifici che già presentano livelli bassi di performance, la costruzione di un protocollo di intervento o di previsione del rischio potrebbe risultare inadeguato o insufficiente per la quantificazione degli impatti; al contempo, questo protocollo potrebbe stimare almeno approssimativamente gli eventuali danni da impatto dovuti agli effetti del cambiamento climatico di una specifica zona e indirizzare misure adattive-preventive.

Un aspetto a cui si vuole dare importanza - in questo contesto e nella lettura degli impatti del cambiamento climatico sull'involucro edilizio, quindi 'Climate change *versus* Building envelope' – è che i materiali hanno una grande *responsabilità* su due livelli: il primo, livello di qualità, che riguarda la loro influenza sui possibili guasti, difetti e impatti dell'involucro, mentre il secondo, livello di azione, è legato alla loro capacità di reagire ai diversi fenomeni climatici, adeguando la risposta in relazione al contesto ambientale.
Ciò implica da un lato, la conoscenza delle possibili condizioni estreme del contesto ambientale, dall'altro una spinta innovativa che vede al centro dell'attenzione le caratteristiche tecnologiche dei materiali da costruzione.
I notevoli progressi nelle tecnologie dei materiali, difatti, stanno consentendo la realizzazione di involucri sempre più performanti, caratterizzati da molteplici elementi e componenti che attraverso meccanismi di retro-azione sono in grado di gestire e controllare il comportamento dell'involucro [Newton, et al., 2009].

L'incremento del livello di innovazione permetterà all'involucro edilizio di adattarsi alle mutevoli situazioni associate alla continua evoluzione delle proiezioni climatiche, reagendo così agli shock dovuti ad eventi più o meno impattanti.

In questo caso, la declinazione 'Climate change *versus* Building envelope', intende evidenziare la necessità di dati e modelli dei fenomeni climatici che siano in grado di leggere sistematicamente gli impatti sugli involucri edilizi, al fine di stabilire e avere la possibilità di implementare le caratteristiche prestazionali non solo dei materiali da costruzione, ma della risposta globale del sistema involucro. Questo approccio è anche legato alla necessità di un controllo 'misurabile'. Il controllo 'misurabile' sembra essere proprio il risultato di uno scambio di flussi tra ambienti diversi, come ad esempio quello che si crea tra edificio e il suo contesto e influenza in modo interdipendente il microclima dello spazio urbano.
Man mano che gli effetti del cambiamento climatico divengono sempre più frequenti, occorre un approccio più ampio al '*problema che richiede tecniche olistiche per soluzioni ambientali a lungo termine al patrimonio edilizio esistente e agli spazi esterni circostanti*' [Dernie, & Gaspari, 2015, p. 717]. L'attenzione rivolta all'ambiente costruito, nelle sue componenti antropiche e naturali, e alle prestazioni ambientali, delinea uno scenario non ancora completamente esplorato in termini scientifici.

'*Pertanto, l'economia degli edifici del cambiamento climatico dovrebbe essere trattata all'interno di un quadro analitico dinamico che consenta esplicitamente i cambiamenti nei set di informazioni nel tempo*' [Nordvik, V., & Lisø, 2004, p. 765].

Tuttavia, al fine di mitigare le problematiche riscontrabili all'interno di un contesto ambientale e attuare azioni strategiche di adattamento, come richiesto dalle Direttive Europee, si ha la necessità di fare un passaggio di scala notevole e analizzare in maniera più dettagliata gli edifici che compongono lo spazio urbano, non singolarmente, ma mettendoli in relazione con il contesto in cui sono collocati.

Gli obiettivi sembrano spingersi quindi, sulla riduzione dell'impatto sull'ambiente del settore delle costruzioni e sulla progettazione o riprogettazione di edifici che siano in grado di rispondere in modo efficace alla variabilità del clima e, al tempo stesso, di limitare gli effetti negativi e gli impatti sull'ambiente costruito.
Sebbene sia sempre più richiesta la definizione di strategie e tecnologie innovative per limitare gli impatti sul costruito, bisogna tenere in considerazione che è lo stesso ambiente costruito a determinare lo sviluppo di dinamiche di stress climatici da mitigare e, ove possibile, annullare nel loro insorgere (Building envelope *versus* Climate change).

3.2.2 Building envelope *versus* Climate change

"While structures are generally not specifically designed
for these unexpected events, this may probably cause collapse during their service-life.
There is also a probability that the expected hazard nature will change throughout a building life span."[12]
[Yassaghi, & Hoque, 2019, p. 7]

In questo contesto, l'involucro edilizio – inteso come la 'prima linea' dell'interazione tra la costruzione dell'edificio e agenti ambientali – diviene protagonista per la corretta gestione dei flussi materici ed energetici sia in entrata che in uscita, le cui prestazioni ambientali dipendono dalle specifiche caratteristiche del contesto, dalla forma, dall'esposizione, dalla scelta dei materiali, dalle dimensioni delle aperture.
Si può affermare difatti, che l'involucro è responsabile di diverse funzioni principali quali, supporto strutturale dell'edificio, gestione dell'umidità, della temperatura, del flusso d'aria

e d'acqua. Questo panorama sembra quindi dare la giusta importanza non solo ai materiali utilizzati ma anche alla loro corretta installazione, in riferimento ad una corretta contestualizzazione, al fine di realizzare un controllo efficiente e una gestione delle risposte performanti dalla scala dell'involucro edilizio fino all'ambiente costruito, producendo così un '*effetto matrioska*'[13].
La metafora della matrioska è uno strumento che consente di rafforzare e spiegare il concetto di come avviene il passaggio di scala da un determinato contesto urbano (contenitore), come quello della Regione del Mediterraneo, all'involucro edilizio (contenuto) [Milardi, et al., 2021] analizzando le complesse relazioni esistenti tra edificio-contesto (uno degli obiettivi della ricerca) al fine di definire delle soluzioni tecnologiche-ambientali che possano limitare il verificarsi di fenomeni sempre più estremi.
Concentrandosi sugli impatti innescati dagli involucri edilizi sul microclima esterno, gli stessi involucri contribuiscono ad un impatto diretto sulle temperature dell'aria esterna nelle loro immediate vicinanze, un effetto che si acuisce con il caldo estremo delle città [ARUP, 2018].

Nel contesto della presente ricerca, il microclima viene definito come le condizioni che influenzano il trasferimento di calore e umidità nelle immediate vicinanze della superficie esterna dell'involucro edilizio. In termini più generali è caratterizzato da una serie di variabili che descrivono lo stato termodinamico e dinamico dell'atmosfera, cioè radiazione, temperatura, umidità, velocità del vento e pressione (densità) [Rotach, & Calanca, 2003].
Nello specifico, nella Regione del Mediterraneo, è necessario controllare l'apporto di calore solare negli involucri edilizi, specie nella stagione estiva, sia per mantenere la temperatura interna a un livello confortevole, sia per mitigare il fenomeno noto dell'isola di calore urbano. Questo fenomeno è facilitato dalla maggiore concentrazione di inquinanti esterni e dal consumo energetico dell'impianto di condizionamento [Schettini, et al., 2016].
In questo panorama, la risposta alle elevate temperature è l'utilizzo di sistemi meccanizzati di raffreddamento che, provocando l'immissione di aria calda nell'ambiente esterno (e di conseguenza un ulteriore aumento della temperatura dell'aria esterna), rappresenta una delle cause che modifica le condizioni microclimatiche all'interno di un ambiente costruito. Il meccanismo più rilevante che influenza il microclima è lo scambio di radiazioni tra le superfici visto che, in situazioni urbane dense la radiazione netta sulle facciate degli edifici è maggiore rispetto a quella dei singoli volumi a causa delle riflessioni di più elementi [Allegrini, et al., 2012].
Con l'aumento delle temperature, l'effetto isola di calore è diventato un nuovo rischio climatico; ciò è dovuto agli effetti negativi dell'eccessivo calore notturno estivo nei centri urbani, soprattutto se combinato con le ondate di calore, che esacerbano lo stress da calore sperimentato dai residenti [Olivieri, 2022].
Questo fenomeno può essere amplificato quando è combinato alla presenza di materiali non idonei delle superfici che costituiscono le infrastrutture edilizie o i manti stradali e alla mancanza di vegetazione, il cui risultato è un decremento notevole delle condizioni di comfort dello spazio urbano. L'interazione degli involucri con la variabile climatica vento, potrebbe creare condizioni disagevoli anche per i pedoni a livello del suolo.
Questi effetti sono alquanto problematici negli involucri alti, in cui i venti ad alta velocità colpiscono il suolo e accelerano attorno all'edificio, con la conseguenza di creare condizioni negative di vento localizzate [Jayyaratnam, et al., 2017] che, in casi estremi, hanno implicazioni gravi in termini di danni.

Per avere una visione più ampia degli impatti degli involucri sul microclima e direttamente sul cambiamento climatico, quindi nella declinazione 'Building envelope *versus* climate change', bisogna tenere in considerazione che ogni opzione tecnologica produce effetti

diversi in termini di condizioni esterne a seconda dei materiali utilizzati per la superficie dell'involucro edilizio [Dernie, & Gaspari, 2015].
Uno studio sperimentale ha messo in evidenza come un materiale isolante a base di cellulosa ha leggermente aumentato la temperatura dell'aria esterna, dichiarando che è l'involucro stesso ad influire sui livelli di accumulo e rilascio di calore nell'ambiente esterno ed interno [Wonorahardjo, et al., 2022].

Secondo una ricerca sull'influenza di una facciata in vetro riflettente sul microclima dello spazio urbano, si è riscontrato che la temperatura dell'aria che circonda l'edificio analizzato, aumenta in modo significativo a causa dei molteplici riflessi del flusso di calore, con conseguente aumento della domanda di raffreddamento [Mehaoued, & Lartigue, 2019].
La ventilazione urbana ha una notevole influenza sulla qualità del microclima che circonda un edificio in termini di controllo dello stress termico e, in base all'altezza dell'edificio, può influenzare temperatura e umidità dell'aria.

Tuttavia, gli studi sull'effetto dei grandi edifici sulle aree circostanti sono molto limitati e generalmente si concentrano sull'effetto isola di calore [Nugroho, et al., 2022].
In generale, le ricerche su queste tematiche si spingono sulla valutazione dell'impatto per il miglioramento del microclima esterno con un approccio basato sulla misurazione delle prestazioni energetiche degli edifici, della trasmittanza termica con l'obiettivo di quantificare la migliore dimensione dell'insediamento edilizio in grado di ottimizzare la produzione di energia rinnovabile, le prestazioni stesse degli edifici e quindi di ridurne l'impatto ambientale [Cardinali, et al., 2020].
Utilizzare il solo parametro della trasmittanza termica per misurare il livello delle prestazioni di un edificio risulta molto riduttivo, in quanto implica la considerazione dell'energia stazionaria su dati climatici di lungo periodo e non tiene conto dell'imprevedibilità del clima [Milardi, et al., 2020].
La mancanza di informazioni sulle variazioni di umidità, sulle variazioni di temperatura durante il giorno rende impossibile valutare l'impatto dei cambiamenti climatici sull'uso di sistemi di raffreddamento a basso consumo energetico come la ventilazione naturale, il raffreddamento per evaporazione e il raffreddamento notturno [Xu, et al., 2012].

Dopo tale sintetica panoramica sull'influenza dell'involucro edilizio sul microclima esterno, si intende specificare come le condizioni delle superfici esterne dell'involucro derivano e influiscono sulle proprietà stesse dell'edificio e sugli effetti del cambiamento climatico.
In questo lavoro, non vengono trattati direttamente gli aspetti sul trasferimento di calore e umidità attraverso l'involucro edilizio, ma viene fornita una lettura che definisce un altro aspetto del cambiamento climatico, ovvero di come questo sia fortemente influenzato dall'involucro edilizio che a sua volta è caratterizzato da molteplici parametri (tecnologici, materici, fisici, morfologici) che possono accentuare o diminuire i fenomeni estremi che vengono presi in considerazione in questa ricerca.

Lo scopo è quello di sviluppare criteri di lettura ed 'esperimenti applicati' al fine di valutare non solo gli effetti del cambiamento climatico sugli edifici (Climate change *versus* Building envelope), ma anche come le caratteristiche materiche e prestazionali degli edifici possono influenzare e amplificare l'impatto dei fenomeni di cambiamento climatico e i rischi che ne derivano (Building envelope *versus* Climate change).
Questo per l'involucro edilizio significa evidenziare i suoi potenziali *limiti* in relazione agli effetti del cambiamento climatico (innalzamento delle temperature: shock termici, precipitazioni intense: bombe d'acqua, aumento della velocità del vento: carichi del vento) e verificare come l'involucro possa innescare e aggravare i fenomeni climatici, influenzando

così il microclima urbano.
In particolare, l'involucro edilizio – inteso come interfaccia capace di controllare le interazioni tra ambiente confinato e ambiente esterno – le cui superfici esterne sono maggiormente esposte alle sollecitazioni climatiche esterne, risulta in grado di incidere sulla qualità microclimatica dell'ambiente costruito e di assorbire o amplificare gli impatti che si generano in uno specifico contesto.
D'altro canto, questa complessa funzione potrebbe accrescere il rischio di favorire meccanismi di feedback positivi (Cfr. Cap. 1) con gravi implicazioni che interrompono le sinergie degli obiettivi di sviluppo sostenibile e peggiorano la sfida climatica in un circolo vizioso [Anukwonke, et al., 2022].

Per comprendere questi meccanismi nella relazione 'Building envelope *versus* Climate Change', si è pensato di scomporre idealmente un edificio nei suoi elementi principali come le superfici verticali esterne, le superfici vetrate e le superfici di copertura e studiarlo su diversi requisiti quali controllo del flusso termico, controllo del flusso luminoso, controllo del flusso d'acqua e controllo del flusso d'aria, per definire un quadro complessivo dei fenomeni da controllare e i possibili inneschi su variazioni microclimatiche che possono aumentare il verificarsi di eventi estremi [Allegato 1].
Si fa sempre riferimento a temperature estreme, precipitazioni intense, aumento della velocità e intensità del carico da vento e aumento dell'umidità, quest'ultima in combinazione con l'innalzamento della temperatura.

Attraverso questo processo si intendere rispondere alla seconda questione individuata:

In che modo l'involucro edilizio può innescare variazioni microclimatiche?

Il quadro che si delinea e costruito sotto forma di schede che possono essere implementabili rileva che:

- *Temperature estreme*: indipendentemente dai materiali che caratterizzano gli edifici, i diversi elementi contribuiscono a un aumento della temperatura interna per radiazione solare diretta; ciò comporta a un aumento nell'utilizzo di sistemi di ventilazione meccanica controllata con la problematica che si riversa nella qualità del microclima dello spazio urbano, ovvero la dissipazione del calore, che aumenta il fenomeno dell'ondata di calore e isola di calore. Inoltre, risulta necessario sostanziare alcuni aspetti problematici.
Come evidenziato nelle schede, le temperature estreme – con i conseguenti eventi estremi di ondate e isole di calore [Fig. 3.6] – risultano una problematica fondamentale per gli involucri edilizi, sia per il raggiungimento del comfort indoor, sia per la qualità microclimatica esterna che a sua volta è influenzata dalle caratteristiche tecnologiche e materiche dell'involucro edilizio;

- *Precipitazioni intense*: tuttavia, le temperature estreme non sono l'unico fattore problematico, ma a queste si aggiunge la pioggia battente[14], dovuta a precipitazioni intense e vento, che rappresenta una fonte di umidità per l'involucro edilizio.
È noto infatti che la bagnatura dell'involucro edilizio può causare problemi di durabilità dei materiali e di prestazioni. Roberts [2008] afferma che gli involucri edilizi devono essere adeguatamente progettati per consentire un facile drenaggio e una rapida asciugatura, attraverso l'utilizzo di materiali che accelerano il processo di essiccazione, con la possibilità di includere ulteriori fori di drenaggio per consentire all'acqua di defluire sul fondo della superficie verticale.

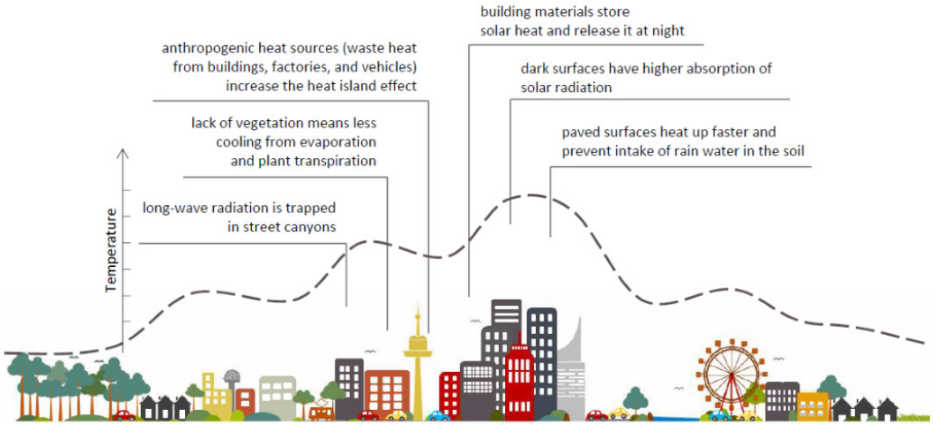


Fig. 3.6. Illustrazione dell'effetto isola di calore urbano e dei fattori che contribuiscono a temperature più elevate nelle aree urbane

Tuttavia, la pressione del vento non influisce in modo significativo sulla bagnatura dei materiali porosi, ma rappresenta la principale causa di crepe e perdite dai giunti. I piccoli pori nei materiali porosi (ad esempio intonaco, mattoni, materiali caratteristici della Regione Mediterranea) assorbono e trasportano l'acqua per mezzo di forze capillari molto maggiori della pressione creata dal vento.
Pertanto, la pressione del vento non influisce sulla velocità del flusso di umidità attraverso la maggior parte delle superfici verticali che sono costruite generalmente in mattoni ma, allo stesso tempo, questo flusso d'acqua costante e non controllato può amplificare il rischio di alluvioni e allagamenti [Fig. 3.7];



Fig. 3.7. Alluvione Marche, settembre 2022

- *Aumento della velocità del vento*: Un aspetto rilevante da sottolineare riguarda il vento che quando si avvicina all'edificio crea una perturbazione, le cui forze laterali (orizzontali) e di sollevamento possono influire sull'integrità strutturale degli edifici.
È noto che le trombe d'aria si formano con maggiore frequenza sui mari caldi (ad esempio nella Regione del Mediterraneo) e nelle zone delle calme equatoriali, cioè dove sono più alte le probabilità di formazione dei sistemi nuvolosi temporaleschi.

In questi eventi estremi, può accadere che le correnti d'aria caratterizzate da una forte pressione, possono sollevare il sistema di copertura, aumentando le probabilità del crollo della struttura. Oltre alle trombe d'aria [Fig. 3.8], possono verificarsi episodi di tempeste di grandine, che danneggiano principalmente le componenti edilizie più esposte e vulnerabili come gli infissi e gli elementi di schermatura e ombreggiamento dei serramenti.



Fig. 3.8. Tromba d'aria a Selinunte, novembre 2021

Su questi ultimi aspetti, risulta importante sottolineare alcuni concetti.
Diversi studi [Letchford, et al., 2013; Trabucco, et al., 2017; Mejorin, et al., 2018; Mejorin, et al., 2019] si stanno orientando sullo sviluppo e sulla messa a punto di metodi sperimentali in grado di caratterizzare la probabilità che alcuni oggetti – durante episodi di vento estremo o quando si verificano fenomeni che hanno carattere singolo ma si palesano in forma plurima, come ad esempio la combinazione 'Vento-Pioggia' – possano staccarsi da edifici e ambienti esistenti, costituendo quindi i *flying debris*[15] (detriti volanti), che potrebbero successivamente impattare su ricettori sensibili, ovvero altri edifici circostanti [Fig. 3.9].



Fig. 3.9. Flying Debris, Uragano Michael, USA 2018

Si evidenzia qui, come il vento può causare '*danni diretti*' (esempio: distacco di elementi dagli edifici) e '*danni indiretti*', causati da detriti volanti (esempio: impatto dei detriti sugli edifici) [Mazzucchelli, et al., 2022] e sviluppare ancora meglio la relazione 'Building envelope *versus* Climate change'.
Analizzando questo specifico caso, il rischio di danni indotti dal vento coinvolge in primo luogo l'edificio sorgente con la possibilità che il fenomeno dei detriti volanti si verifichi a causa di sorgenti di oggetti distaccati e l'esistenza di venti che possono provocarne il decollo e, in secondo luogo, gli edifici target con la possibilità di essere colpiti da un detrito volante. La pressione o la depressione causata dal vento può causare infatti il distacco degli elementi di copertura quali, pannelli di rivestimento in materiale coibentato, tegole o favorire lo scardinamento degli elementi mobili dei serramenti.
Si rileva che gli elementi costitutivi di un edificio devono evitare la creazione di effetti a cascata, dove un pezzo difettoso causa il fallimento di più altri pezzi, portando a conseguenze sproporzionate. In questo senso, valutare i meccanismi di cedimento degli elementi di coperture e facciate, significa studiare il miglioramento delle prestazioni degli edifici in regime di cambiamento climatico, focalizzando gli sforzi sulle prestazioni di adattamento degli involucri edilizi ai fenomeni di vento estremo.
La resistenza degli edifici ai venti forti e ai fenomeni di detriti volanti associati è un aspetto chiave per garantire la capacità di rispondere prontamente a tali eventi che si intensificheranno e aumenteranno la loro frequenza in futuro. A causa dell'imprevedibilità degli effetti derivanti da eventi estremi, anche le compagnie di assicurazione stanno entrando in un'epoca in cui sarà più difficile per loro fornire protezione contro incidenti costosi [Mercogliano, 2020].
Un altro elemento da tenere in considerazione durante le trombe d'aria è la possibilità di abbattimento di cartelloni pubblicitari, piegamento di alberi e potrebbe anche accadere che qualche oggetto pesante sia scaraventato in aria a qualche metro di distanza spingendo contro un edificio. In questo caso, si parla di danno indiretto e subìto. Nei rischi per gli edifici sono da considerare anche quelli causati dall'impatto della grandine, in quanto, a seconda della dimensione dei chicchi[16], può causare micro-fessure (in particolar modo su tetti e infissi), con conseguente perdita di prestazioni.
Se la grandine danneggia il rivestimento di copertura la conseguenza è l'infiltrazione d'acqua all'interno dell'edificio e l'aumento della possibilità di comparsa di muffe. Questi impatti andranno oltre l'ambito di progettazione degli edifici in quanto accelerano il processo di degrado e invecchiamento degli edifici, con effetti negativi anche sul comfort degli abitanti.
Nei diversi scenari analizzati, si può affermare che le superfici vetrate, le facciate degli involucri risultano quelle più vulnerabili ai diversi fenomeni individuati in quanto da un lato risultano responsabili di dispersioni termiche e infiltrazioni d'acqua, dall'altro sono altamente esposte all'impatto dei detriti portati dal vento, con conseguente rottura degli elementi costitutivi.

Questa analisi, basata su una revisione critica della letteratura di settore, si concentra sui possibili inneschi da parte degli involucri edilizi sui diversi fenomeni del cambiamento climatico, in quanto l'attenzione rivolta all'amplificazione delle cause degli eventi estremi da parte degli involucri delinea un ambito applicativo poco esplorato.
Da un punto di vista termico, gli involucri, attraverso le loro risposte meccanizzate di raffreddamento e riscaldamento, aumentano la temperatura dell'atmosfera urbana influenzando il microclima e il loro bilancio energetico. A questo si devono aggiungere le proprietà termiche dell'involucro, riferite alla capacità termica dei materiali da costruzione che assorbono e trattengono più la radiazione solare e possono così influire su un deficit di evapotraspirazione dell'ambiente esterno che combinato all'effetto dell'esposizione alla radiazione solare diretta, contribuiscono ad un maggiore stress termico.

Questi fattori, quindi, devono essere presi in considerazione nella valutazione degli eventi estremi legati all'innalzamento della temperatura, quali ondate di calore e isola di calore.
Il bilancio dell'irraggiamento e la velocità del vento sono influenzati dalla geometria della superficie dell'involucro e dal rapporto tra superficie opaca e trasparente. Considerare questo rapporto in funzione delle condizioni ambientali del contesto di riferimento, può risultate utile nella verifica di quanto le prestazioni dell'edificio incidano sul contesto.
Qui entrano in gioco le caratteristiche prestazionali dei materiali che costituiscono l'involucro edilizio e, in base alla loro opacità e trasparenza, varia la trasmissione di calore, l'incidenza solare, la riflettenza. Sebbene le superfici trasparenti risultano quelle più impattanti sulle prestazioni termiche globali dell'edificio e allo stesso tempo quelle più vulnerabili, la quota della radiazione solare che colpisce una superficie opaca e che viene da questa assorbita, può incidere sull'aumento della temperatura esterna.

Vista la complessità del fenomeno del cambiamento climatico, le diverse variabili da cui dipende il funzionamento dell'involucro edilizio, valutare la sua interazione con il contesto attraverso l'indicatore della trasmittanza termica o il rapporto superficie opaca/superficie trasparente non risultano sufficienti per una lettura dinamica della relazione edificio-contesto-clima e questo può rappresentare un limite nella realizzazione di edifici che risultano essere disconnessi dal contesto di riferimento.
Pertanto, risulta fondamentale l'analisi e la valutazione del trasferimento di flussi tra l'edificio e l'ambiente, attraverso la conoscenza delle proprietà geometriche e termofisiche dei materiali che costituiscono l'involucro, in modo tale da individuare quanto gli involucri possano incidere sul contesto amplificando gli effetti del cambiamento climatico.
Da questo sintetico quadro, si suppone, di conseguenza, un possibile nesso di correlazione, se non addirittura di causalità, tra il cambiamento climatico e l'involucro edilizio e la conoscenza dei meccanismi che contribuiscono a creare e intensificare gli impatti ha lo scopo di definire su quali fattori prestazionali lavorare per prevenire, adattare e mitigare i rischi provocati dagli impatti stessi.

Per gli obiettivi della ricerca, che implicano lo studio dell'interazione 'Building envelope *versus* Climate Change', questa lettura dinamica non si intende conclusa in questo capitolo ma, vi è la necessità di mettere a sistema un controllo di tipo tecnico-prestazionale sull'involucro edilizio *costruito* come caso studio (Cfr. Cap. 6), attraverso *strumenti* che siano in grado di verificarne l'adeguatezza delle risposte performanti rispetto uno specifico contesto ambientale. Le attività di simulazione e di testing che ricreano eventi estremi di cambiamento (in questo caso: temperature estreme, precipitazioni intense e aumento della velocità e intensità del vento) e consentono di verificare la risposta prestazionale degli involucri edilizi nelle loro interazioni dinamiche di flusso interno-esterno, quindi, legati alle condizioni ambientali e influenzanti le caratteristiche microclimatiche dell'ambiente esterno.
Le attività di testing, possono fornire un quadro prestazionale più accurato, permettendo quindi nello specifico di determinare eventuali limiti e deficit prestazionali dell'involucro edilizio alle nuove condizioni di cambiamento climatico.

3.3 Valutazioni critiche: Verso l'adattamento al clima

"Deciding how best to build adaptive capacity can be a difficult process.
There is uncertainty about how factors related
to the climate will change in the future, and about non-climate aspects."[17]
[Roberts, 2008, p. 4555]

In questo contesto, per una migliore comprensione degli step che caratterizzano le attività della ricerca, si vogliono riportare alcuni limiti e aspetti critici riscontrati nella letteratura

di settore per l'analisi e la valutazione delle interazioni dinamiche 'Climate change *versus* Building envelope' e viceversa.
I limiti e gli aspetti critici vengono qui delineati attraverso la compresenza di due elementi distinti e di natura diversa, quindi intendendo un collegamento duale, dove il primo elemento può indirizzare il secondo versus (verso) un'adeguata azione trasformativa:

- *Indicatori semplici versus Indicatori robusti*: Un limite riscontrato all'analisi degli effetti dei cambiamenti climatici sugli involucri edilizi è che la maggior parte degli studi si è concentrata sulla misurazione degli impatti attraverso indicatori semplici di performance (consumo di energia degli edifici per riscaldamento e raffreddamento) [De Wilde, et al., 2012], mettendo in evidenza l'esigenza di indicatori robusti caratterizzati da una metrica che possa coniugare prestazioni tecnologiche e condizioni ambientali, mutevoli nel tempo;

- *Statiticità versus Adattività*: Un limite significativo attribuito alle prestazioni statiche degli involucri edilizi è il disaccoppiamento degli edifici dall'ambiente esterno, trascurando la modificazione nel tempo delle loro prestazioni in rapporto alle variabili condizioni ambientali. È probabile infatti che, nella Regione del Mediterraneo, come in altri Paesi, gli edifici su dati climatici passati e attuali siano conformi a standard validi su scenari climatici a breve termine, ma potrebbero non essere in grado di mantenere le stesse prestazioni se esposte, ad esempio, all'aumento delle temperature del clima futuro:

- *Contesto versus Materiali*: Un limite rilevante è dovuto alla mancanza di stime ambientali sulle caratteristiche prestazionali dei materiali che costituiscono sistemi, elementi e componenti di un involucro edilizio rispetto alla loro risposta performante alla variabilità delle condizioni contestuali;

- *Stabile versus Variabile*: Un aspetto critico è la difficoltà di monitorare le condizioni climatico-ambientali stabili, che definiscono l'ambiente confinato interno di un involucro edilizio rispetto ad un ambiente esterno che risulta essere variabile per natura;

- *Realtà versus Strumentazione*: Per quanto riguarda le analisi del vento, è necessario notare che gli elementi che compongono una valutazione completa del microclima eolico (che comprendono le ipotesi sull'effetto del terreno sopravento sullo strato limite, l'appropriata selezione e trasposizione dei dati meteorologici storici e altri elementi pratici come la scelta degli angoli di vento da valutare) possono influire sui risultati della valutazione in misura maggiore rispetto alla scelta dello strumento [Jayyaratnam, et al., 2017]. Questo aspetto critico mette in evidenza l'esigenza di strutturare un'analisi completa intersecando valutazioni mediante attività di simulazione da software e simulazione 'dal vero', mediante laboratori di testing specializzati;

- *Progettazione versus Pianificazione*: Un altro aspetto critico da sottolineare è il controllo delle azioni di valutazione prestazionale degli edifici attraverso la normativa di settore che direttamente influenza le decisioni ai livelli di progettazione e pianificazione. Tuttavia, sembra che queste decisioni vengano attualmente prese senza fare affidamento su una metodologia quantitativa completa per comprendere appieno e dare priorità agli impatti da cambiamento climatico e ai modi corretti per affrontarli;

- *Normativa versus Conformità*: Sebbene sembrerebbe una conseguenza del punto dichiarato sopra, ne scaturisce la necessità di aggiornare i regolamenti e armonizzare gli standard per un nuovo concetto di efficienza degli involucri a fronte del cambiamento climatico tra i Paesi (si intende Italia e Spagna della Regione del Mediterraneo) consentendo l'attuazione

e la conformità attraverso pratiche semplificate e più efficaci. Il link di collegamento tra la ricerca di base e le norme edilizie, gli standard e la pratica sono deboli e il comportamento degli involucri edilizi non è ben compreso a causa della natura non convenzionale degli eventi estremi di cambiamento climatico [Laminou, et al., 2019].

Come discusso precedentemente, per affrontare il cambiamento climatico è indispensabile conoscere gli effetti che provoca sull'ambiente costruito e, nello specifico, sull'involucro edilizio che diviene la prima linea di interazione tra ambiente esterno-interno.
Inoltre, le variabili che entrano in gioco nella lettura 'Climate change *versus* Building envelope' e viceversa, sono molteplici e differenti tra loro (clima, materiali, geometria, dimensioni, esposizioni, ...) e risulta complesso sviluppare una stima organica e reale delle condizioni prestazionali e ambientali del rapporto edificio-contesto, non solo quando si analizza un singolo fenomeno, come l'innalzamento della temperatura ma quando si verificano più effetti contemporaneamente, ad esempio precipitazioni più elevate in combinazione con le raffiche di vento.
Nella lettura dinamica si sono presi in considerazione i fenomeni di eventi estremi per la Regione Mediterranea quali temperature estreme, precipitazioni intense, aumento della velocità e intensità del vento e aumento dell'umidità.
In sintesi, si può affermare che, nella declinazione 'Climate change *versus* Building envelope', gli impatti derivanti dal cambiamento climatico si riverberano sull'ambiente costruito e, in particolare sull'involucro edilizio, rendendo necessario un nuovo approccio alla progettazione che prenda in esame la complessità del clima in costante mutazione.

L'inquadramento degli effetti del cambiamento climatico sugli edifici per la misurazione della loro vulnerabilità parte dal fatto che essa dipenda da molteplici fattori, alcuni dei quali risultano essere interni alle caratteristiche proprie dell'ambiente costruito, ad esempio il suo grado di esposizione e la sua capacità di rispondere alle sollecitazioni, quando viene colpito da queste. In questo caso, le superfici esterne dell'involucro, comprese le superfici di tipo trasparente, rappresentano il sistema più esposto ai differenti impatto di cambiamento climatico, evidenziando la necessità di strategie in grado di rispondere e limitare i rischi al fine di non superare una soglia massima di decadimento prestazionale dell'involucro edilizio evitando danni più gravosi a livello strutturale.
L'aspetto funzionale delle superfici esterne, ovvero le facciate degli involucri edilizi, assume particolare rilevanza per indirizzare l'innovazione tecnologica e materica a rispondere in modo efficace agli eventi estremi di cambiamento climatico che, dalle proiezioni climatiche sviluppate, saranno sempre più frequenti e con intensità maggiore.
Sembra quindi che le sollecitazioni esterne impongano all'involucro, una revisione strutturale motivata dall'esigenza di un controllo delle dinamiche climatiche portando all'individuazione dei nodi critici a livello prestazionale al fine individuare delle soluzioni strategiche adeguate al contesto di riferimento. Si sottolinea che però queste azioni devono essere supportate da misurazioni validate dei dati prestazionali tecnologici-ambientali, per affrontare appieno la complessità delle implicazioni, sia in termini positivi che negativi, derivanti dagli impatti sull'involucro edilizio.

Per quanto riguarda la declinazione 'Building envelope *versus* Climate change', l'attenzione si pone ai possibili inneschi dell'involucro edilizio sul cambiamento climatico.
È alquanto noto che il settore delle costruzioni incide di circa il 40% sulle emissioni di CO_2 in atmosfera. Questa componente ha come risultante un aumento della temperatura in ambiante costruito che a sua volta comporta un utilizzo sproporzionato degli impianti di climatizzazione, specialmente nella stagione estiva.
Per la qualità del microclima questo comporta un ulteriore aumento della temperatura da

cui derivano gli effetti estremi di ondata e isola di calore dell'ambiente esterno.
Ulteriore innesco a queste tipologie di fenomeni proviene dai materiali che vengono impiegati nella costruzione degli involucri che spesso risultano non adeguati, in quanto la scelta di questi non viene tarata e controllata rispetto alle condizioni e alle caratteristiche ambientali e climatiche.
Altri fattori che incidono sulla variazione delle condizioni microclimatiche di uno specifico contesto, riguardano le prestazioni delle superfici trasparenti (vetrate, infissi) da cui dipende il controllo dei flussi d'aria e d'acqua. In particolare, le perdite che si instaurano nell'involucro edilizio dalle superfici trasparenti, comportano non solo un maggior consumo energetico dell'impianto di riscaldamento o raffreddamento (a seconda del periodo stagionale) ma anche delle sollecitazioni indirette in termini di input/output negli scambi di calore e acqua da parte dell'involucro sull'ambiente esterno.

Si mette in evidenza che anche in questo caso, le superfici esterne sono quelle più esposte ma allo stesso tempo rappresentano il sistema da cui parte l'innesco o l'amplificazione degli impatti del cambiamento climatico.

Nello specifico, queste possono essere anche colpite da elementi di natura diversa, come detriti, portati dall'azione del vento, ad esempio durante una tromba d'aria, che possono causare il fallimento prestazionale del sistema e causare altri danni da impatto ad altri involucri. In questo contesto, si è definita così la duplice caratteristica comportamentale degli involucri, che si configura da un lato con il concetto di edificio sorgente, dall'altro con il concetto di edifico target.
Questo per le strategie in risposta al cambiamento climatico significa comprendere i potenziali deficit dell'involucro e le relazioni di causa-effetto che ne derivano.
L'edificio *target* rappresenta il bersaglio dell'impatto (ad esempio i detriti volanti trasportati dal vento che colpiscono la superficie dell'involucro) e l'edificio *sorgente* da cui parte l'impatto (ad esempio dall'involucro si stacca un oggetto, un pezzo a causa di trombe d'aria o precipitazioni intense. Può succedere che l'edificio target e quello sorgente possano coincidere e quindi il concetto di edificio sorgente presuppone un adeguamento delle sue prestazioni in risposta alla sollecitazione subìta.
Tra le differenti azioni dell'involucro sul cambiamento climatico, il contributo tecnologico e materico degli elementi, componenti che compongono l'involucro, svolge un ruolo chiave nel superamento di deficit prestazionali e nella reazione di risposta (feedback negativo che non implica quindi un'amplificazione del fenomeno climatico) ai diversi stress esterni.
In questa luce, la strutturazione delle schede dovrebbe dare un contributo centrale a questo lavoro per la possibilità di comprendere le cause e gli effetti delle trasformazioni in atto dovute al clima e consentirebbe di valutare delle azioni preventive, costruite in base alle caratteristiche dell'involucro e del contesto di riferimento.
Si evince che, per entrambe le declinazioni 'Climate change *versus* Building envelope' e 'Building envelope *versus* Climate change', le soluzioni che mirano alla riduzione degli impatti dall'involucro e sull'involucro prescindono un'analisi accurata delle tecnologie e dei materiali, per consentire di prevedere da un lato il livello di risposta ad un dato evento estremo, dall'altro di mantenere la funzionalità e di limitare così il livello di decadimento prestazionale dell'intero sistema.

Per il livello di complessità dei contenuti, a partire dal cambiamento climatico a cui viene associato il ruolo dell'involucro edilizio, il riscontro reale della valutazione e conseguente verifica delle problematiche affrontate, accentuano la necessità di una misurazione delle prestazioni e delle caratteristiche fisiche, tecnologiche, materiche degli elementi dell'involucro in rapporto alle condizioni ambientali del contesto specifico di riferimento.

L'intento è recepire informazioni corrette nella relazione edificio-contesto e viceversa al fine di comporre un quadro complesso per l'interpretazione dei fenomeni, rappresentando il punto di partenza di soluzioni e azioni strategiche, a livello dell'involucro, per il suo adattamento ai diversi eventi estremi del cambiamento climatico.

Il principale prodotto dell'attività di lettura dei due diversi livelli di interazione fenomenica, in cui l'involucro risulta *oggetto vulnerabile* e *concausa* (causa che concorre insieme ad altre a produrre un determinato evento) degli effetti del cambiamento climatico risiede nella restituzione di uno scenario dinamico come strumento utile a corredo delle soluzioni tecnologiche realmente rispondenti a scenari climatici estremi.
Questo consente l'acquisizione di nozioni utili per comprendere le possibili sinergie tra involucro edilizio e cambiamento climatico, sia positive che negative, con la diretta conseguenza di impostare gli input alla base dei quali si innestano un nuovo funzionamento e un controllo sistemico a favore dell'involucro edilizio per la sua azione-reazione in regime di cambiamento climatico.

Sebbene lo scopo del lavoro, in questa fase della ricerca, non era una stima quantitativa delle prestazioni dell'involucro rispetto al tendenziale peggioramento delle condizioni climatiche della Regione Mediterraneo, ma riguarda la necessaria definizione dell'insieme degli strumenti finalizzati alla 'costruzione della conoscenza' permettendo di ottenere un'ampia mappatura dei fenomeni al fine di strutturare le fasi successive (soprattutto quelle di tipo sperimentale) della ricerca.

Come introdotto, il fine ultimo di questa attività per la fase di analisi della ricerca è lo studio delle relazioni che si instaurano tra l'involucro e il suo contesto di appartenenza e interpretare come le dinamiche prestazionali e materiche degli involucri possano innescare e/o amplificare gli effetti del cambiamento climatico sull'ambiente costruito.
Ciò nonostante, non risulta sempre possibile misurare in modo diretto e attendibile gli elementi dell'involucro e la loro interazione con i fenomeni derivanti dal cambiamento climatico, a causa dei molteplici parametri che entrano in gioco, che incidono sulla complementarietà e sovrapposizione dei dati.
Questo approccio porta quindi ad una revisione sistematica sulle modalità di misurazione e conseguente valutazione critica dei dati, spostando le questioni delle performance lontane dalle tradizionali proprietà fisiche e statiche degli involucri degli edifici ad un discorso più ampio nella definizione di come questi *realmente* si comportano.
Oggi, in ragione delle attuali richieste di flessibilità agli involucri edilizi, risulta indispensabile una nuova modalità di controllo e misura delle prestazioni degli involucri in regime di cambiamento climatico, attraverso il supporto di criteri di previsione stabiliti dagli strumenti di simulazione e testing avanzato.
Attraverso i software di simulazione è possibile condurre analisi di tipo ambientale ed energetico-prestazionali, sia alla scala urbana che a scala dell'involucro, con conseguente lettura critica dei dati ottenuti. Nonostante i rapidi progressi negli strumenti e nei metodi di simulazione che hanno il potenziale per supportare una progettazione *informata* ad alte prestazioni, la loro integrazione nel processo di progettazione è ancora lontana dall'essere completa.
In corrispondenza a tale problematica, si affianca l'attività di sperimentazione sul campo che viene qui intesa come lo studio 'dal vero' del comportamento degli involucri edilizi - sollecitati dalla riproduzione dei fenomeni di cambiamento climatico – mediante attività sperimentali e azioni di testing su modelli di prova in scala reale, detti *Mock-Up*.
Il punto di forza delle *attività di testing avanzato* che vengono svolte in laboratori specializzati, attraverso specifiche strumentazioni e macchinari di rilevazione fenomenologica,

risiede nel restituire dati e valori prestazionali degli involucri edilizi, essendo calibrati su *datasheet* garantiti da procedure di prova normate.
Le più avanzate tecniche di simulazione e testing rappresentano efficaci strumenti indirizzati ad una migliore comprensione delle capacità di controllo prestazionale degli involucri edilizi rispetto ai differenti eventi estremi di cambiamento climatico, in linea con gli aspetti che sottendono la relazione edificio-contesto.

Ai fini degli obiettivi della ricerca risulta quindi necessario servirsi di queste strumentazioni che consentono di verificare i livelli di adattamento dell'involucro edilizio attraverso la riproduzione/simulazione degli eventi estremi di cambiamento climatico.
In questa direzione, i risultati misurabili che ne derivano, intendono sviluppare un nuovo *protocollo metodologico adattivo* che conduce alla comprensione delle dinamiche esistenti tra edificio-contesto e che serva come impostazione operativa per la verifica applicative delle prestazioni degli involucri rispetto a requisiti dettati da normative di riferimento e dalla rispondenza di nuovi e intensi impatti climatici.

In questo senso, la comprensione realistica e affidabile del rischio degli impatti che potrebbero derivare da eventi estremi in futuro, potrebbe facilitare il processo progettuale e la costruzione verso l'adattività degli involucri edilizi (tematica che viene affrontata nel Cap.4).
Per questi motivi, gli studi della ricerca intendono affrontare nel campo dell'innovazione tecnologica, gli aspetti funzionali adattivi dell'involucro, inteso come una macchina complessa [Knaack, et al., 2014], offrendo la possibilità di mediare i carichi termici, energetici che vengono indotti dagli stessi elementi tecnici dell'edificio, in funzione di requisiti interni da asseverare e condizioni climatiche esterne in continuo cambiamento.

Si vuole precisare che il campo dell'adattività dell'involucro edilizio viene indagato per avere un quadro conoscitivo di base sulle possibili strategie adattive dei sistemi di involucro, frutto delle innovazioni tecnologiche avanzate degli ultimi decenni.

Le strategie di adattamento degli involucri edilizi ai cambiamenti climatici devono essere strettamente legate al contesto specifico in cui si trovano gli edifici, in modo tale da offrire una risposta controllata e adeguata ai possibili eventi estremi: ciò diventa una sfida per il settore delle costruzioni che si vede impegnato prendere in considerazione cambiamenti nei regolamenti edilizi o urbanistici per anticipare gli impatti futuri del cambiamento climatico.
Ad esempio, per la Regione del Mediterraneo, dove l'innalzamento delle temperature è una problematica a cui si deve dare risposta, rendere gli involucri edilizi più adattivi dal punto di vista termico, significa ridurre l'impatto che questi possono creare sull'aumento delle temperature stesse esacerbando il fenomeno delle ondate di calore e isola di calore, aumentando così la qualità microclimatica dell'ambiente costruito.
Inoltre, l'integrazione di materiali con caratteristiche adattive può ridurre gli impatti provocati da altri eventi estremi analizzati di cambiamento climatico, in particolare quelli causati da bombe d'acqua e trombe d'aria. La trasformazione dell'involucro può essere ottenuta in vari modi, applicando componenti meccanizzati, introducendo flussi d'aria o modificando chimicamente un materiale [Shanin, 2019].
A questo proposito, va ricordato che anche il settore produttivo si sta orientando verso la costruzione di materiali ed elementi tecnici innovativi che ottimizzino le prestazioni ambientali dell'involucro edilizio. I principali progressi non risiedono in grandi sviluppi tecnologici, ma piuttosto nella loro estesa applicazione sistemica, facilitati da un controllo materico intelligente [Lucon, et al., 2014; IEA, 2022] che riconosce e recepisce la variabile climatica al fine di attivare una reazione.

L'adattività di questi materiali che possono essere il risultato del trasferimento tecnologico proveniente da altri settori quali, aerospaziale, automobilistico [Lucarelli, et al., 2012], richiede il funzionamento in sintonia con le specifiche esigenze del contesto climatico di riferimento, ottenendo un'ottimizzazione delle prestazioni complessive dell'involucro.

In conclusione, avanzare i contributi delle diverse tecnologie e ottimizzare il funzionamento adattivo degli involucri edilizi per far fronte agli eventi estremi di cambiamento climatico [Pastori, & Mazzucchelli, 2022] e, allo stesso tempo, mitigare gli impatti che l'involucro edilizio stesso contribuisce ad aumentare a livello dell'ambiente costruito, rappresenta una condizione necessaria e sufficiente per le spinte innovative della progettazione, data la lunga vita degli edifici [IEA, 2022] in un clima che cambia.
Riprendendo i benefici derivanti dalle attività di simulazione e testing, queste vengono intese come un apporto significativo alla valutazione e alla verifica dei livelli di risposta prestazionale degli involucri edilizi, soggetti agli effetti del cambiamento climatico, consentendo di ottenere dati reali per indirizzare soluzioni che mirano all'innalzamento della qualità prestazionale dell'ambiente costruito.

Inquadramento della I Parte della Ricerca all'interno del Technology Readness Levels TRLs

Prima di addentrarci nella descrizione delle attività che caratterizzano la II Parte della tesi, è opportuno tracciare un excursus sintetico rispetto ai tre capitoli che costituiscono la I Parte e inquadrarli nel livello di Technology Readness Levels TRLs, come risultato della maturità tecnologica della ricerca. Il punto di forza di questa metrica è la conoscenza dello stato di avanzamento del progetto rispetto ad una strutturazione metodologica ed obiettivi prefissati. Questa lettura risulta cruciale per la ricerca stessa in modo tale da enfatizzare l'apprendimento validato e la continua innovazione.
La tematica attorno al quale ruota la I Parte della Ricerca è il cambiamento climatico che viene studiato su diversi aspetti nei primi tre capitoli della tesi:

- nel *I Capitolo* si comprendono i fondamenti scientifici fino alle strategie di mitigazione;

- nel *II Capitolo* viene studiato il cambiamento climatico nella Regione del Mediterraneo;

- nel *III Capitolo*, lo studio verte sulle implicazioni degli eventi estremi sull'involucro edilizio.

Si riportano in sintesi i punti salienti dei rispettivi capitoli, in modo tala da delineare un quadro di sintesi e identificare così il livello di maturazione tecnologica.

I Capitolo
Il *I Capitolo* inquadra il contesto scientifico culturale e la base delle conoscenze sul tema di interesse globale quale, il cambiamento climatico. Gli approcci di valutazione codificati e sempre in costante aggiornamento da parte dell'IPCC, sono utili per comprendere come gli impatti del riscaldamento globale si attestano intorno ai 1,5°C al di sopra dei livelli preindustriali; i relativi percorsi globali di emissione di gas serra, rappresentati nel Sesto Rapporto di Valutazione dell'IPCC (AR6), hanno l'obiettivo di rafforzare la risposta globale alla minaccia del cambiamento climatico. Lo studio sul cambiamento viene affrontato individuando alcuni passaggi fondamentali che hanno contraddistinto la variabilità del clima nella storia geologica. Tuttavia, oggi, il sistema climatico sta subendo cambiamenti molto più repentini, estesi anche più intensi rispetto a quanto accaduto in passato, in quanto alle forzanti climatiche si è aggiunto l'impatto antropico.

Il processo di industrializzazione sempre più intenso ed esteso a livello planetario è stato da molte parti indicato quale responsabile o corresponsabile dell'innalzamento delle temperature registrato a partire dagli ultimi decenni del XX secolo.
A livello generale, le emissioni di gas serra dovute all'impatto antropico e le relative concentrazioni in atmosfera aumentano il noto effetto serra, con il conseguente riscaldamento globale, a sua volta causa di fenomeni concatenati quali la desertificazione, lo scioglimento dei ghiacciai e l'innalzamento dei livelli degli oceani.
Per comprendere meglio i meccanismi alla base dello sviluppo di questi fenomeni, è stato introdotto il concetto di *feedback*. Le alterazioni dovute al cambiamento climatico possono però diventare a loro volta agenti determinanti di ulteriori emissioni ad effetto serra, in un'inversione di casualità e in un'amplificazione dei reciproci impatti definita, con una terminologia più precisa, feedback climatici, ovvero quei processi in grado di amplificare o ridurre gli effetti di una forzante climatica. In questo caso, la forzante è l'aumento della concentrazione di CO_2, che altera il bilancio energetico terrestre e provoca un aumento della temperatura. Un feedback che accresce il riscaldamento iniziale è detto feedback positivo (ad esempio l'emissione di CO_2 prodotta dagli incendi) mentre un feedback che riduce il riscaldamento iniziale è detto invece feedback negativo.
Di fronte a tale sfida, risulta indispensabile analizzare le misure sinergiche di mitigazione e adattamento, con il fine ultimo di evidenziare le potenzialità ed i limiti delle strategie che possono essere intraprese a livello di progettazione.
L'attenzione si focalizza su due approcci metodologici-operativi: *Climate Resilient Development* e *Adaptive Design*, che definiscono un quadro di soluzioni che combina strategie di adattamento con azioni di mitigazione, che possano indirizzare azioni adattive sull'ambiente antropizzato. È importante evidenziare che i due approcci non vanno visti in alternativa, ma in modo sinergico e interrelato nell'ambito di ogni progetto architettonico in tema di adattamento al clima, con accento sull'uno o sull'altro a partire da riconoscimento delle priorità d'azione strategica.

In questo contesto si è posto il presente quesito:

Il cambiamento climatico può essere inteso come un nuovo approccio allo sviluppo sostenibile, attraverso una nuova visione delle strategie di mitigazione e adattamento?

La risposta a questa domanda mette in evidenza come molte delle condizioni che definiscono la vulnerabilità agli impatti climatici e la capacità di mitigare e adattarsi ad essi sono saldamente radicate nei processi di sviluppo ai diversi livelli: sociale, ambientale, economico ed energetico. Si deve tenere in considerazione che, mentre le strategie di mitigazione impongono uno sforzo a livello globale da parte di tutti i Paesi responsabili delle emissioni di gas serra, le strategie di adattamento hanno invece maggiore efficacia se concepite e implementate su scala locale, indirizzate alle vulnerabilità del proprio contesto territoriale al fine di aumentarne la capacità di risposta.
In quest'ottica, si richiede une diversa impostazione del progetto di architettura, che diventa un processo di azione, apprendimento e risposta, attraverso la capacità di monitoraggio delle condizioni di vulnerabilità e di gestione iterativa del rischio che rappresenta un'importante condizione abilitante. In altre parole, in architettura, l'adattamento ha come obiettivo il controllo delle proprietà fisiche di componenti e sistemi edilizi utilizzando gradienti di variabili ambientali esterne, con l'obiettivo di migliorare il comfort esterno ed interno, l'abitabilità e ridurre i consumi di energia.

Si tratta di supportare il binomio *cambiamento climatico/progetto architettonico* attraverso l'individuazione di scenari climatici futuri - comprendendo la variabilità e gli estremi del

clima - e l'applicazione di soluzioni adattive appropriate alle condizioni ambientali del contesto nel quale si deve intervenire.
In base ad una rilettura complessiva e critica dello stato dell'arte, rispetto la vasta tematica del cambiamento climatico che viene affrontata nel primo capitolo, si evince che il sistema urbano delle città, nei diversi assetti è caratterizzato da livelli di esposizione e vulnerabilità, e rappresenta quindi, un ambito di sperimentazione di paradigmi e metodi di progettazione *adaptive e climate-resilient*, soprattutto quando è chiara l'assenza e la mancata attuazione di efficaci politiche di mitigazione-adattamento che potrebbe aggravare i fattori di rischio. Si rafforza così la conoscenza sul cambiamento climatico e sugli indirizzi strategici di mitigazione e adattamento per definire successivamente adeguate verifiche prestazionali negli scenari climatici in continuo mutamento.

II Capitolo
Il *II Capitolo* presenta una descrizione completa delle problematiche climatiche e ambientali della Regione Mediterranea, attraverso i risultati degli studi e delle ricerche scientifiche recenti su questo argomento.
L'IPCC ha affermato che, per il Mediterraneo Europeo, ci sarà una combinazione prevista di cambiamenti climatici e fattori di impatto come le temperature estreme, l'aumento della siccità e dell'aridità, la diminuzione delle precipitazioni e della velocità del vento, l'innalzamento del livello medio ed estremo del mare, a causa di un riscaldamento globale di almeno 2°C entro la metà del secolo.
L'analisi della variabilità climatica nella Regione del Mediterraneo è complessa e i risultati delle numerose ricerche in questo ambito devono avere l'obiettivo di fornire dei modelli affidabili e univoci, utili a ridurre il margine di incertezza e che possano fungere da solida base per future strategie e adattamento e metodi valutativi.

Rispetto a tutti i possibili episodi estremi previsti nella Regione Mediterranea, gli sforzi della ricerca si concentrano quindi, sulle variabili atmosferiche quali, temperatura, precipitazioni e vento che dalla letteratura di settore, sono i parametri che più influenzano il cambiamento climatico nella Regione Mediterranea. Le conseguenze, o meglio gli impatti che ne derivano sono ondate di calore e alluvioni, medicane sempre più frequenti e di intensità maggiore rispetto i fenomeni che si verificavano nel periodo pre-industriale.
Episodi che in passato erano eccezionali, oggi, tendono a rappresentare sempre più la normalità. Il cambiamento di alcuni parametri climatici, non solo rende inefficaci i regolamenti e gli strumenti di governo del territorio di cui disponiamo, ma più urgentemente svela l'incapacità delle città nell'affrontare questo scenario di forte cambiamento e di grande incertezza in cui siamo chiamati a ragionare. Ciò pone nuovi interrogativi ai quali bisognerà dare risposta nel prossimo futuro.
Per restringere l'analisi degli estremi climatici, i contesti di studio sono l'Italia e la Spagna, con la possibilità di fornire una lettura chiara e critica sugli impatti probabili futuri che causano l'intensificazione di eventi estremi.
Le proiezioni dei dati climatici sono state effettuate attraverso i software di simulazione *DataClime* per l'Italia e *AdapteCCa* per la Spagna. Lo scenario tracciato dalle analisi condotte rileva che sia l'Italia e che la Spagna, dovranno affrontare un aumento della temperatura superiore alla media globale, con ondate di caldo sempre più prolungate e un maggior numero di notti tropicali e una diminuzione delle precipitazioni (durante l'autunno e l'inverno) con intensificazione di eventi di pioggia estremi. In particolare, gli scenari mostrano che fino al 2100 ci si attende un aumento di temperatura che in alcune aree può superare i 3 gradi, che è molto di più degli 1,5 gradi a cui punta l'Accordo vincolante di Parigi sottoscritto nel 2015.
Dai grafici della temperatura, sia l'Italia che la Spagna, saranno sottoposte a temperature

ben più alte; infatti, senza alcun controllo delle emissioni di gas serra, le proiezioni di temperatura mostrano un aumento pronunciato nei massimi, che può raggiungere i 6°C nel periodo 2071–2100 e nello scenario RCP 8.5 (mentre per la temperatura minima, questo aumento è compreso tra 2°C e 5°C). Per quanto riguarda lo scenario RCP 4.5, i diversi modelli climatici sono concordi nel prevedere un aumento fino a 2°C nel periodo 2021-2050 sia per l'Italia che per la Sagna.
Da quanto analizzato, si evince che le aree analizzate, Italia e Spagna, mostrano problematiche climatiche e ambientali simili, dovute ad una conformazione geografica non uniforme nell'estensione delle due penisole, con climi differenti e con un'influenza significativa del Mar Mediterraneo in grado di determinare un equilibrio termico. S
ebbene le precipitazioni sono in tutte e due le aree analizzate in diminuzione, soprattutto nei periodi estivi, i valori estremi al contrario sembrano aumentare in termini di frequenza ed intensità. Alla variabilità e all'incertezza che questi eventi si possano verificare nel prossimo futuro nella Regione Mediterranea, si inserisce un 'elemento' che non è possibile studiarlo solo in funzione delle condizioni ambientali e climatiche: la risposta prestazionale e tecnologica dell'involucro edilizio rispetto la sua capacità di adattamento a questi eventi estremi.
Ai fini degli obiettivi della ricerca, questa mappatura è necessaria per avere una migliore conoscenza rispetto agli effetti dei cambiamenti climatici rispetto ad uno specifico contesto climatico e per orientare e individuare possibili soluzioni tecniche e tecnologiche ad hoc per fronteggiare gli impatti e i rischi ad essi connessi.
L'attività di indagine e la strutturazione di un quadro di confronto tra Italia e Spagna, hanno permesso di riconoscere quali sono i parametri climatici più vulnerabili da controllare (temperatura precipitazione e vento) al fine di definire delle soluzioni metodologiche che garantiscano la verifica delle soglie prestazionali costanti e calibrate, non solo in risposta alla normativa di settore, ma agli scenari di cambiamento climatico futuro di un dato contesto.

III Capitolo
Il *III Capitolo* presenta la lettura dinamica degli impatti che il cambiamento climatico comporta agli edifici (Climate change *versus* Building envelope) e la loro relazione inversa, ovvero gli edifici come elementi che possono amplificare gli impatti e innescare i fenomeni del cambiamento climatico (Building envelope versus Climate change).
La necessità di una lettura sistemica degli effetti e dei potenziali impatti dovuti al cambiamento climatico, può essere intesa come efficace strumento che incorpora e sovrappone funzioni e relazioni tra componenti materiali e immateriali che costituiscono l'ambiente costruito. Il nodo centrale è decifrare le caratteristiche che determinano la qualità dell'ambiente costruito, costretto a convivere, nei prossimi decenni, con eventi estremi, quali precipitazioni intense, alluvioni e ondate di calore, tipici della Regione Mediterranea.

Dalle analisi derivanti dal II Capitolo, gli eventi estremi che vengono presi in considerazione sono: aumento della temperatura, precipitazioni intense e aumento della velocità del vento. Nella relazione 'Climate change *versus* Building envelope', gli impatti derivanti dal cambiamento climatico si riverberano sull'ambiente costruito e, in particolare sull'involucro edilizio, rendendo necessario un nuovo approccio alla progettazione che prenda in esame la complessità del clima in costante mutazione.

Per quanto riguarda la declinazione 'Building envelope *versus* Climate change', l'attenzione si pone ai possibili inneschi dell'involucro edilizio sul cambiamento climatico. È alquanto noto che il settore delle costruzioni incide di circa il 40% sulle emissioni di CO_2 in atmosfera. Questa componente ha come risultante un aumento della temperatura in ambiente costruito che a sua volta comporta un utilizzo sproporzionato degli impianti di climatizza-

zione, specialmente nella stagione estiva. Per la qualità del microclima questo comporta un ulteriore aumento della temperatura da cui derivano gli effetti estremi di ondata e isola di calore dell'ambiente esterno. Dall'analisi, emerge che, per entrambe le declinazioni 'Climate change *versus* Building envelope' e 'Building envelope *versus* Climate change', le superfici trasparenti risultano responsabili di dispersioni termiche e infiltrazioni d'acqua e sono altamente esposte all'impatto dei detriti portati dal vento, con conseguente rottura degli elementi costitutivi.
Nello specifico, queste possono essere anche colpite da elementi di natura diversa, come detriti, portati dall'azione del vento, ad esempio durante una tromba d'aria, che possono causare il fallimento prestazionale del sistema e causare altri danni da impatto ad altri involucri. In questo contesto, si è definita così la duplice caratteristica comportamentale degli involucri, che si configura da un lato con il concetto di edificio sorgente, dall'altro con il concetto di edifico target.
Questo per le strategie in risposta al cambiamento climatico significa comprendere i potenziali deficit dell'involucro e le relazioni di causa-effetto che ne derivano.
L'edificio target rappresenta il bersaglio dell'impatto (ad esempio i detriti volanti trasportati dal vento che colpiscono la superficie dell'involucro) e l'edificio sorgente da cui parte l'impatto (ad esempio dall'involucro si stacca un oggetto, un pezzo a causa di trombe d'aria o precipitazioni intense. Può succedere che l'edificio target e quello sorgente possano coincidere e quindi il concetto di edificio sorgente presuppone un adeguamento delle sue prestazioni in risposta alla sollecitazione subìta.
Le soluzioni che mirano alla riduzione degli impatti dall'involucro e sull'involucro prescindono un'analisi accurata delle tecnologie e dei materiali, per consentire il livello di risposta dell'involucro ad un dato evento estremo e di mantenere la funzionalità e di limitare così il livello di decadimento prestazionale dell'intero sistema.

Da questo sintetico quadro, si suppone, di conseguenza, un possibile nesso di correlazione, se non addirittura di causalità, tra il cambiamento climatico e l'involucro edilizio e la conoscenza dei meccanismi che contribuiscono a creare e intensificare gli impatti ha lo scopo di definire su quali fattori prestazionali lavorare per prevenire, adattare e mitigare i rischi provocati dagli impatti stessi.
Oggi, in ragione delle attuali richieste di flessibilità agli involucri edilizi, risulta indispensabile una nuova modalità di controllo e misura delle prestazioni degli involucri in regime di cambiamento climatico, attraverso il supporto di criteri di previsione stabiliti dagli strumenti di simulazione e testing avanzato.
L'attività di sperimentazione sul campo che viene qui intesa come lo studio 'dal vero' del comportamento degli involucri edilizi - sollecitati dalla riproduzione dei fenomeni di cambiamento climatico – mediante attività sperimentali e azioni di testing su modelli di prova in scala reale, detti Mock-Up.
Ai fini degli obiettivi della ricerca risulta quindi necessario servirsi di queste strumentazioni che consentono di verificare i livelli di adattamento dell'involucro edilizio attraverso la riproduzione degli eventi estremi di cambiamento climatico.
In questa direzione, i risultati misurabili che ne derivano, intendono sviluppare un nuovo *protocollo metodologico adattivo* che conduce alla comprensione delle dinamiche esistenti tra edificio-contesto e che serva come impostazione operativa per la verifica applicative delle prestazioni degli involucri rispetto a requisiti dettati da normative di riferimento e dalla rispondenza di nuovi e intensi impatti climatici.
Si vuole sottolineare che strategie di adattamento degli involucri edilizi ai cambiamenti climatici devono essere strettamente legate al contesto specifico in cui si trovano gli edifici, in modo tale da offrire una risposta controllata e adeguata ai possibili eventi estremi: ciò diventa una sfida per il settore delle costruzioni che si vede impegnato prendere in consi-

derazione cambiamenti nei regolamenti edilizi o urbanistici per anticipare gli impatti futuri del cambiamento climatico.
Il fine ultimo di questa attività per la fase di analisi della ricerca riguarda la necessaria definizione dell'insieme degli strumenti finalizzati alla 'costruzione della conoscenza' permettendo di ottenere un'ampia mappatura dei fenomeni al fine di strutturare le fasi successive (soprattutto quelle di tipo sperimentale) della ricerca.

Per i contenuti indagati attraverso un'analisi critica della letteratura di settore su questa tematica, i tre diversi capitoli possono essere inquadrati nel livello *TRL 1 Basic Research* (Principi di base osservati) [Fig. 3.10], in quanto viene delineata la base per la ricerca scientifica, attraverso la conoscenza degli assunti di base al fine di concentrare l'attenzione su un determinato processo.

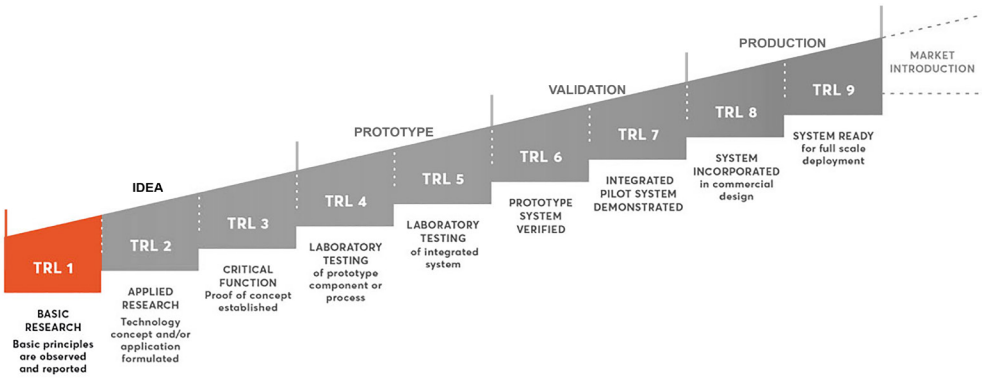


Fig. 3.10. TRL 1 Basic Research

In questo caso, come descritto nei vari capitoli (riportati qui in estrema sintesi), per 'processo' si intende lo studio degli eventi estremi di cambiamento climatico nella Regione del Mediterraneo sull'involucro edilizio, in particolare sulle facciate continue, con l'obiettivo di sviluppare un protocollo metodologico per la misurazione dei livelli prestazionali delle facciate continue agli impatti in un clima che cambia.

Il quadro di riferimento che ne deriva rappresenta il terreno di conoscenza utile ad indirizzare le successive attività degli step consequenziali del processo della ricerca.
Nello specifico, se si vogliono tracciare dei parallelismi interessanti con la fase attuale di analisi della ricerca e spingere l'interazione con il TRL, si individua una situazione di indagine rispetto la tematica del cambiamento climatico e l'involucro edilizio, che rappresenta una fase precoce rispetto al prodotto finale che potrebbe essere utilizzato nel mercato.
L'intento è sperimentare una saldatura tra la ricerca di base, proveniente anche da settori disciplinari diversi (in questo caso si fa riferimento alla climatologia) e la ricerca applicata, tipicamente del campo scientifico dell'architettura e della tecnologia.
Tuttavia, il raggiungimento di questo obiettivo richiede degli sforzi che sottendono un'analisi accurata e una valutazione tecnologica-prestazionale, in regime simulato e reale, per non ostacolare la ricerca a raggiungere nelle successive fasi un livello più alto di maturazione tecnologica.
L'attenzione si concentra sullo studio dei deficit prestazionali delle facciate continue, che come detto precedentemente rappresentano superfici trasparenti altamente vulnerabili agli impatti del cambiamento climatico.
L'obiettivo della ricerca è mettere a punto un protocollo metodologico per la fase di spe-

rimentazione delle facciate continue, in grado di reagire a specifici eventi estremi che si verificheranno nella Regione del Mediterraneo.

Nello specifico, è stato progettato e realizzato in sinergia con l'Azienda Cianciolo Group (aziende leader di facciate continue nel mercato internazionale), un mock-up di facciata continua a cellula, sulla quale sono state condotte attività di attività di testing - in termini di permeabilità all'aria, tenuta all'acqua, resistenza al carico da vento e cicli termici- per verificare il suo funzionamento adattivo sui fenomeni estremi analizzati per la Regione Mediterranea, come temeprature estreme (isole e ondate di calore), precipitazioni intense (bombe d'acqua, pluvial flooding) e ventro estremo (uragano e trombe d'aria).
Si ritiene che la costruzione della metodologia operativa, su cui si sono sviluppate le attività ditesting in regime simulato per verificare le prestazioni della facciata continua, possa essere un riferimento replicabile, misurabile e certificabile per il controllo delle scelte tecnologiche nell'ambito degli interventi e strategie adaptive e climate resilient in regime di cambiamento climatico per la Regione del Mediterraneo.

Note per l'introduzione alla II Parte della tesi

Per il percorso della ricerca, sembra necessario indagare e identificare le correnti innovative e le tecnologie degli ultimi decenni che rendono adattivo un involucro edilizio in risposta a stress esterni.
Per questo motivo, la seconda parte della tesi descrive le caratteristiche adattive che può assumere un involucro edilizio, se dotato di sistemi, elementi, componenti e materiali in grado di cambiare e adattare le sue performance a seconda della sollecitazione climatica esterna. L'attenzione quindi, si focalizza sull'aspetto adattivo ed innovativo dell'involucro edilizio, con l'obiettivo di costruire un repertorio critico sulle diverse tecnologie e caratteristiche prestazionali e materiali attraverso la raccolta di dati ed informazioni inerenti le principali linee ricerca e alle esperienze maturate nel settore produttivo.
Da questa indagine analitica-critica, emerge che le strategie adattive vengono applicate, nella maggior parte dei casi, su superifici di involucro di tipo trasperente.
Per queste ragioni, le attività sequenziali di analisi hanno come oggetto le facciate di involucro trasparente di aziende leader nel settore per comprendere non solo le loro performance tecnologiche e prestazionali ma, allo stesso tempo, individuare i possibili deficit che possono compromettere il funzionamento complessivo dell'involucro, se sollecitate da specifiche condizioni climatiche esterne.
In questo contesto, viene messo in evidenza che in letteratura, ci sono studi molto limitati sulle prestazioni a 'lungo termine' dei sistemi di facciate continue; esiti delle indagini e delle esperienze condotte, indicano che le infiltrazioni d'acqua, l'effetto del calore della facciata sono alcuni dei problemi più significativi per questi edifici, che influenzano negativamente le prestazioni complessive del sistema.
Questa raccolta di informazioni, il cui risultato è un repertorio critico sui deficit delle facciate continue, guida la scelta della tipologia della facciata continua su cui avviare la fase applicativa e sperimentale della ricerca.

Requisito	CONTROLLO DEL FLUSSO TERMICO		
Elementi da controllare	Superficie verticale opaca	Superficie orizzontale opaca	Superficie verticale trasparente
Effetti da controllare	- Dispersioni termiche dovute a malfunzionamenti (ponti termici); - Irraggiamento dovuto a materiali superficiali non idonei; - Omogeneità dei materiali che compongono l'involucro; - Assorbimento solare dovuto a isolante termico non adeguato o con uno spessore minimo; - Rischio di surriscaldamento	- Controllo radiazione solare incidente per mantenimento superficiale di Temperature basse; - Riflessività e corrugosità dei materiali utilizzati; - Assorbimento solare dovuto a isolante termico non adeguato o con uno spessore minimo; - Rischio di surriscaldamento	- Irraggiamento solare (a seconda della tipologia di controllo solare del vetro); - Dispersioni termiche; - Rischio di surriscaldamento localizzato
Inneschi su variazioni microclimatiche	- Aumento della temperatura per irraggiamento solare diretto e indiretto, con conseguente diminuzione del livello di comfort termo-igrometrico interno; - Utilizzo di sistemi di ventilazione meccanica con conseguente dissipazione di calore, che spesso si rilevano inefficienti, causando un'immissione nell'atmosfera di un'ulteriore percentuale d CO_2, con conseguente aumento della temperatura dell'aria esterna; - Aumento della quantità di energia necessaria per il raffreddamento nella stagione estiva, con un dispendio energetico; - Energia dispersa per ventilazione; - Temperatura dei materiali maggiore rispetto alla temperatura dell'aria (soprattutto per i materiali con indice di riflessione bassa		
Fenomeni di cambiamento climatico	- Amplificazione dell'intensità dell'ondata di calore; - Amplificazione dell'intensità dell'isola di calore; - Questi fenomeni possono essere amplificati a causa di un aumento dell'umidità dell'aria esterna		

Requisito	CONTROLLO DEL FLUSSO LUMINOSO		
Elementi da controllare	Superficie verticale opaca	Superficie orizzontale opaca	Superficie verticale trasparente
Effetti da controllare	- Non rientra nelle problematiche da controllare	- Non rientra nelle problematiche da controllare	- Controllo dell'ingresso di energia luminosa (dipende dalle caratteristiche tecniche della sup. trasparente); - Controllo del livello di illuminamento; - Controllo del livello di abbagliamento, soprattutto se è riflesso, che può essere prodotto da fonti esterne o interne; - Effetto termico (se esistono) schermature mobili; - Rischio di surriscaldamento
Inneschi su variazioni microclimatiche	- Aumento della temperatura interna per irraggiamento solare diretto, con conseguente diminuzione del comfort interno; - Utilizzo di sistemi di ventilazione meccanica con conseguente dissipazione di calore, che spesso si rilevano inefficienti, causando un'immissione nell'atmosfera di un'ulteriore percentuale d CO_2, con conseguente aumento della temperatura dell'aria esterna; - Aumento della quantità di energia necessaria per il raffreddamento nella stagione estiva, con un dispendio energetico; - Energia dispersa per ventilazione; - Temperatura dei materiali maggiore rispetto alla temperatura dell'aria (soprattutto per i materiali con indice di riflessione bassa		
Fenomeni di cambiamento climatico	- Ondata di calore; - Isola di calore; - Questi fenomeni possono essere amplificati a causa di un aumento dell'umidità dell'aria esterna		

Requisito	CONTROLLO DEL FLUSSO D'ARIA		
Elementi da controllare	Superficie verticale opaca	Superficie orizzontale opaca	Superficie verticale trasparente
Effetti da controllare	- Controllo delle perdite per ventilazione verso l'esterno causati da uno squilibrio nell'uso dei sistemi di ventilazione; - Differenze di pressione tra interni o tra interno-esterno; - Controllo delle perdite per ventilazione verso ambienti non climatizzati (riferimento a pareti interne); - Controllo perdite tra solaio-parete	- Perdite per ventilazione anche da sottotetti; - Riflessività e corrugosità dei materiali utilizzati; - Controllo perdite tra solaio-parete	- Dispersioni termiche per ventilazione; - Adeguato passaggio d'aria in riferimento anche alla quantità di velocità dell'aria all'interno dell'involucro; - Ventilazione indotta dalla radiazione solare; - Posa in opera errata delle superfici trasparenti; - Tipologia di apertura del serramento; - Guasti e perdite nelle sigillature e nelle guarnizioni; - Differenza di pressione che si creano tra parete e infisso, con conseguenti perdite
Inneschi su variazioni microclimatiche	- Utilizzo di sistemi di ventilazione meccanica con conseguente dissipazione di calore che spesso si rilevano inefficienti, causando un'immissione nell'atmosfera di un'ulteriore percentuale d CO_2, con conseguente aumento della temperatura dell'aria esterna; - Energia dispersa per ventilazione; - Vento che crea sovra pressione nel lato sopra vento e depressione sul lato sottovento; - Effetto camino dovuto alla differenza di pressione fra esterno e interno motivata dalla presenza di vento, dal gradiente di temperatura, dall'altezza dell'edificio		
Fenomeni di cambiamento climatico	- Amplificazione dell'intensità dell'ondata di calore; - Amplificazione dell'intensità dell'isola di calore - Questi fenomeni possono essere amplificati a causa di un aumento dell'umidità dell'aria esterna - Amplificazione della velocità del vento (condizione estrema: Tromba d'aria)		

Requisito	CONTROLLO DEL FLUSSO D'ACQUA		
Elementi da controllare	Superficie verticale opaca	Superficie orizzontale opaca	Superficie verticale trasparente
Effetti da controllare	- Controllo delle perdite tra solaio e parete; - Canali di scolo con portata non idoneo; - Materiali che ritardano l'essicazione o l'asciugatura; - Spessore della parete; - Umidità capillare di risalita	- Controllo perdite tra solaio-parete; - Materiali che ritardano l'essicazione o l'asciugatura; - Controllo del sistema impermeabile	- Posa in opera errata delle superfici trasparenti; - Guasti nelle sigillature e nelle guarnizioni e conseguenti perdite; - Sistemi di apertura; - Controllo perdite tra solaio-infisso
Inneschi su variazioni microclimatiche	Dagli effetti per ogni elemento dell'involucro edilizio sopra riportati, si ha un riscontro positivo sulla possibilità che l'involucro edilizio, attraverso i suoi elementi, possa innescare variazioni a livello microclimatico riguardo il controllo del flusso d'acqua. Tuttavia questo non significa che le diverse infiltrazioni d'acqua non hanno conseguenze, ma queste gravano soprattutto sull'involucro, in quanto comportano un degrado e un invecchiamento dei materiali e, se questi presentano già basse caratteristiche prestazionali o non sono idonei per il controllo del flusso d'acqua, i danni sull'involucro possono essere maggiori.		
Fenomeni di cambiamento climatico	-Un flusso d'acqua costante e non controllato potrebbe amplificare il rischio di alluvioni e allagamenti; -Questo fenomeno può essere amplificato dalla presenza del vento		

Note

1. "L'ambiente costruito ha generalmente una vita di 40-100 anni e la forma urbana ha una longevità ancora maggiore. Questo rende il cambiamento climatico cambiamento un problema attuale, piuttosto che futuro." Shaw, R., Colley, M., & Connell, R. (2007). *Climate change adaptation by design: a guide for sustainable communities*. p.3. TCPA, London.

2. La Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC) è una partnership volontaria di governi nazionali e locali, organizzazioni intergovernative, imprese e associazioni con un obiettivo comune: Un settore delle costruzioni a emissioni zero, efficiente e resiliente. Per ulteriori informazioni, consultare il sito: http://globalabc.org/

3. L'Ambiente costruito è l'insieme delle realizzazioni umane che trasformano l'ambiente naturale. L'edilizia è la principale attività di trasformazione dell'ambiente umano. Il primario stato dell'ambiente è continuamente modificato e rimodellato dall'uomo adattandolo alle sue esigenze. Una delle principali trasformazioni concerne la costruzione di case e abitazioni, il cosiddetto ambiente abitativo, ma anche le lavorazioni agricole e le opere di viabilità. Gli ambienti costruiti sono agglomerati edilizi e infrastrutture di collegamento. L'ambiente costruito è quindi la fusione dell'elemento naturale con le opere dell'essere umano. Fonte: https://www.okpedia.it/ambiente-costruito

4. I sistemi insediativi con i loro specifici caratteri morfologici, organizzativi, dispositivi, fisico-costitutivi e funzionali, interagiscono con le componenti climatico-ambientali (soleggiamento, ventilazione, umidità dell'aria) definendo, nell'ambito di un regime climatico di più ampia scala, un particolare sottosistema microclimatico che va a caratterizzare l'ambiente urbano nonché gli specifici "ambiti locali" definiti dalle particolari condizioni di assetto e costituzione.
D'Olimpio, D. (2008). *La progettazione del microclima urbano: le caratteristiche microclimatiche in ambiente urbano come fattori per la definizione della qualità ecosistemica dei sistemi insediativi*. Kappa.

5. Il canyon consiste nella combinazione di due superfici verticali e di una orizzontale ed è formato tipicamente da due edifici adiacenti e da una strada che percorre tra essi. La sua geometri influenza il bilancio energetico in molteplici modi: aumenta la superficie esposta ai processi di scambio, complica l'ingresso della radiazione solare, limita la capacità di dispersione della radiazione infrarossa ad onda lunga e limita la turbolenza dell'aria. I canyon urbani catturano infatti una maggiore quantità di radiazione solare, intrappolata dalle numerose riflessioni multiple che i raggi solari subiscono da parte delle pareti dei palazzi e del fondo stradale.

6. Il Programma nazionale per la ricerca (PNR), previsto dal D.Lgs. 204/1998, è il documento che orienta le politiche della ricerca in Italia, alla realizzazione del quale concorrono le amministrazioni dello Stato con il coordinamento del Ministero dell'Università e della Ricerca. Il PNR 2021-2027 è articolato in priorità di sistema, grandi ambiti di ricerca e innovazione e relative aree d'intervento, piani nazionali e missioni. In questa ricerca si fa riferimento all'ambito della ricerca *Clima, Energia, Mobilità sostenibile* con la relativa area di intervento Cambiamento climatico, mitigazione e adattamento, in cui un ruolo importante lo svolge la ricerca nel fornire risposte concrete e dialogare con le istituzioni e le comunità, tenendo conto che l'agire collettivo è l'unico che può modificare l'evoluzione del clima. Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://www.mur.gov.it/it/aree-tematiche/ricerca/programmazione/programma-nazionale-la-ricerca

7. "Gli edifici sono ad alto rischio di danni a causa degli impatti dei cambiamenti climatici previsti dei cambiamenti climatici, avendo già sperimentato un forte aumento dei danni causati da fenomeni meteorologici estremi negli ultimi decenni. L'intensità e la natura di questi impatti possono variare notevolmente da regione a regione". Da ciò risulta necessario un cambiamento radicale nel settore dell'edilizia che allo stesso tempo richiede una politica e un'azione sostenuta nella progettazione, nella costruzione e nel funzionamento degli edifici e delle loro attrezzature, beneficiando di incentivi politici e di mercato.
Chalmers, P. (2014). *Cambio Climático: Implicaciones para los Edificios.* Hallazgos Claves del Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. p.4. ECF, BPIE, GBPN, WBCSD, CJBS, CISL. Online avaible at: https://www.construction21.org/espana/articles/h/cambio-climatico-implicaciones-para-los-edificios-las-principales-conclusiones-del-ipcc.html Accessed: 30 ottobre 2022

8. "Il cambiamento climatico non presenta solo cambiamenti nelle condizioni meteorologiche, ma impone anche incertezze sulle prestazioni degli edifici". Yassaghi, H., & Hoque, S. (2019). An overview of climate change and building energy: Performance, responses and uncertainties. *Buildings*, 9(7), 166. pp.1-24 (cit. p. 7). DOI: 10.3390/buildings9070166

9. Una bomba d'acqua ha origine quando, per differenza di temperatura tra il suolo e il cielo, si formano nuvole cariche di acqua. L'aria calda proveniente dal mare risale fino ad incontrare correnti più fredde che la fanno condensare e facilitano la formazione di nubi temporalesche. Nel periodo estivo, quando le acque marine sono più calde, e nei primi mesi d'autunno, quando la temperatura dell'aria inizia a calare, questi fenomeni sono più frequenti poiché la differenza tra masse d'aria, quella umida e calda proveniente dal mare e quella più fredda negli strati superiori dell'atmosfera, aumenta.

10. Alle medie latitudini le precipitazioni hanno origine dai cristalli di ghiaccio contenuti dentro le nubi che raggiungono in tempi brevi dimensioni tali da cadere al suolo senza evaporare prima dell'impatto con il terreno. Lo stato della precipitazione (solido e/o liquido) dipende dalla temperatura degli strati atmosferici attraversati durante la caduta. In particolari condizioni, quando la differenza di temperatura fra il suolo e gli strati superiori dell'atmosfera è molto elevata, le nubi temporalesche danno luogo a rovesci di grandine, cioè alla caduta a scrosci di chicchi di ghiaccio.

11. Il processo di formazione di una tromba d'aria è legato a caratteristiche atmosferiche particolari. Le condizioni propizie per la formazione di cumulonembi si trovano negli ambienti fortemente instabili, caratterizzati da venti variabili a seconda dell'altezza e dalla presenza di una massa di aria calda e umida, sovrastata da una fredda e secca, che sollevandosi e condensandosi dà origine a forti temporali

12. "Sebbene le strutture non siano generalmente progettate in modo specifico per questi eventi imprevisti, è probabile che ciò possa causare un collasso durante la loro vita utile. È inoltre probabile che la natura del pericolo previsto cambi durante la vita dell'edificio." Laminou, L. M., Liu, Z. J., & Chen, X. H. (2019).

Extreme events design and mitigation methods: A review. *Civil Engineering Journal*, 5(6), pp. 1424-1439. (cit. p. 1425). DOI: 10.28991/cej-2019-03091342

13. I flying debris, ovvero detriti volanti, sono oggetti di varie dimensioni di parti di edificio, di arredo urbano o di elementi naturali che, a causa di eventi estremi come raffiche di vento, possono staccarsi e causare danni indiretti su altri elementi che sostituisco il contesto urbano. Il volo e il conseguente impatto dipende dal peso del detrito e dalla velocità del vento.

14. La pioggia battente è definita come la pioggia trasportata dal vento che colpisce le superfici verticali. La pioggia battente dipende dai parametri meteorologici della velocità del vento e delle precipitazioni, ma la distribuzione spaziale della pioggia battente su una determinata superficie dell'edificio dipende strettamente da fattori locali come la geometria dell'ambiente circostante e la direzione del vento rispetto alla superficie considerata.

15. Per *effetto matrioska* si vuole intendere il contenitore che diventa anche contenuto di qualcosa di più grande, innescando relazioni biunivoche, anche inconsapevoli, di isomorfismo, inteso come corrispondenze fra due insiemi. La matrioska può essere, infatti, un'efficace metafora utile a spiegare come funziona il sistema dell'ambiente costruito e le relazioni esistenti tra edificio e contesti urbani e ambientali.

16. Gli edifici possono essere danneggiati in maniera più o meno estesa a seconda della grandezza dei granelli, per quanto, anche chicchi più piccoli, quelli con diametri intorno ai 2 cm, possono danneggiare elementi in plexiglas come serre e lucernari se la loro velocità raggiunge i 70 km/h. Diametri di 3-5 cm possono distruggere il manto di copertura (tegole, scandole, ecc.), ma anche rompere i vetri delle finestre se la loro velocità raggiunge i 90-110 km/h. In ogni caso con una dimensione dei chicchi che supera i 6 cm, (una palla da biliardo), unita a raffiche di vento che raggiungono i 120 km/h, nessuna copertura riesce a rimanere completamente intatta, oltre ad arrecare serio pericolo alle persone. Online avaible at: https://www.agenziacasaclima.it/it/i-danni-della-grandine-sugli-edifici--9-2309.html Accessed: 3 novembre 2022

17. "Decidere come costruire al meglio la capacità di adattamento può essere un processo difficile. C'è incertezza su come i fattori legati al clima cambieranno in futuro e sugli aspetti non climatici."
Roberts, S. (2008). Effects of climate change on the built environment. *Energy Policy*, 36(12), pp. 4552-4557. (cit. p. 4555). DOI: 10.1016/j.enpol.2008.09.012

References

Chalmers, P. (2014). *Cambio Climático: Implicaciones para los Edificios. Hallazgos Claves del Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. ECF, BPIE, GBPN, WBCSD, CJBS, CISL. Online avaible at: https://www.construction21.org/espana/articles/h/cambio-climatico-implicaciones-para-los-edificios-las-principales-conclusiones-del-ipcc.html Accessed: 30 ottobre 2022 Cit. pag. 4.

De Lauretis, R., & Taurino, E. (2014). L'inventario nazionale delle emissioni: differenze tra inventari nazionali e inventari bottom-up, possibili sinergie e criticità. *ISPRA, Stato dell'Ambiente* 54/14. pp. 3-12. ISBN 978-88-448-0686-6. Cit. pag. 5.

IPCC (2022). Annex II: Glossary [Möller, V., R. van Diemen, J.B.R. Matthews, C. Méndez, S. Semenov, J.S. Fuglestvedt, A. Reisinger (eds.)]. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. pp. 2897–2930. DOI:10.1017/9781009325844.02 Cit. pag. 2912.

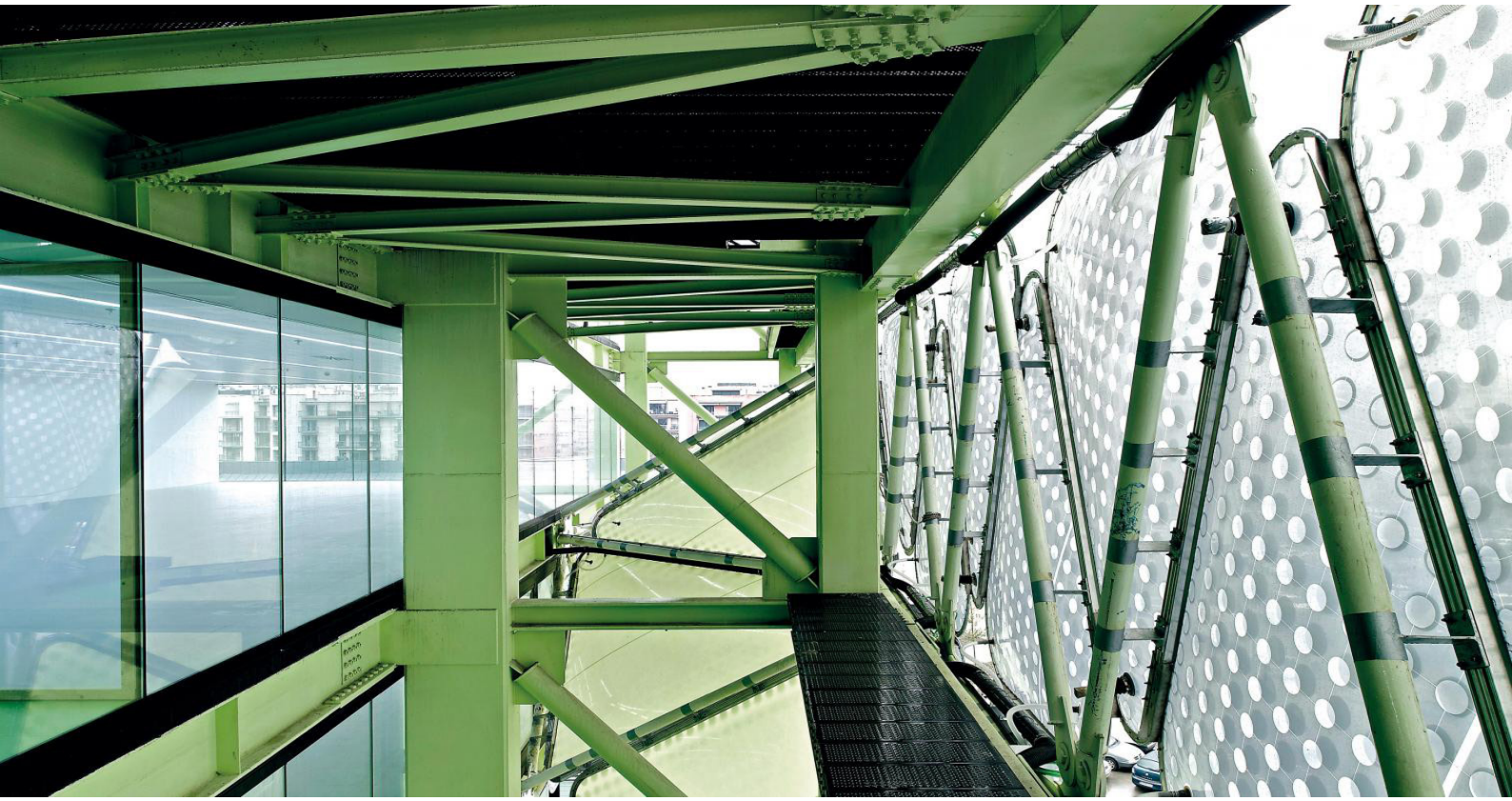
Laminou, L. M., Liu, Z. J., & Chen, X. H. (2019). Extreme events design and mitigation methods: A review. *Civil Engineering Journal*, 5(6), pp. 1424-1439. DOI: 10.28991/cej-2019-03091342 Cit. pag. 1425.

MUR (2020). Programma nazionale per la ricerca 2021-2027. (Delibera n. 74/2020). p. 122. Online avaible at: https://www.mur.gov.it/it/aree-tematiche/ricerca/programmazione/programma-nazionale-la-ricerca Accessed: 30 ottobre 2022 Cit. pag. 122.

Roberts, S. (2008). Effects of climate change on the built environment. *Energy Policy*, 36(12), pp. 4552-4557. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.09.012 Cit. p. 4555.

Shaw, R., Colley, M., & Connell, R. (2007). *Climate change adaptation by design: a guide for sustainable communities*. TCPA, London. Cit. pag. 3.

Yassaghi, H., & Hoque, S. (2019). An overview of climate change and building energy: Performance, responses and uncertainties. *Buildings*, 9(7), 166. pp.1-24. DOI: 10.3390/buildings9070166 Cit. pag. 7.



PARTE SECONDA:
Le interconnessioni scalari e disciplinari dello stato dell'arte

L'innovazione dei sistemi tecnologici dell'involucro edilizio

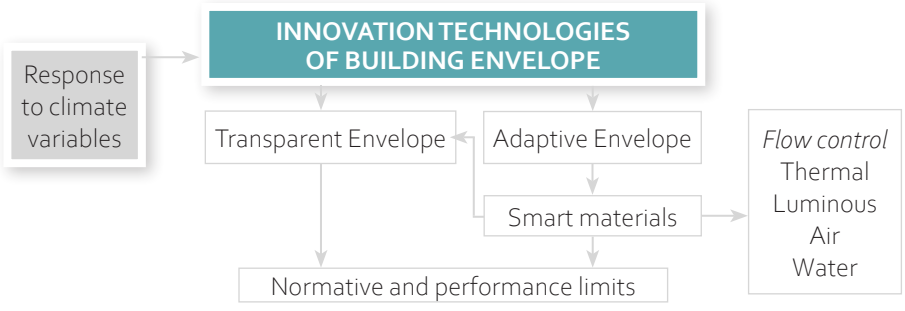
Capitolo 4

Lo sfondo consolidato
L'involucro edilizio: definizioni, prestazioni e requisiti

Abstract

The Chapter 4 objective is to highlight the strategic role of the building envelope, capable of managing the interactions created between the building and its context, in order to achieve thermal comfort and improve the building's overall performance.
The building envelope, or rather the building façade, becomes a driver of innovation for the development of technologies and materials that are capable of responding to external stresses.
The focus is on the adaptive aspect that façades can achieve through the incorporation of advanced technologies in order to understand how they can respond to the effects of climate change. Adaptive façades can change geometric configuration through the use of mechanised systems such as actuators or through the intrinsic properties of the material they are made of.
The analysis focuses on the second category, which includes smart systems, active and advanced materials that do not need complex electromechanical systems or energy supply to change their configuration and adapt to external stresses.
In order to identify the most promising technologies from an adaptive façade point of view, case studies related to smart materials are analysed from the sector literature, putting them into a system with their ability to control thermal, light, air and water flow. In this transition from a static to an adaptive envelope, the framework that is constructed is intended to serve as a basis for possible adaptive technological solutions and as a reference tool for the acquisition of knowledge regarding the innovation and experimentation of smart materials for façades.

Key-words
building envelope, adaptive facades, smart materials, case studies, flow control



Capitolo 4: Thematic Flow-Chart - Fase Analitica (indiretta)

4.1 Una reinterpretazione critica sulle prestazioni dell'involucro edilizio

> "So, similar to that of the human skin, the idea of building skin refers to a building envelope—internal or external, without distinction between walls and roof—that partly or totally loses its mainly structural purpose to advantage a functional interactive/organic behavior."[1]
> [Del Grosso, & Basso, 2010, p. 1]

Premessa

Il capitolo IV ha come oggetto di analisi conoscitiva-critica il nuovo ruolo dell'involucro edilizio, soffermandosi sulle sue caratteristiche di adattività che, dagli ultimi decenni, stanno caratterizzando i sistemi di involucro. Questo capitolo risponde all'esigenza di strutturare un quadro conoscitivo sulle recenti innovazioni tecnologiche dell'involucro edilizio, al fine di individuare e delineare quali sono i requisiti prestazionali da tenere in considerazione e controllare a fronte dei fenomeni di cambiamento climatico.

Per il percorso metodologico della ricerca, il capitolo che segue mira quindi a sostanziare l'apporto tecnologico e funzionale degli involucri edilizi di tipo adattivo connesse allo studio della relazione edificio-contesto, mettendo in evidenza le loro potenzialità, le loro caratteristiche prestazionali e i limiti di applicazione.

Sebbene gli studi di settore sulla relazione tra involucro edilizio adattivo e cambiamento climatico sono ancora limitati, in questo contesto, il concetto di adattività viene riferito ai materiali, ai componenti e agli elementi che costituiscono l'involucro edilizio, attraverso i quali l'involucro ha la possibilità di reagire in maniera positiva ad una sollecitazione o stress esterno. La caratteristica di adattività negli involucri si declina in molteplici aspetti: una variazione della forma, della geometria, del materiale ma con un unico obiettivo ovvero, l'implementazione delle prestazioni complessive dell'involucro edilizio.

La letteratura sul tema dell'adattività dell'involucro è molto vasta e in continua evoluzione e, per queste ragioni, il campo di indagine e discussione prende in considerazione la famiglia degli *smart materials*, materiali definiti intelligenti e attivi che, in base alla loro composizione chimica, possono piegarsi, restringersi o espandersi in risposta ad uno specifico cambiamento.

Si precisa che non si tratta di definire una soluzione tecnologica, ma di orientare delle possibili soluzioni per gli involucri edilizi, oggi più che mai sollecitati da eventi estremi di cambiamento climatico.

D'altro canto, l'attuale discorso sui costi ambientali ed energetici del settore delle costruzioni ha determinato un ulteriore passo avanti nell'applicazione di sistemi tecnologici evoluti volti a soddisfare obiettivi Europei[2] e nazionali[3] sempre più prescrittivi.

La letteratura suggerisce che il rapido aumento delle temperature nell'ambiente costruito, l'aumento dei rischi connessi al cambiamento climatico sono tra le ragioni dell'attuale necessità di edifici più efficienti dal punto di vista energetico e ambientale [Geissler, et al., 2018]. Un aspetto critico è determinato dalla preponderanza di diverse concezioni e opinioni sulle varie strategie per raggiungere un'ottimizzazione a livello delle prestazioni energetiche negli edifici, la cui conseguenza è la mancanza di una chiara classificazione delle strategie esistenti applicabili in diverse tipologie di edifici che possa essere una guida tecnica per il settore delle costruzioni [Erebor, et al., 2021].

La verifica del grado di integrabilità di questi sistemi in termini di resa prestazionale (energetica, ambientale e tecnologica) si riversa nel tentativo di comprendere le interazioni che si creano tra edificio e contesto climatico di appartenenza dove, l'elemento più studiato per questo scopo è l'involucro edilizio.

Terminologia

Il termine involucro[4] deriva dal latino *involŭcrum*, der. di *involvĕre* 'involgere' e indica ciò che involge un oggetto, costituendo per esso un rivestimento, definendo un sistema complesso, dotato di spessore proprio che è del tutto indipendente dal contenuto dell'edificio [Busa, 2012] e non necessariamente con funzione isolante.

L'involucro si può definire come un sistema tridimensionale di chiusura integrale dell'edificio che delimita e conclude perimetralmente l'organismo costruttivo e strutturale, detto perciò 'di frontiera' [Milardi, et al., 2021], assumendo la funzione di primo elemento separatore tra esterno e interno. La funzione della frontiera si rileva nella capacità di regolazione del bilancio energetico dell'edificio e nella diminuzione dei consumi [Rossetti, 2019].

Già nel 1963, Hutcheon [1963] sosteneva diversi requisiti funzionali dell'involucro relativi al controllo del flusso di calore, d'aria, d'acqua e di vapore acqueo, della radiazione solare, del rumore e del fuoco nonché di provvedere a fornire sicurezza, resistenza, rigidità e durabilità. I requisiti non sono riportati in ordine di importanza ma si evidenzia che spesso si influenzano l'un l'altro in modo conflittuale e simbiotico, creando delle interrelazioni che rendono necessaria la presa in considerazione dei diversi aspetti contemporaneamente [Hutcheon, 1963; Modin, 2014].

Da ormai diversi decenni, il concetto di involucro edilizio si è diffuso rapidamente e, l'interesse verso questo elemento è attribuibile alle sue molteplici funzioni di mantenimento del comfort termico e igrometrico, di contenimento di consumi energetici al fine di soddisfare requisiti ambientali e tecnologici [Ascione, et al., 2021].

I *requisiti ambientali* si classificano in:
- Mantenimento della temperatura dell'aria negli spazi abitativi nelle stagioni di esercizio degli impianti di riscaldamento entro i limiti di legge di 20 – 22 °C;
- Mantenimento delle condizioni di comfort termico in ambienti interni nel periodo estivo.

Per *requisiti tecnologici* si intende:
- Controllo dei fenomeni di condensa superficiale e interstiziale;
- Controllo della combinazione 'Temperatura – Umidità – Ventilazione';
- Resistenza termica e inerzia termica ai fini del risparmio energetico e del comfort ambientale interno.

Questo è dovuto principalmente al fatto che, dagli inizi del 1900, il raggiungimento dei requisiti sopra citati ai fini del comfort era demandato agli impianti di riscaldamento e raffreddamento[5] o a soluzioni di coibentazione, connotando una progettazione non attenta al clima ma, le crescenti preoccupazioni di qualità energetica ed ambientale hanno provocato un'inversione di tendenza, affermando il ruolo energetico dell'involucro[6] [Di Ruocco, 2012]. Gli involucri edilizi dovrebbero intendersi come sistemi di autocontrollo in grado di garantire prestazioni energetiche e ambientali, conformandosi con i livelli innovativi di conoscenza tecnica [Perriccioli, & Rossi, 2005]. La trasformazione del significato del termine riflette il miglioramento delle tecniche di costruzione, nonché l'utilizzo di materiali innovativi, generando una progressiva scorporazione delle funzioni strutturali da quelle di controllo termico ed acustico, estetico [Perino, & Serra, 2015].

Il Decreto Legislativo 311/2006, contenente le indicazioni in materia di certificazione energetica degli edifici, individua infatti l'involucro edilizio come l'insieme delle strutture edilizie esterne che delimitano un edificio. Quando si parla di prestazioni energetiche dell'involucro edilizio si indica il comportamento in uso degli elementi costruttivi che costituiscono le chiusure[7] definite secondo la Normativa UNI 8290:1981 di un edificio, rispetto a sollecitazioni indotte da azioni termiche e igrometriche.

Quindi, si è passati dalla distinzione tra chiusure e tamponamenti esterni, all'identificazione dell'intero sistema di chiusura esterno di un edificio, articolato in diversi elementi tecnici interdipendenti quali, strati[8] funzionali e materiali; a tal proposito, gli strati funzionali possono essere identificati come strati di supporto, strati di tenuta all'acqua o di tenuta all'aria, a seconda della loro funzionalità rispetto alle prestazioni complessive dell'intero sistema.
Per quanto riguarda gli elementi che costituiscono l'involucro edilizio, questi possono essere distinti in componenti *opachi* e *trasparenti*: i primi comprendono pareti, tetti, solette, pareti di scantinati e porte opache, mentre i secondi comprendono finestre, lucernari, ventilatori, porte con più di mezzo vetro e pareti in vetrocemento.
Reyner Banham nel suo libro *Architecture of the Well Tempered Environment* – punto di riferimento per gli studi scientifici sull'involucro - è stato uno dei primi a teorizzare una visione innovativa dell'involucro edilizio, che viene concepito come un sistema in grado di variare le proprie prestazioni al mutare delle situazioni ambientali esterne e delle esigenze di coloro che vivono l'ambiente confinato [Banham, 1969], con il conseguente miglioramento del comfort abitativo e della qualità di vita dell'utente.
Per potenziare tali funzioni, l'involucro edilizio non assume la forma statica di pareti opache massive[9], alle quali era demandata la conservazione dell'energia, ma diviene superficie dinamica ambientale nella misura in cui riesce a gestire e controllare gli scambi di flussi tra ambiente esterno ed interno [Davies, 1981].
L'involucro edilizio ha l'esclusiva funzione di rapportarsi direttamente con le condizioni climatiche esterne quali freddo, caldo, umidità, precipitazioni, vento, luce; con gli aspetti critici del luogo, quali le fonti di inquinamento acustico, elettromagnetico, dell'aria.
Grazie agli sviluppi della ricerca tecnologico-architettonica, si ha la possibilità di utilizzare e progettare con componenti e soluzioni di involucro di alta qualità e complessità tecnologica e di un crescente contenuto innovativo ed ambientale.

Rispetto al vasto ambito dell'involucro edilizio, è bene precisare che l'obiettivo della presente trattazione non mira a descrivere nello specifico le diverse tappe che hanno contraddistinto il suo percorso evolutivo ma a mettere in evidenza il suo comportamento prestazionale in funzione degli assetti di tipo tecnologico che oggi, più che mai, intendono rispondere a fattori micro e macro ambientali da parte dei fruitori dell'architettura *involucrata*[10]. Oltre all'aspetto tecnologico, si vuole mettere in luce come l'aspetto materico risulta una componente fondamentale sia per regolare le prestazioni e sia per caratterizzare l'immagine estetica dell'involucro edilizio[11].
Difatti, le attuali esigenze di cambiamento (si intende qui il cambiamento a livello di ottimizzazione delle prestazioni degli involucri per ridurre il loro impatto ambientale-energetico a fronte dei fenomeni di cambiamento climatico in atto) determinano una trasformazione a livello formale attraverso l'integrazione di sistemi sempre più articolati ma che contribuiscono alla definizione di un nuovo linguaggio architettonico [Conato, & Frighi, 2018].
Come viene affermato da Tucci [2014], l'involucro ha la capacità di rispondere agli stimoli esterni prodotti, ne assorbe i contenuti tecnologici e gli aspetti formali, controllando le interazioni dell'architettura con le problematiche climatiche ed energetiche.
L'analisi sull'involucro si vuole concentrare su un approccio *performance-based building* PBB[12] [Becker, 2008; Hensen, & Lamberts, 2012], dove le informazioni su performance e specificazioni di prestazione del sistema degli elementi tecnologici sono da ricondurre al miglioramento delle prestazioni e qualità ambientale dell'ambiente costruito, in linea con la normativa vigente [Zanchetta, et al., 2014].

Nell'ambito della tematica del cambiamento climatico, che viene affrontata nella ricerca, l'interesse per l'involucro edilizio si materializza nell'analisi delle sue caratteristiche prestazionali rispetto a nuovi requisiti ambientali (dettati dagli eventi estremi del cambiamento

climatico analizzati) a cui deve rispondere e nuove risposte tecnologiche, per garantire un equilibrio termico dell'involucro.

Per la ricerca, questo non significa isolare l'involucro o demandare alla trasmittanza termica[13] (per involucro opaco e trasparente) o al fattore solare[14] (per involucro trasparente) il controllo dell'efficienza complessiva del sistema edificio ma significa intervenire sull'involucro stesso, attraverso una variazione nel materiale o nella geometria/forma.
Risulta utile porre l'attenzione sul fatto che, i materiali dell'involucro non solo agiscono e incidono sul comfort ambientale ma anche sul comfort del microclimatico esterno (Cfr. Cap. 2) in base alle loro caratteristiche fisico-tecniche quali, assorbenza, riflessività, rugosità e di conseguenza sono capaci o meno di intercettare i flussi termici ed energetici, regolando la qualità dell'ambiente costruito.
Come sottolineato da Loonen [Loonen, et al., 2013], questo approccio statico alla progettazione degli edifici che rileva l'applicazione di soluzioni indipendenti, spesso tra di loro concorrenti, può essere inadeguato rispetto al contesto dinamico con la conseguenza che il risultato progettuale risulti slegato dalle dinamiche ambientali con una compatibilità limitata rispetto al controllo dei flussi di cui l'involucro ne è responsabile regolatore.
In aggiunta, le caratteristiche dell'involucro – attribuite alla condizione statica dell'involucro edilizio - non devono essere rappresentate da un valore numerico valido in qualsiasi luogo e situazione climatica ma alla sua modalità di lavoro funzionale in costante interazione tra spazio interno ed esterno, identificati come condizioni ambientali in continuo mutamento [Tucci, 2014].
Per comprendere meglio questo assunto, si specifica che la trasmittanza termica U [W/m2K], calcolata attraverso la Normativa UNI EN ISO 6946:2018[15] e il fattore solare G, definito dalla Norma UNI EN 410:2011[16], sono considerati parametri statici che caratterizzano la trasmissione del calore attraverso l'involucro e quindi non risultano idonei alla caratterizzazione prestazionale complessiva del sistema involucro se non messi a sistema con i parametri esterni del contesto di riferimento.
I parametri relativi all'ambiente esterno, da tenere in considerazione per una corretta e reale misura delle prestazioni degli involucri, sono la temperatura dell'aria esterna, la radiazione solare, l'umidità esterna, la velocità del vento all'aperto, il livello di illuminazione esterna e il livello sonoro esterno [Kumar, & Raheja, 2016], mentre i principali parametri fisici che influenzano il comfort sono la temperatura dell'aria, la temperatura media delle superfici, i valori di ricambio e velocità dell'aria, l'umidità relativa, la luminanza e l'illuminamento.

Pertanto, la metodologia che si intende applicare alla ricerca consiste nello studio delle prestazioni di un involucro edilizio progettato come caso studio al fine di verificare la sua corretta progettazione e la validità delle soluzioni tecnologiche che vengono riferite ad un dato contesto climatico ambientale, attraverso azioni di testing in regime simulato (Cfr. Cap. 7).

Sebbene fino ai primi anni del XXI secolo, lo scopo principale dei progettisti – al fine di ottenere prestazioni energetiche ambientali - era quello di minimizzare le perdite termiche dell'involucro edilizio, massimizzando la disconnessione tra ambiente interno ed esterno [Loonen, 2018], oggi, gli indirizzi di innovazione si spingono nell'applicazione integrata di componenti e sistemi selettivi, a proprietà variabili e a configurazioni dinamiche.
Come denunciato nella citazione riportata all'introduzione del presente paragrafo, alla *skin* dell'involucro, ovvero la sua pelle [Scudo, & Rogora, 1998; Del Grosso, & Basso, 2010], viene demandato il maggiore sforzo di assolvere una serie di prestazioni chiave che ne fanno l'elemento cardine di un nuovo approccio di interazione con i fattori ambientali mutevoli, a vantaggio di una funzionalità regolatrice.

Secondo Thomas Herzog[17] – pioniere della progettazione in linea con il contesto - l'elemento chiave dell'edificio è quindi l'involucro esterno, concepito come un mezzo di scambio energetico che reagisce in modo flessibile alle specifiche condizioni locali [Eteghad, et al., 2014]. La pelle[18] agisce quindi come parte integrante dell'edificio reagisce agli stress esterni e alle esigenze degli occupanti [Wyckmans, 2005].
"*L'analogia del Filarete tra l'organismo umano e l'organismo edilizio sembra trovare motivazioni forti, al punto che l'involucro rappresenta la terza pelle dell'edificio ed in comune con la pelle dell'uomo, si comporta da membrana di interscambio di informazioni multimediali, di flussi termici*" [Buanne, 2015, p. 181].
Questo concetto permette di sottolineare come la pelle degli edifici è in grado di captare e calibrare gli apporti degli agenti atmosferici quali, acqua, aria, calore, illuminazione e contemporaneamente trasmettere segnali a scala urbana, proprio per la dimensione delle facciate [Rossetti, 2019; Gasparini, 2009].
In questo contesto appare utile riportare la definizione di facciata che deriva dal latino facies, ossia forma, aspetto, faccia, con la quale si identifica il volto dell'edificio, in altre parole, la facciata rappresenta la parte esterna anteriore e principale dell'edificio attraverso la quale viene proiettata la propria identità formale ed estetica.
La sostanziale differenza tra involucro e facciata rispecchia la loro funzione a livello strutturale: l'involucro è prevalentemente portante, ed è in parte o del tutto autonomo dal punto di vista spaziale e/o strutturale mentre la facciata è dipendente dalle altre parti e sistemi dell'edificio, sia a livello formale che a livello tecnologico [Di Ruocco, 2012].
La facciata, intesa come sistema bidimensionale ed unidirezionale è il punto di partenza per identificare le potenzialità della pelle come membrana di confine tra ambiente interno ed esterno, che diventa tridimensionale e bidirezionale [Romano, 2011].
Se si prende in considerazione l'ambito normativo, la classificazione della facciata collocata all'esterno dell'edificio, senza funzione portante rispetto all'edificio, viene declinata all'interno della norma UNI EN 13830:2022 Facciate continue - Norma di prodotto[19], che definisce la facciata continua.
"*parte dell'involucro edilizio realizzata con una struttura solitamente costituita da profili orizzontali e verticali, collegati assieme e ancorati alla struttura di supporto dell'edificio e contenente tamponamenti fissi e/o apribili, che fornisce tutte le funzioni richieste di una parete interna o esterna o parte di essa, ma non contribuisce alla capacità portante o alla stabilità della struttura dell'edificio*".

In questo contesto, lo scopo non è descrivere le caratteristiche delle facciate continue a cui sarà dedicato il Cap. 5 ma questa definizione appare utile nel comprendere come l'involucro ha evoluto la sua configurazione geometrica, materica, funzionale rispetto a requisiti ambientali e tecnologici e definiti dalla normativa in materia.
La progettazione delle superfici dell'involucro diventa un campo interdisciplinare[20] in quanto acquisiscono nuove specificità e prestazioni, trasformandosi in interfacce variabili intese come membrane[21] osmotiche che regolano flussi complessi, da quelli ambientali naturali (radiazione solare, radiazione luminosa, vento) a quelli materici, in grado di controllare e disattivare segnali utili per determinare le attività *metaboliche*[22] degli edifici [Milardi, 2015].
Lo studio e la sperimentazione sull'involucro esprimono le qualità tecnologiche e prestazionali ed individuano una classificazione rispetto alle strategie tecniche che vengono applicate all'involucro tali da renderlo *attivo*, *passivo*, *ibrido*, *integrato*, strategie queste le cui caratteristiche e requisiti sono dichiarati ampiamente condivisi e dibattuti dalla letteratura scientifica [Romano, 2011; Tucci, 2014; Milardi, 2020]. Gli edifici di ultima generazione, infatti, prevedono anche di immagazzinare il calore, direzionare e regolare la luce naturale, possono controllare i flussi di aria e generare in qualche caso energia.
Una reinterpretazione delle performance energetiche e ambientali dell'involucro edilizio

deriva quindi dalla sua capacità di interfacciarsi dinamicamente con l'ambiente al variare delle condizioni interne ed esterne. Alla base quindi dell'evoluzione tecnologica e prestazionale dell'involucro edilizio, si traccia il contributo proveniente dalla transizione dell'Industria 4.0[23], in cui le tecnologie informatiche avanzate, l'Internet of Things IOT[24] e i sistemi smart[25] implicano cambiamenti orientati alle infrastrutture intelligenti e alla digitalizzazione delle metodologie.
L'applicazione di questi sistemi provenienti dalle recenti risultanze innovative (anche da altri settori industriali) propone l'*aggiornamento* e la trasformazione dell'involucro edilizio, nello specifico nelle facciate, incorporando sensori, attuatori che alimentano sistemi di controllo computerizzati, attraverso un'architettura a strati [Candia, et al., 2018].
I principi della trasformazione sono dovuti, in maggior sostanza, alla digitalizzazione e connessione dei sistemi smart in modo da ottenere molti benefici: come ad esempio il controllo delle funzioni degli elementi che costituiscono l'involucro e il monitoraggio delle prestazioni e una gestione degli eventi in tempo reale.

A tal proposito, riprendendo gli eventi estremi del cambiamento climatico quali temperature estreme, precipitazioni intense, variazione della frequenza del vento - analizzati nel capitolo precedente (Cfr. Cap. 2) - questo significa che l'involucro, attraverso dei sistemi, elementi e/o componenti intelligenti è in grado di leggere e monitorare questi fenomeni climatici e rispondere in maniera efficiente al contesto dinamico da cui derivano le sollecitazioni esterne. Gli effetti del cambiamento climatico comportano una diminuzione del livello di comfort termico nell'edificio, soprattutto se si pensa all'innalzamento delle temperature che la Regione del Mediterraneo deve affrontare.
Rafforzando quanto detto finora, appare chiara la difficoltà nel misurare le prestazioni degli involucri, come ad esempio il controllo degli apporti solari, dei carichi interni, delle dispersioni e dei fenomeni inerziali a fronte di un contesto in continuo cambiamento, coniugati sulla base di parametri valutanti gli scambi di energia (termica, luminosa) attraverso l'involucro. Nel corso della stagione estiva, in particolare durante le successioni di giornate caratterizzate da valori elevati di temperatura e di intensità d'irraggiamento solare, gli involucri edilizi dovrebbero essere progettati e realizzati in modo tale da assicurare condizioni ambientali di sufficiente benessere termo-igrometrico all'interno degli ambienti confinati, anche in assenza di impianti di condizionamento.
Oltre alla trasmittanza termica, alla conduttività e alla resistenza termica, un parametro da tenere in considerazione per il comfort termico è la temperatura operante (operative temperature) definita data dalla norma UNI 10375:2011[26]:
"*la temperatura operante rappresenta la temperatura uniforme di un ambiente nel quale un occupante scambierebbe per irraggiamento e convezione la stessa potenza termica scambiata nell'ambiente in esame termicamente non uniforme*".
La temperatura operante dipende quindi dalla temperatura dall'aria interna e dalle temperature superficiali della zona termica e per calcolarla è necessario un'analisi dinamica per simulare il comfort termico[27] che viene definito dalla norma UNI EN ISO 52016-1.
I dati necessari alla sua valutazione sono:
- i dati climatici della località (temperatura dell'aria esterne, radiazione solare incidente);
- le caratteristiche termofisiche e solari dei componenti dell'involucro edilizio (proprietà dei materiali, tipo di superfici trasparenti, presenza e tipo di schermature);
- le caratteristiche geometriche dell'edificio (orientamento, dimensione, inclinazione delle strutture);
- gli apporti energetici interni (occupanti, luci apparecchiature, ecc.);
- le informazioni sulla ventilazione (gestione delle portate, temperatura dell'aria).
Per ambienti termici moderati, se la differenza tra temperatura media radiante e temperatura dell'aria è inferiore a 4°C e la velocità dell'aria inferiore a 0,2 m/s, la temperatura

operativa può essere facilmente calcolata con la seguente formula: $To = (Ta + Tmr)/2$

Un altro parametro la cui valutazione non è immediata né semplice [D'Ambrosio Alfano, 2006] è la *temperatura media radiante*, la cui metodologia di calcolo è definita dalla norma UNI EN ISO 7726. La temperatura media radiante è definita come la temperatura uniforme di una cavità in cui la perdita di calore per radiazione è uguale a quella di una persona in esame all'interno di una stanza reale; esprime quindi la temperatura di tutte le superfici che circondano una persona all'interno di un ambiente. Il calcolo di tale temperatura è abbastanza complesso e richiede la conoscenza delle temperature di tutte le superfici e dei fattori di vista (ovvero della relazione geometrica che esprime lo scambio termico radiativo tra le varie superfici).
Pertanto, la questione della definizione di condizioni ambientali interne connesse a quelle esterne è la chiave per aumentare le prestazioni complessive dell'edificio al fine di conseguire un alto livello delle condizioni di comfort. Sebbene esistono difficoltà nella misurazione di alcuni parametri, l'utilizzo di software di modellazione e simulazione energetica nelle prime fasi di progettazione dovrebbe garantire il raggiungimento delle riduzioni desiderate del consumo energetico, per evitare il surriscaldamento e per minimizzare i picchi di carico energetico [Lehmann, 2011].
Riprendendo il concetto di approccio *performance-based building* analizzato precedentemente che non è in grado di fornire parametri di riferimento concreti di adattività, gli sforzi della ricerca intendono mirare allo sviluppo di indicatori di performance per gli involucri edilizi con lo scopo di fornire una descrizione delle prestazioni degli involucri rispetto a una serie di requisiti ben definiti. Tuttavia, a seguito all'evoluzione dei bisogni dell'uomo e soprattutto alle criticità climatiche, vi è la necessità di introdurre nuovi requisiti prestazionali per soddisfare le diverse esigenze e questioni ambientali ed energetiche.
Nonostante i progressi compiuti, questi tentativi di solito non riescono a superare lo status quo per cui gli involucri edilizi sono tipicamente progettati come elementi statici in un contesto ambientale dinamico. Essendo statico o fisso, l'involucro edilizio convenzionale non ha modo di rispondere ai cambiamenti delle condizioni atmosferiche nel corso della giornata e dell'anno e alla natura variabile delle esigenze degli occupanti [Loonen, et al., 2011].

Ai fini dell'innovato comportamento prestazionale e tenendo in considerazione di quanto le superfici esterne incidano sul comfort termico e sulla qualità microclimatica, si realizzano involucri *sensibili* e *rispondenti* in ragione dell'apporto dei sistemi di sensori e attuatori che definiscono il carattere adattivo dell'involucro edilizio.
Le facciate ad alte prestazioni dotate di avanzati sistemi adattivi aprono nuove possibilità di interazione tra l'ambiente esterno e quello interno [Candia, et al., 2018].
Le facciate adattive sono involucri multi-parametrici ad alte prestazioni che, a differenza delle facciate fisse, reagiscono meccanicamente o chimicamente al clima esterno in modo dinamico per soddisfare i carichi interni e le esigenze degli occupanti [Luible, 2014].
Risulta chiaro che gli involucri adattivi possono trasformare la loro configurazione rispetto alla necessità di gestire e regolare i flussi termici, luminosi, visivi e rappresentano così l'ultima frontiera della ricerca in ambito architettonico, tecnologico e ambientale [Sala, & Romano, 2011].

Il paragrafo che segue mira a sostanziare l'apporto tecnologico e funzionale degli involucri edilizi di tipo adattivo connesse allo studio della relazione edificio-contesto, mettendo in evidenza le loro potenzialità, le loro caratteristiche prestazionali e i limiti di applicazione.

4.2 Discussione sull'adattività dell'involucro edilizio

> "New generation of high-performance envelopes have contributed to the emergence of sophisticated assemblies combining real-time environmental response, advanced materials, dynamic automation with embedded microprocessors, wireless sensors and actuators, and design-for-manufacture techniques."[28]
> [Velikov, & Thün, 2013, p. 75]

L'involucro edilizio, o meglio dire la facciata dell'edificio, diventa driver di innovazione per lo sviluppo di tecnologie e materiali che possano contribuire ad un efficace controllo prestazionale rispetto a condizioni al contorno transitorie e dinamiche [Loonen, et al., 2011]. Queste ultime si possono suddividere in due gruppi: il primo gruppo fa riferimento a condizioni esterne come il clima, la cui variabilità è dovuta, oggi, ai fenomeni di cambiamento climatico mentre, il secondo gruppo si attribuisce alle condizioni interne che, come esplicitato nel precedente paragrafo, dipendono sia da requisiti interni da asseverare, sia dalle esigenze di comfort degli occupanti e sia dall'interazione di flussi di materia ed energia tra ambiente esterno ed interno. L'involucro è la componente più importante da considerare quando si tenta di valutare le prestazioni in relazione al suo contesto climatico di riferimento, poiché l'involucro stesso diventa lo strumento di controllo della radiazione solare, della ventilazione naturale, del guadagno e delle perdite di calore, delle infiltrazioni d'aria e d'acqua e nella gestione dell'umidità [Modin, 2014].
La questione è complessa, visto che risulta difficile progettare edifici efficaci senza comprendere il loro rapporto con il sistema ambientale locale, così come è impossibile proteggere l'ambiente esterno senza tenere conto di quanto le superfici esterne incidano e influenzano il comfort a livello microclimatico.Per queste ragioni, le attuali tendenze nella progettazione architettonica si spingono nella direzione di involucri edilizi adattivi, la cui caratteristica principale di questo concetto è di dotare gli edifici con sistemi di elementi che si riconfigurano per rispondere ai cambiamenti esterni e interni e al comportamento degli utenti [Barozzi, et al., 2016; Hraska, 2018], con l'obiettivo di migliorare le prestazioni complessive dell'edificio [Loonen, et al., 2011].
Un forte contributo alla ricerca e alla sperimentazione è dato dall'azione del Programma di *Ricerca Cost Action Tu1403 – Adaptive Facades Network*[29], il cui obiettivo è quello di armonizzare, condividere e diffondere le conoscenze tecnologiche sulle facciate adattive a livello Europeo. L'azione viene intesa come un incubatore e una piattaforma ideale per facilitare l'applicazione di sistemi adattivi e per la creazione di metodi di progettazione e standard normativi uniformi, costruendo una connessione tra il mondo accademico con il mondo della produzione.
Per gli obiettivi della ricerca, le attività di analisi si concentrano sull'aspetto adattivo che le facciate possono ottenere attraverso l'incorporazione di tecnologie avanzate al fine di comprendere in che modo possano rispondere agli effetti del cambiamento climatico messi in evidenza come l'innalzamento delle temperature, le precipitazioni intense e la variazione dell'intensità e della frequenza del vento.
L'identificazione di tecnologie utili alla gestione della risposta agli impatti del cambiamento climatico potrebbe fungere da base per proporre e perseguire nuove metodologie di valutazione prestazionale adattiva nell'ambito dei sistemi di facciata continua.

I termini della discussione
Prima di approfondire le caratteristiche tecnico-prestazionali che connotano gli involucri edilizi adattivi, appare utile definire il termine *adattivo.*
Questa esigenza deriva dal fatto che si trova sempre più spesso nelle varie pubblicazioni scientifiche rispetto la tematica dell'adattività delle facciate un uso improprio del termine adattivo, spesso poco chiaro e usato come sinonimo di altri vocaboli quali *smart*, *intelligente*, *interattivo*, *responsivo*, *dinamico* [Allegato 2], creando confusione sul loro significato

specifico e sulla loro relazione concettuale con le prestazioni e la progettazione degli edifici [Romano, et al., 2018].
Tuttavia, l'interscambiabilità di questi termini può essere dovuta al fatto che le facciate adattive, essendo caratterizzate da una molteplicità di sistemi tecnologici ed impiantistici e dalla presenza di sistemi di regolazione e controllo, rendono difficile la scomposizione dei sistemi; la conseguenza è una lettura poco chiara delle singole funzioni che caratterizzano i sistemi tecnologici che non consente di attribuire uno specifico significato tra smart, intelligente, interattivo, responsivo, dinamico. Ad esempio una facciata può assumere funzioni interattive e dinamiche allo stesso tempo come la facciata del Hanwha HQ a Seoul [Fig. 4.1]: è interattiva in quanto la facciata è animata da effetti d'illuminazione, tramite illuminazione LED, che corrispondono alle immagini mediatiche degli altri edifici mentre risulta dinamica la geometria della facciata trasparente definita dai fattori solari e di orientamento, con il fine di garantire il ridotto consumo energetico e partecipare al mantenimento del comfort ambientale interno.

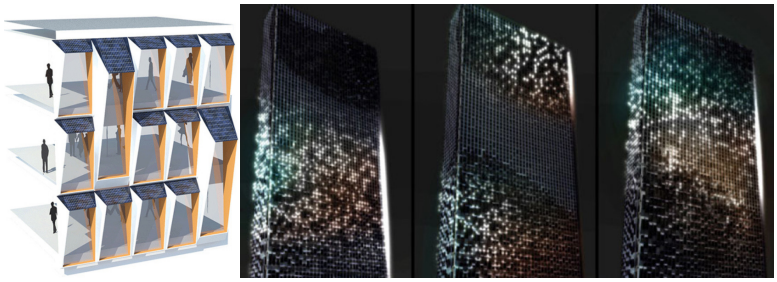


Fig. 4.1. Facciata del Hanwha HQ a Seul

Pertanto, si propone un quadro terminologico, con un focus più ampio per il termine adattivo.

Smart
Secondo Addington e Schodek [2012], il termine smart si riferisce ad un insieme di molecole, un materiale, un composito, un assemblaggio o un sistema che possiede funzioni tecnologiche incorporate alle quali corrispondono specifiche risposte ambientali, operando sia attraverso cambiamenti fisici interni o attraverso scambi di energia con l'esterno.
Questa risposta dovrebbe essere immediata (rispondono in tempo reale), transitoria (rispondono a più di uno stato ambientale), auto-attuata (l'intelligenza è interna piuttosto che esterna al materiale), selettiva (la risposta è discreta e prevedibile) e diretta (la risposta è locale all'evento attivante). Una delle caratteristiche più significative dei materiali smart è che hanno la capacità di trasformare le loro proprietà fisiche e/o la loro forma, oppure di scambiare energia senza richiedere una fonte di alimentazione esterna [Velikov, & Thün, 2013]. Esempi di sistemi smart possono essere considerati le schermature solari che vengono posizionate come una seconda pelle delle facciate, intercettando il flusso luminoso e radiativo con la possibilità di interagire con l'ambiente esterno e immagazzinare l'energia.

Intelligente
In letteratura, il termine intelligente viene spesso utilizzato come sinonimo di smart.
Secondo la ricerca condotta da Wigginton e Harris [2013], esistono oltre 30 definizioni separate di intelligenza in relazione alla costruzione. Una facciata viene detta intelligente, quando ottimizza i sistemi dell'edificio in relazione al clima, al bilancio energetico e al comfort umano, mediante un controllo autonomo e istintivo. Accanto all'obiettivo primario

di ridurre i costi energetici e fornire comfort all'utente, sicurezza e automazione della manutenzione sono gli obiettivi dell'edificio intelligente [Anshuman, 2005]. Compagno [1999] misura l'intelligenza di una facciata in base all'utilizzo di energie naturali e rinnovabili.
I sistemi intelligenti sono generalmente considerati sistemi organizzati in componenti per la percezione, la cognizione e l'azione a cui corrispondono sensori, controllori e attuatori [Hayes-Roth, 1995]. L'integrazione di tecnologie digitali o elettroniche a livello di materiale intelligente è un campo innovativo per i sistemi di facciata, che intendono fornire funzionalità avanzate rispetto anche alle prestazioni a livello energetico, adattandosi ai bisogni umani a breve e lungo termine [Clements-Croome, 1997].
Attualmente le facciate intelligenti possono essere controllate centralmente, pur offrendo agli occupanti la possibilità di interagire con il sistema e modificare le loro proprietà termofisiche e le proprietà ottiche [Kroner, 1997].

Interattivo
Il termine interattivo è utilizzato per identificare quei sistemi di facciata che richiedono l'input umano per avviare una risposta e possono essere anche dotati di sensori e un sistema di gestione degli edifici automatizzato e programmato, al fine di garantire comfort degli occupanti e ottimizzare le prestazioni a livello energetico [Velikov, & Thün, 2013].
I sistemi di facciata interattivi hanno la capacità di interagire con le variazioni delle condizioni climatiche esterne mediante dispositivi di controllo automatici o mediante l'intervento diretto dell'utenza; tale involucro consente il controllo dei livelli prestazionali offerti dalla chiusura modificando i valori dei parametri termo-igrometrici ed ambientali relativi al microclima interno. Le facciate interattive possono essere di tipo multimediali, conosciuta anche come facciata mediatica, quando sono dotati di sistemi finalizzati alla retroproiezione di immagini fisse o in movimento sulla superficie interna dei pannelli trasparenti.
In questo caso, la pelle dell'edificio è di solito costituita da pannellature verticali, montate su telai metallici di supporto, costituite con materiali traslucidi, accoppiati tra loro, le cui proprietà consentono alle proiezioni di apparire all'esterno con effetti decorativi anche molto spettacolari.

Responsivo
Un involucro responsivo include funzionalità e caratteristiche prestazionali simili a quelle di un involucro edilizio intelligente, tra cui il rilevamento di dati dall'ambiente esterno in tempo reale, i materiali intelligenti, l'automazione e la capacità di controllo da parte dell'utente [Velikov, & Thün, 2013]. Questo tipo di involucro ha anche la caratteristica di interattività poiché è in grado di conformare la sua geometria, quindi autoregolarsi al fine di controllare condizioni climatiche esterne.
Gli involucri responsivi sono dotati di sistemi tecnologici che intercettano i parametri esterni quali ventilazione, umidità, temperatura, radiazione influenzando i parametri interni dell'edificio, massimizzando il comfort degli utenti. Le soluzioni più comuni si basano su diversi sottosistemi specializzati come sensori, attuatori meccanici, membrane, dispositivi di controllo che rappresentano i responsabili del cambiamento della configurazione geometrica dell'involucro in base allo stimolo, alla sollecitazione o allo stress intercettato e alla tipologia di prestazioni programmate [Kolodziej, & Rak, 2013]. All'interno del progetto di ricerca ECBCS[30] dell'Agenzia internazionale dell'energia (IEA-ECBCS) '*Annex 44: Integrating Envionmentally Responsive Elements in Buildings*', (Programma per la conservazione dell'energia negli edifici e nei sistemi comunitari) [Heiselberg, et al., 2006; Heiselberg, 2012], l'attenzione posta agli involucri responsivi porta alle seguenti definizioni:

- *Responsive building concepts* RBCs: si identificano le soluzioni progettuali che mantengono un adeguato equilibrio tra condizioni interne ottimali e prestazioni ambientali, reagen-

do in modo controllato e olistico ai cambiamenti delle condizioni esterne o interne e agli interventi degli occupanti;

- *Responsive building elements* RBE: si identifica un componente edilizio che aiuta a mantenere un equilibrio appropriato reagendo in modo controllato e olistico ai cambiamenti delle condizioni esterne o interne e all'intervento degli occupanti, In questo senso, gli elementi edilizi reattivi sono tecnologie essenziali per lo sfruttamento delle risorse ambientali e di energia rinnovabile.

Dalle definizioni riportate si può quindi chiarire che un involucro responsivo è capace di reagire in modo controllato alle sollecitazioni esterne e interne e all'interazione con l'utente, attivando un processo di gestione del controllo su accumulo di calore, luce, acqua, aria.

Dinamico
Le facciate dinamiche sono caratterizzate da un controllo basato sulla relazione ambiente esterno-edificio con la possibilità di gestire i complessi flussi di energia (calore, luce, suono) attraverso una modifica del sistema che risponde ai diversi fenomeni esterni [Konstantoglou, & Tsangrassoulis, 2016]. La caratteristica principale è la possibilità di modificare continuamente l'interazione tra gli elementi costruttivi e l'ambiente esterno/interno al fine di ridurre i fabbisogni energetici e favorire lo sfruttamento delle energie ambientali e a basso consumo energetico [Goia, 2013]. L'involucro gestisce i flussi attraverso la regolazione di dispositivi fissi o ad assetto variabile (frangisole, apertura/chiusura di finestre, bocchette di ventilazione) o con controllo e regolazione manuale o automatica in relazione al tipo di utenza e alla complessità dell'edificio.
In questo contesto, un'adeguata progettazione degli involucri dell'edificio ha un impatto cruciale per ridurre il consumo energetico dell'edificio mantenendo il comfort termico degli occupanti. La caratteristica di *anisotropia* di tipo dinamico offre soluzioni differenziate per le diverse esposizioni dell'edificio, dove il cambiamento dell'assetto modulano i vari flussi ambientali a seconda delle condizioni climatiche del luogo. Il termine dinamico viene affiancato in letteratura al termine adattivo, che rappresentano involucri che incorporano i concetti tecnologici di dinamicità ed adattività al fine di migliorare le prestazioni energetiche di un edificio. In particolare, si possono distinguere in:

- *Dynamic Adaptive Building Envelope* DABE è una nomenclatura utilizzata nella scienza e nell'ingegneria degli edifici per includere le coperture e le facciate che si relazionano con il loro ambiente variabile in modo dinamico, attraverso l'utilizzo di sistemi di sensori e attuatori [Harry, 2016];

- *Adaptive Dynamic Building Envelopes* ADBE sfruttano i vantaggi delle tecnologie che gestiscono l'energia e il trasferimento di massa tra l'edificio e gli ambienti esterni in modo attivo e selettivo [Mohtashami, et al., 2022]. Secondo un recente studio sulla gestione sicura e intelligente di edifici a energia quasi zero, gli edifici ADBE integrano fonti energetiche rinnovabili (RES) che devono essere gestiti da nuovi sistemi basati su Intelligenza Artificiale (AI) e sull'Internet of Things (IoT) [Marin-Perez, et al., 2019].

Adattivo
Dall'analisi etimologica della parola, l'aggettivo adattivo[31] deriva dal latino adaptare sul modello dell'inglese adaptive, il cui significato è '*capace di adattamento*'. L'Enciclopedia digitale Treccani, riporta sotto la definizione di adattivo delle specifiche riferite a:

- *Controllo adattivo*: quello fatto su un sistema di elaborazione elettronico tenendo conto

non solo dello stato del sistema, ma anche di tutti i parametri che caratterizzano l'efficacia del controllo medesimo;

- *Sistema adattivo*: sistema capace di adattarsi, cioè capace di adeguare la sua struttura e il suo comportamento a certe condizioni, ad esempio alle condizioni ambientali o a quelle imposte mediante appositi organi di comando;

- *Valore adattivo di un carattere*: la misura in cui quel carattere rende idoneo un organismo all'ambiente in cui esso vive.

Pertanto, con il termine adattivo si intendono quei sistemi in grado di rispondere ripetutamente e in modo reversibile nel tempo ai cambiamenti dei requisiti prestazionali e alle mutate condizioni al contorno [Romano, et al., 2018].
Come analizzato precedentemente, l'innovazione delle tecnologie di involucro comporta il passaggio da funzione singola di isolamento-protezione [Mazzucchelli, 2013] al concetto di multifunzionalità, in cui l'adattività rappresenta un approccio attraverso il quale si definisce la capacità di adattamento di un sistema, che consente quindi la possibilità di valutarne in modo affidabile nuovi e richiesti livelli qualitativi.
Dunque, secondo questo cambiamento di paradigma, gli involucri edilizi adattivi sono in grado di interagire con l'ambiente e l'utente reagendo all'output esterno e adattando il loro comportamento e la loro funzionalità [Grillo, & Sansotta, 2021].
Tuttavia, Loonen et alii [2013] dichiarano che una sfida legata ai progressi tecnologici-prestazionali dei sistemi di tipo adattivo in facciata è l'ottenimento della loro multifunzionalità, in quanto le caratteristiche sono interdipendenti e in parte si escludono a vicenda.
Questo significa che l'applicazione in aggiunta di caratteristiche adattive individuali non porta automaticamente a un aumento della sua operabilità e di conseguenza un innalzamento delle prestazioni complessive ma necessita la presenza di sistemi che impongono adattamenti inter-coordinati che coinvolgano anche sottosistemi e servizi edilizi.
Nello specifico, le facciate adattive (Adaptive Façade AF) sono involucri edilizi capaci di adattarsi alle variabili condizioni contestuali sotto forma di fluttuazioni meteorologiche a breve termine, cicli diurni o modelli stagionali [Knaack, et al., 2015; Attia, et al., 2018; Mazzucchelli, 2018], con l'obiettivo di migliorare le prestazioni complessive dell'edificio.
Secondo Bui et al. [2020], il funzionamento delle facciate adattive deve rappresentare correttamente una sequenza di fasi variabili nel tempo corrispondenti alle condizioni climatiche; questo implica che lo stato della configurazione geometrica delle facciate adattive, che può comprendere la posizione dei componenti di controllo o le proprietà dei materiali, deve cambiare dinamicamente per adattarsi correttamente ai vari scenari [Loonen, 2014].
Difatti, prima di applicare una strategia adattiva, è necessario tenere in considerazione le condizioni della zona climatica per minimizzarne l'impatto e ridurre il consumo di energia.
In alcuni casi, le condizioni climatiche o il microclima locali possono differire dalle condizioni prevalenti della zona climatica. A seconda della tecnologia utilizzata, le facciate adattive offrono un elevato potenziale per ridurre la domanda di energia utilizzata per l'illuminazione (di tipo artificiale) e il condizionamento (riscaldamento e raffreddamento) degli spazi.
Allo stesso tempo, il concetto di comfort si è evoluto nel corso del tempo, la nozione di cambiare la configurazione della facciata nel tempo è un approccio prevedere anche contributi positivi alla qualità dell'aria interna e ai livelli di comfort termico e visivo [Attia, et al., 2018; Hoseini, et al., 2019] e si prevede un aumento delle soluzioni innovative emergenti nel prossimo futuro [Loonen, et al., 2015].

In accordo al quadro terminologico costruito sulla base della letteratura di settore, si vuole mettere in evidenza come le caratteristiche che contraddistinguono le facciate di tipo

smart, intelligente, interattivo, responsivo, dinamico, rientrano nel concetto di capacità di adattamento tipico delle facciate adattive. Questo significa che l'adattività può comprendere e abbracciare le diverse strategie tecnologiche (suddivise in sistemi, componenti, elementi) attraverso un controllo di tipo intelligente e reattivo, che sia in grado di rispondere a cambiamenti derivanti da fattori sia interni che esterni e un sistema smart capace di intercettare flussi di materia ed energia al fine di implementare il livello prestazionale complessivo dell'edificio [Mazzucchelli, et al., 2018].
In altre parole, i concetti smart, intelligente, interattivo, responsivo, dinamico, si possono intendere come caratteristiche tecnologiche secondarie delle facciate adattive, poiché fanno riferimento al sistema tecnologico utilizzato per favorire l'adattamento a specifiche condizioni climatiche esterne o rispetto alle esigenze dei fruitori che abitano lo spazio interno, contribuendo a ridurre il fabbisogno energetico dell'edificio. Tuttavia, la sistematizzazione delle soluzioni tecnologiche di tipo adattivo risulta alquanto complessa visto che le strategie si riferiscono alla possibilità di un controllo di tipo luminoso, visivo, di un controllo della temperatura, dell'aria, dell'acqua, tenendo in considerazione l'integrazione intelligente e smart della componentistica che determina la tipologia di adattamento rispetto alle sollecitazioni a cui viene sottoposta la facciata.

In questo contesto, la problematica che viene messa in risalto si delinea nella difficoltà di comprendere l'adattabilità delle facciate associate ai fattori, alle sollecitazioni esterne che derivano dai fenomeni di cambiamento climatico che sono stati analizzati per la Regione del Mediterraneo che influenzano le condizioni di comfort interno e a livello microclimatico dell'ambiente esterno, quali:
- *temperature estreme* legate alla variazione di umidità: con le conseguenti ondate e isole di calore, evidenziando l'esigenza di un controllo del flusso termico;
- *precipitazioni intense*: che possono provocare fenomeni di pluvial flooding, di bombe d'acqua con la necessità di un controllo del flusso d'acqua;
- *aumento della frequenza e dell'intensità del vento*: che incidono sulla possibilità che si possano verificare condizioni estreme quali le trombe d'aria, con la richiesta di un controllo del flusso d'aria.

Nell'ambito di questo capitolo, il termine adattivo, oltre a comprendere strategie di tipo smart, intelligente e reattivo, intende includere una visione più ampia nella valutazione di tutte quelle componenti che possono definire l'adattabilità di un edificio, in particolare delle facciate, in relazione alla necessità di regolare i flussi che derivano da sollecitazioni esterne indotte dal cambiamento climatico.
Gli sforzi della ricerca si spingono sulla definizione di indicatori prestazionali delle facciate che possano rispondere alle classi di impatto definite dagli eventi estremo del cambiamento climatico per la Regione del Mediterraneo. La base di partenza per questa indagine si identifica nella lettura dinamica costruita per mettere a sistema le interazioni tra edificio e contesto, 'Building envelope *versus* Climate change' [Cfr. Cap. 3] al fine di individuare il funzionamento adattivo delle possibili strategie adattive riferito al controllo termico, visivo, al controllo del flusso d'aria e al controllo del flusso d'acqua.
Per esplicitare questi concetti che intendono legare, in modo innovativo, i fenomeni del cambiamento climatico della Regione Mediterranea con il funzionamento prestazionale che contraddistingue le facciate, appare utile specificare in che modo si ottiene l'adattività, ovvero la modalità tecnologica-materica attraverso la quale, le facciate sono capaci di adattarsi a specifiche sollecitazioni.

Il paragrafo che segue riporta i diversi meccanismi da cui dipendono le strategie di adattamento, con un focus sui materiali attivi per il comportamento adattivo delle facciate.

4.3 I materiali per l'adattività: analisi sui casi studio

"The envelope is nothing without the materials that it is made up by,
they are the boundaries and their properties open
up for adaptive solutions as all materials adapt to be in balance with the environment,
whether it is on a molecule level or through a change in shape."[32]
[Modin, 2014, p. 21]

Premessa

Wigginton e Harris [2013], definiscono la funzionalità dell'involucro mettendolo a sistema con i componenti, materiali ed elementi tecnologici che comportano una variazione, (in termini di risposta positiva ad una sollecitazione) della loro configurazione geometrica e affermano infatti che:

"*l'involucro opera come parte di un edificio olistico, con il suo metabolismo e la sua morfologia, e sarà spesso collegata ad altre parti dell'edificio, compresi sensori, attuatori e cavi di comando dal sistema di gestione dell'edificio*".

I progressi negli sviluppi architettonici adattivi potrebbero rappresentare l'alternativa futura agli sviluppi edilizi convenzionali, le cui proprietà statiche non rappresentano la soluzione di massima efficienza. Gli approcci di progettazione adattiva potrebbero ridurre la complessità e i costi sprecare in riscaldamento, raffreddamento, ventilazione o illuminazione e quindi gestire significativi miglioramenti nell'efficienza energetica degli edifici.

Recentemente, le tendenze nella progettazione dei sistemi di involucro, in particolare la facciata, sono state evolute utilizzando sistemi dinamici con l'adozione di facciate stratificate; ogni strato funziona in base a un compito specifico e la loro combinazione rappresenta un sistema complesso [Fiorito, et al., 2016].

Diversi studi [Hosseini, et al., 2019; Le-Than, et al., 2021; Zeng, et al., 2021] si sono concentrati sulla categorizzazione di questi sistemi di movimentazione che rendono le pelli delle facciate adattive alle sollecitazioni climatiche esterne o rispetto alle esigenze. Questi sistemi che possono essere adattati come parti mobili di una facciata adattiva, possono includere forme non standardizzate e movimenti irregolari e possono variare a seconda del design, dei materiali e delle strutture [Lee, et al., 2021].

In generale, la maggior parte degli involucri degli edifici si riferisce a un sistema che reagisce alle esigenze degli utenti e alle condizioni meteorologiche utilizzando concetti di controllo automatico che possono essere anche regolati dagli utenti. In particolare, gli orientamenti dello sviluppo tecnologico pongono l'attenzione sui dispositivi di ombreggiamento poiché la temperatura, la radiazione solare, l'illuminazione rappresentano i principali fattori da controllare al fine del comfort termico di un edificio. Tuttavia, questi sistemi possono avere diversi scenari operativi che rispondono ad altri fattori ambientali come ventilazione [Passe, & Battaglia, 2015] e umidità [Menges, & Reichert, 2012], influenzando i livelli prestazionali e la qualità ambientale complessiva. L'alterazione potrebbe essere ottenuta in vari modi, spostando componenti, introducendo di flussi d'aria o da un cambiamento chimico in un materiale. Gli elementi della facciata che possono conferire queste caratteristiche all'edificio vengono qui definiti come elementi adattivi d'involucro.

Si tratta dell'applicazione di diverse tecnologie più o meno recenti applicate ai componenti edilizi in modo da conferire all'intero sistema edificio delle caratteristiche adattive e dinamiche. Tale dinamicità permette all'edificio di adattarsi a ciò che succede al suo esterno con una relazione di causa – effetto.

Gli elementi adattivi infatti, sollecitati dalle condizioni esterne (causa) innescano i meccanismi di risposta unici per ognuno di essi e quindi cambiano le loro proprietà con delle conseguenze sulle prestazioni dell'intero sistema edificio (effetto). Tale meccanismo può essere inteso riprendendo il concetto di feedback o (a cui si è fatto riferimento nel I capitolo) in quanto il meccanismo di risposta ha la capacità di accrescere e implementare le caratteristiche di funzionamento dell'involucro e quindi si può definire come feedback positivo.

Per questa ragione, si vogliono evidenziare, gli approcci secondo i quali la progettazione degli involucri adattivi può essere sviluppata per soddisfare i principi di adattabilità alle sollecitazioni esterne ed interne:

- *Facciate adattive basate su un controllo estrinseco*: il comportamento adattivo è il risultato dell'utilizzo di sistemi meccanizzati che si traducono nella trasformazione della forma e configurazione dell'involucro. Questo meccanismo adattivo definito di *macro-livello*, è solitamente un elettromotore, che viene innescato da un input proveniente da un sensore e azionato con un apporto di energia esterna, definendo i conosciuti movimenti di piegatura, scorrimento, rotolamento, incernieramento;

- *Facciate adattive basate su un controllo intrinseco*: la cui variabilità è legata alle proprietà intrinseche del materiale di cui sono costituiti. Questo meccanismo viene invece definito di *micro-livello*, in quanto, come dice la parola stessa, il cambiamento avviene in scala ridotta, ovvero all'interno del materiale stesso. Le proprietà di un materiale che lo fanno passare da uno stato solido ad uno liquido, generano cambiamenti di ridotta dimensione che, utilizzati in un sistema più grande come un motore, possono comportare una modifica delle caratteristiche termiche, fisiche di una facciata. Ad esempio, un motore a cera è un tipo economico di dispositivo di attuatore lineare dove la cera si espande quando la temperatura aumenta, inducendo a sua volta una pressione nel pistone, che può essere utilizzato per creare il movimento.

Alla prima categoria appartengono i sistemi tecnologici che basano la propria adattività attraverso una componentistica caratterizzata da sensori che leggono le informazioni/sollecitazioni esterne o interne e da attuatori che eseguono il movimento, rispondendo in modo attivo alla sollecitazione imposta.
La tecnologia che dà avvio al movimento, distingue le diverse tipologie di attuatori:

1) *elettrico*: è un dispositivo capace di permettere il movimento di un carico o di generare una forza, come ad esempio il bloccaggio, utilizzando un motore elettrico che sia in grado di generare la forza necessaria. Per permettere il funzionamento degli attuatori elettrici sono necessari un'adeguata alimentazione elettrica e un corretto cablaggio per i segnali di alimentazione ed il controllo tra il motore e l'azionamento. In taluni casi l'installazione degli attuatori potrebbe richiedere l'utilizzo di fine corsa magnetici per l'identificazione della posizione. Gli attuatori elettrici si distinguono anche per una capacità di carico che, pur essendo inferiore a quella dei modelli idraulici, è superiore alla capacità di carico degli attuatori pneumatici, nonché per la loro velocità elevata e per la precisione della velocità stessa. L'attuazione basata sul motore elettrico è il tipo più comune di attuazione utilizzato nelle facciate dinamiche. Il sistema più comunemente usato include l'uso di tende veneziane motorizzate installate in facciate a doppia pelle;

2) *idraulico*: gli attuatori idraulici funzionano per compressione di un fluido (generalmente olio) iniettato da una pompa all'interno del cilindro; la pressione esercitata dal fluido azionerà i movimenti lineari del tubo lungo l'asse del pistone, inserito in un cilindro cavo. Si produce una forza che può spostare un oggetto esterno quando una spinta disuguale viene applicata al pistone. Il movimento meccanico, così prodotto, fornisce un'uscita in termini di movimento lineare, rotatorio o oscillatorio. Gli attuatori idraulici possono sostenere carichi molto pesanti e offrono corse elevate, ma non sono programmabili;

3) *pneumatico*: è un dispositivo che trasforma l'energia pneumatica (aria compressa) in energia meccanica (movimento). gli attuatori pneumatici sono analoghi agli attuatori

idraulici, tranne per il fatto che gas compresso (aria), invece di un liquido, viene utilizzato per generare forza. Questi funzionano allo stesso modo degli attuatori idraulici dove il pistone viene spinto fuori da un lato di una camera dall'aria (invece che dal liquido) che viene pompata all'interno della camera attraverso l'altro lato.

Alla seconda categoria appartengono quei materiali che, attraverso delle modifiche chimico-fisiche ed elettriche, acquisiscono caratteristiche adattive, con la possibilità di offrire prestazioni più avanzate e anche utilizzi molto diversi dalla cosiddetta "base di partenza" [Buanne, 2015]. Nello specifico, l'indagine si concentra sugli *smart materials* che rappresentano la frontiera più avanzata dell'innovazione e hanno guadagnato attenzione nella ricerca scientifica, soprattutto nelle applicazioni industriali e ingegneristiche e, ultimamente, nel campo dell'architettura [Saidam, et al., 2017].
Secondo le prospettive di crescita nell'ambito dell'innovazione tecnologica e materica nel contesto Europeo, il Manifesto Europeo "*Materials 2030 Roadmap*"[33] si pone come obiettivo strategico quello di favorire "*un approccio sistemico per sviluppare la prossima generazione di materiali avanzati orientati alle soluzioni che offriranno risposte più rapide, scalabili ed efficienti alle sfide, trasformandole così in opportunità per la società, l'economia e l'ambiente dell'Europa oggi e in futuro*" [AAVV, 2022, p. 8].
Ad avvalorare tale scenario, il modello di sviluppo dell'Industria 5.0[34] basato su tre pilastri essenziali che guidano questa transizione: *approccio human-centric*, *sostenibilità* e *resilienza*, sostiene che un processo di adattamento è reso possibile mediante tecnologie flessibili e adattabili [European Commission, et al., 2021; Xu, et al., 2021]. L'Industria 5.0 intende completare e avanzare il paradigma esistente dell'Industria 4.0 e per raggiungere questi obiettivi ha individuato sei categorie tecnologiche che fanno riferimento a: 1) Interazione uomo-macchina individualizzata, 2) Tecnologie ispirate alla natura e materiali intelligenti, 3) Tecnologie per la trasmissione, stoccaggio e analisi dati, 4) Simulazione e digital twins, 5) Artificial Intelligence, 6) Tecnologie per l'efficienza energetica.
Il riferimento all'Industria 5.0 si configura come un indirizzo di trasformazione e con una valenza altamente significativa che basa le proprie operazioni sull'utilizzo di materiali intelligenti per l'ottimizzazione delle risorse viste le sfide ambientali ed energetiche in atto.
Lo scopo dello studio è individuare esempi di progettazione di involucri adattivi attraverso l'utilizzo di materiali intelligenti e se questi possono essere trasformati in principi o criteri finalizzati all'innovazione.

I casi studio
È ormai noto quanto gli involucri edilizi e l'ambiente costruito siano esposti a gravi rischi dovuti principalmente agli effetti del cambiamento climatico, come l'innalzamento delle temperature, isole e ondate di calore, bombe d'acqua e trombe d'aria, con importanti ricadute sulla sicurezza e sulla salute degli abitanti. Per ripristinare le condizioni di equilibrio, emerge la necessità di individuare strategie di adattamento alla scala 'micro' di cui sono costituiti gli involucri edilizi contemporanei [Lucarelli, 2018].
Di conseguenza, la progettazione di facciate adattive per aree ambientali critiche deve essere affiancata da una valutazione attenta e accurata delle dinamiche che influenzano la vulnerabilità degli edifici al fine di verificare la congruenza delle soluzioni applicate a specifici contesti ambientali, attraverso azioni di simulazione e testing. L'opportunità offerta dai nano-materiali e dai materiali intelligenti nelle applicazioni dei sistemi di involucro fornisce una strategia ideale per innalzare le prestazioni tecnologiche e ambientali, in risposta a sollecitazioni sempre più estreme [Lucarelli, 2020].
La portata innovativa dei più recenti strumenti scientifici di analisi e di trasformazione della materia alla scala nanometrica permette di amplificare enormemente la capacità di osservare e replicare le dinamiche naturali [Pietroni et al., 2006]. Per evitare equivoci, risulta

necessario fare una distinzione tra gli smart materials e i nano-materiali.
In letteratura, sono presenti molte definizioni di smart materials che stabiliscono che gli smart materials hanno proprietà mutevoli e che sono in grado di adattare la loro forma o il loro colore in risposta a influenze fisiche e/o chimiche, ad esempio la luce, temperatura o all'applicazione di un campo elettrico [Konarzewska, 2017].
Come espresso da Di Salvo, "*They interact and respond to external stimulation by modifying their properties; to detect and communicate the environmental parameters and the human body; to meet and interact on a predetermined basis with human beings and the environment, developing the real physical behavior. For various aspects present similarities with biological organisms and natural systems*" [Di Salvo, 2016, p. 72].
Il termine smart materials si riferisce sia a un insieme di molecole, sia a un materiale o a un sistema, con capacità di risposta rapida intrinseca e incorporata. Questa risposta dovrebbe essere immediata (rispondono in tempo reale), transitoria (rispondono a più di uno stato ambientale), auto-attuata (l'intelligenza è interna piuttosto che esterna al "materiale"), selettiva (la risposta è discreta e prevedibile) e diretta (la risposta è locale all'evento che la attiva) [Addington et al., 2012]. Inoltre, le composizioni molecolari dei materiali intelligenti controllano e producono prestazioni a livello di forma del materiale, per interagire con le influenze ambientali come l'umidità, la temperatura, la luce e l'anidride carbonica [Lopez, et al., 2017].
Invece, con nano-materiale s'intende un materiale naturale, derivato o fabbricato contenente particelle allo stato libero, aggregato o agglomerato, e in cui, per almeno il 50 % delle particelle nella distribuzione dimensionale numerica, una o più dimensioni esterne siano comprese fra 1 nm e 100 nm [UE Commission, 2011/696]. Quindi, l'obiettivo della nanotecnologia è quello di manipolare e controllare i materiali a livello atomico.

Per restringere il campo di indagine, l'attenzione si concentra sugli smart materials[35], che regolano il proprio comportamento adattivo attraverso strategie basate sulle proprietà intrinseche ed estrinseche dei materiali, compresi i cambiamenti che influenzano direttamente la struttura interna di un materiale, come una differenza di temperatura, riflessione della luce o le proprietà di assorbimento, o attraverso lo scambio di energia da una forma all'altra. Come specificato precedentemente, il carattere intelligente per l'adattività delle facciate è reso dall'utilizzo di materiali intelligenti che grazie alle loro proprietà intrinseche, che includono la capacità di cambiare proprietà fisiche o forma senza alcuna fonte di energia. La scelta ricade su questi tipi di materiali, in quanto hanno buone capacità di rispondere agli innalzamenti della temperatura e alle infiltrazioni d'aria e d'acqua per ventilazione e precipitazione, che rappresentano i più rilevanti eventi estremi di cambiamento climatico che causano ondate e isole di calore, bombe d'acqua e trombe d'aria, sempre più frequenti, soprattutto in aree critiche come quella analizzata della Regione del Mediterraneo [Lionello, & Scarascia, 2020]. Le facciate adattive attraverso l'incorporazione di materiali attivi e avanzati, non hanno bisogno di complessi sistemi elettromeccanici o fornitura di energia, per cambiare la loro configurazione, migliorando l'adattamento degli edifici rispetto al loro contesto ambientale e minimizzando il contributo energetico.
Molti tipi di materiali intelligenti possono funzionare in diverse forme e percepire gli stimoli ambientali, dove le risposte possono essere termiche, radianti, chimiche, elettriche, magnetiche [Al-Obaidi et al., 2017]. Difatti, questa tipologia di materiali definiti intelligenti e attivi, in base alla loro composizione chimica, possono piegarsi, restringersi o espandersi possono rispondere al cambiamento, ma devono essere abbastanza stabili in termini di configurazione per utilizzare la loro implementazione in modelli adattivi.

Al fine di individuare le tecnologie più promettenti dal punto di vista adattivo delle facciate, vengono analizzati dalla letteratura di settore dei casi studio riferiti agli smart mate-

rials, mettendoli a sistema con la loro capacità di un controllo del flusso termico, luminoso, del flusso d'aria e d'acqua. In questa transizione da un involucro statico ad uno adattivo, il quadro che viene costruito vuole intendere come base per possibili soluzioni tecnologiche adattive e come strumento di riferimento per l'acquisizione delle conoscenze in merito all'innovazione e alla sperimentazione degli smart materials applicati sui sistemi di facciata. L'applicazione dei materiali intelligenti nel campo dell'architettura dipende principalmente dalla capacità di questi materiali di modificare le proprie forme e caratteristiche in base alla forma passiva, sotto l'influenza di stimoli esterni quali umidità, temperatura, radiazione solare, luce, movimento dell'aria e inquinamento [Saidam, et al., 2017].

All'interno della categoria degli smart materials, appartengono gli *Shape memory Hybrid* (SMH), gli *Shape Memory Alloy* (SMA), gli *Shape memory Polymers* (SMPs) e gli *Electro-Active Polymers* (EAP). I primi tre materiali si conoscono anche con il nome di Shape Memory Materials (SMM), ovvero quei materiali che hanno la capacità di ritornare alla loro forma originale solo quando viene applicato uno stimolo specifico, come una *fonte di calore* (thermo-responsive), *stimolo chimico* (chemical-responsive), uno *stimolo luminoso* (photo-responsive) [Liu et al., 2007].

Per ogni materiale vengono descritte le sue caratteristiche generali e viene associato un caso studio di applicazione e la modalità di controllo dei flussi.

4.3.1 Shape Memory Hybrid

Materiale: Uno *Shape Memory Hybrid* (SMH) normalmente include almeno due componenti, uno è il componente elastico e l'altro è il componente di transizione.
Il primo immagazzina l'energia elastica dopo la programmazione, mentre il componente di transizione è in grado di ammorbidirsi riscaldandosi al di sopra della temperatura di transizione e quindi mantiene in gran parte la forma deformata dopo il raffreddamento per l'indurimento [Fig. 4.2].

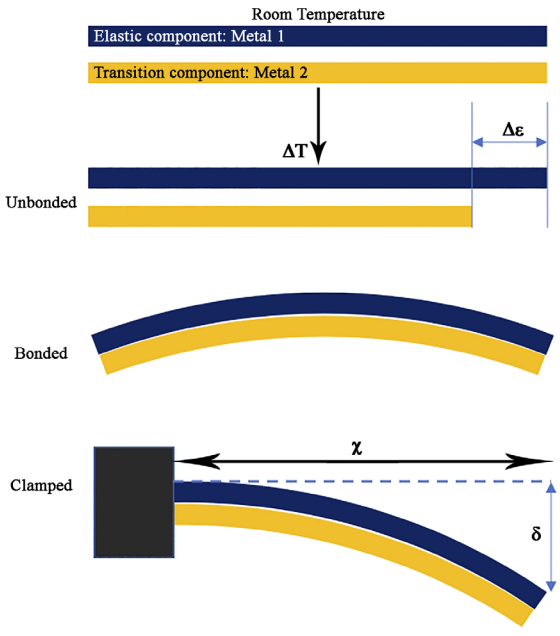


Fig. 4.2. Principio di deformazione delle piastre bimetalliche

Al riscaldamento per ammorbidire nuovamente il componente di transizione, l'energia elastica immagazzinata nel componente elastico viene rilasciata, che fornisce la forza motrice per il recupero della forma dell'ibrido [Wang et al., 2017; Huang et al., 2012].
Questo fenomeno che comporta una variazione di forma, come per esempio una piegatura per riscaldamento diretto e indiretto, può essere applicato per ottenere superfici di involucro con caratteristiche termiche attive innescate dai raggi solari e dalle variazioni termiche. Uno studio scientifico ha dimostrato che l'ibrido può essere reattivo all'acqua e suoi vantaggi vengono dimostrati mediante due approcci[36] di modalità di trasformazione del materiale, affermando che gli Shape Memory Hybrid siano materiali versatili.

Progetto sperimentale: Un esempio di applicazione architettonica si può riscontrare nel *Padiglione sperimentale Bloom* a Los Angeles, progettato dalla biologa diventata architetto Doris Kim Sung [Fig. 4.3]. La facciata è realizzata principalmente con un termo-bimetallo "intelligente", una lamiera che si incurva quando viene riscaldata (senza controlli, senza energia). Gli elementi modulari sono costituiti da due fogli di alluminio e hanno l'abilità di piegarsi in pochi secondi, in modo autonomo e senza la presenza di attuatori.
Questo comportamento è possibile perché i due strati metallici, pur essendo laminati insieme, se sottoposti a sollecitazione termica hanno la capacità di espandersi con velocità diverse, tornando nella loro posizione iniziale quando questa sollecitazione viene a mancare. La pelle dell'installazione risponde alla differenza di temperatura. Quando temperatura supera i 22°C, le lastre metalliche si arricciano e quando si raffredda, le lastre si appiattiscono [Orhon, 2016]. In questo modo, la superficie reattiva della forma ombreggia e ventila aree specifiche sotto il guscio quando la temperatura aumenta e ritarda l'effetto "isola di calore". Inoltre si avvale di complessi software digitali, in quanto la superficie è composta da circa 14.000 pezzi tagliati al laser. La facciata è composta da 414 pannelli impilati a forma di paraboloide iperbolico e sfrutta la capacità dei materiali di funzionare come un involucro [Kanaani et al., 2016]. I pannelli combinano una superficie a doppia rigatura di piastrelle bimetalliche con un sistema di telai in alluminio piegati a incastro. La struttura monoscocca finale, leggera e flessibile, dipende dalla geometria complessiva e dalla combinazione dei materiali per fornire una stabilità completa.

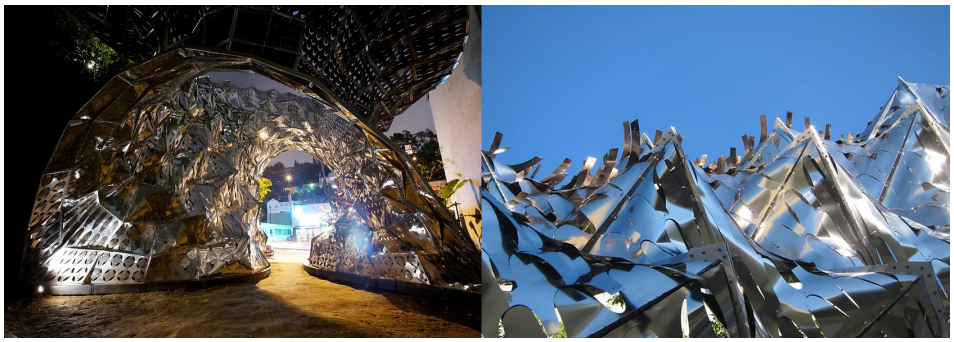


Fig. 4.3. Bloom Pavillion

Modalità di controllo dei flussi: In questo caso studio, la facciata adattiva gestisce il controllo del flusso termico attraverso la capacità delle piastre metalliche di espandersi e di conseguenza bilanciano il flusso luminoso all'interno dell'interno dell'involucro, garantendo un miglior comfort a livello termico e visivo. I termo-bimetalli intelligenti applicati sulla facciata adattiva possono limitare la quantità di acqua da infiltrazione dovuta a precipitazioni intense, consentendo un buon livello di controllo del flusso d'acqua.

Un aspetto critico riguarda la ventilazione, in quanto non hanno la capacità di deviare o respingere il flusso d'aria.

4.3.2 Shape Memory Alloy

Materiale: Gli *Shape Memory Alloy* (SMA) sono materiali che possono essere deformati a una certa temperatura ma che, una volta riscaldati o raffreddati, ritornano alla loro forma originale, cioè la lega sembra avere una memoria. Le deformazioni fino a circa il 10% possono essere completamente recuperate [Yamauchi et al., 2011]. Le leghe che mostrano questo effetto solo quando vengono riscaldate sono dette 'a memoria di forma unidirezionale'. Gli SMA mostrano anche la superelasticità che è un tipo meccanico di memoria di forma. Questo effetto si osserva quando le leghe vengono sollecitate appena al di sopra della loro temperatura di trasformazione. Le proprietà meccaniche degli SMA variano nell'intervallo di temperatura durante la loro trasformazione [Huang et al., 2010].
A basse temperature, il materiale esiste come martensite [Fig. 4.4] ed è deformato da una forza applicata relativamente piccola; mostra anche memoria di forma durante il riscaldamento. Ad alte temperature, il materiale esiste come austenite, che non si deforma facilmente e, per riscaldamento, non si verifica memoria di forma perché non c'è cambio di fase [Elahinia et al., 2014].
La *lega Nichel-Titanio* (NiTi) è l'SMA più segnalata nei sistemi di involucro reattivo che seguono il protocollo di transizione di fase non diffusiva come attuatore a causa delle sue prestazioni meccaniche affidabili. Diverse superfici dinamiche, focalizzate sul controllo del calore e della luce sugli edifici, hanno riportato l'uso della matrice NiTi come attuatore. Esistono molte tecniche per la progettazione di un attuatore a due vie: ad esempio un trattamento localizzato della lega può indurre l'effetto memoria di forma solo su una parte del materiale, in modo che la parte restante funzioni come contro-molla [Bellouard et al., 1999]. Questi sistemi basano il loro funzionamento su molle o fili precompressi che cercano di recuperare la loro forma originale a causa delle fluttuazioni termiche generando una forza meccanica nel processo. Le leghe NiTi sono i più comuni impiegati grazie anche alle loro caratteristiche di resistenza alla corrosione, duttilità, elevata deformazione recuperabile e biocompatibilità [Duerig et al., 1999].

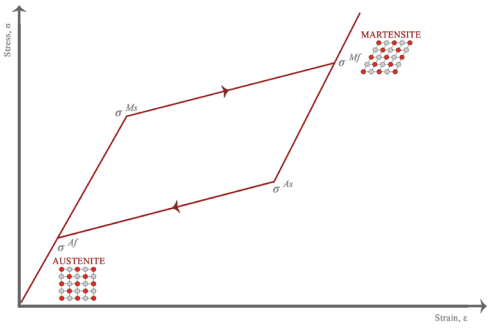


Fig. 4.4. Trasformazione dalla fase di austenite alla fase martensitica

Progetto sperimentale: Un prototipo con questa tipologia di materiale è stato costruito dall'Istituto di Architettura Avanzata della Catalogna. Lo studio prevede un'indagine scientifica sulla lega a memoria di forma – Nitinol per sviluppare un motore cinetico passivo in grado di dispiegare geometrie in risposta alla presenza della radiazione solare.
La combinazione Nitinol-Zinco, basata su questo principio, contrae ed espande il nitinol mediante la forza esterna della molla di zinco in presenza e in assenza di temperature

elevate. Questo crea un movimento di spostamento ad anello di un meccanismo mobile indipendente. Il prototipo sperimentale *Self-Adaptive Membrane* [Fig.4.5] è composto da due componenti vitali: giunti cinetici in nitinol e geometria di tassellazione pieghevole, che lavorano insieme come un unico sistema integrato.
La membrana autoadattiva ha 16 molle Nitinol posizionate per formare 4 giunti a grappolo che mobilizzano il modello. I giunti sono incorporati nella geometria di piegatura per consentirle uniformemente di aprirsi sia in volume che in superficie. Quando la temperatura interna è al di sopra della zona di comfort, i giunti di dilatazione rilascerebbero le forze di espansione ed espirano l'aria calda accumulata attraverso i pannelli laterali forati.



Fig. 4.5. Self-Adaptive membrane

Modalità di controllo dei flussi: Il caso studio analizzato mette in evidenza la capacità di controllo della radiazione solare incidente bilanciando la gestione del flusso termico e il rischio di surriscaldamento localizzato, tipica problematica delle superfici con un alto livello di assorbimento solare.
La conformazione geometrica del prototipo, se applicato in facciata, rileva d'altro canto la difficoltà ad intercettare il fascio luminoso e quindi garantire un adeguato controllo del livello di illuminamento; per questo motivo, il prototipo si può assimilare ad un sistema schermante.
Un aspetto interessante da non sottovalutare è che i giunti cinetici in Nitinol [Fig.4.6] sono assimilabili agli stomi e funzionano come cellule specializzate delle foglie che possono aprirsi o chiudersi: in primo luogo, come già evidenziato, immagazzinano calore, in secondo luogo invece del calore potrebbero immagazzinare acqua al fine di rendere più facile l'essicazione o l'asciugatura delle facciate dell'involucro dovuto a eventi di precipitazione.

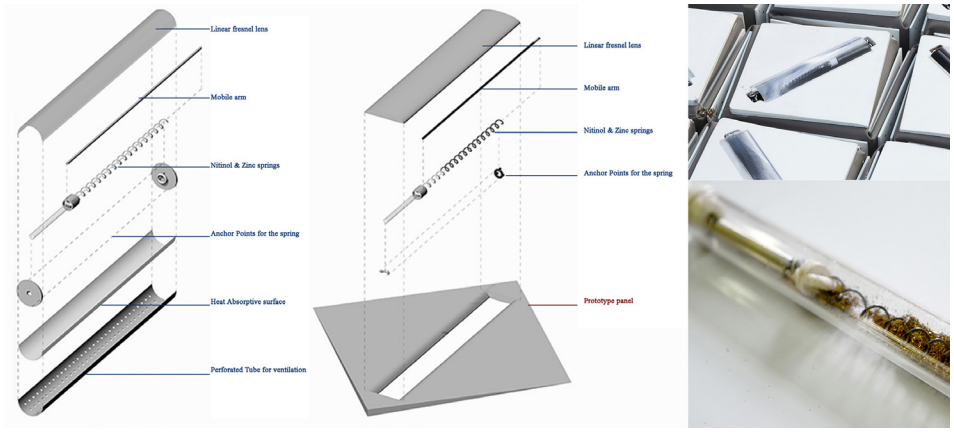


Fig. 4.6. Giunti in Nitinol e componenti della membrana adattiva

4.3.3 Shape Memory Polymers

Materiale: Gli *Shape Memory Polymers* (SMP) sono una classe emergente di polimeri attivi che hanno capacità di doppia forma. Finora, il gruppo di SMP più ampiamente studiato sono stati gli SMP indotti termicamente, che sono innescati dal calore [Behl et al., 2010]. Possono cambiare la loro forma in modo predefinito dalla forma A alla forma B se esposti a uno stimolo appropriato. Mentre la forma B è data dalla fase di lavorazione iniziale, la forma A è determinata applicando un processo chiamato programmazione [Behl et al., 2007]. La fase di lavorazione iniziale [Fig. 4.7] (come estrusione, filatura, pressatura) è necessaria per determinare la forma permanente sopra la "temperatura di commutazione" TSW.

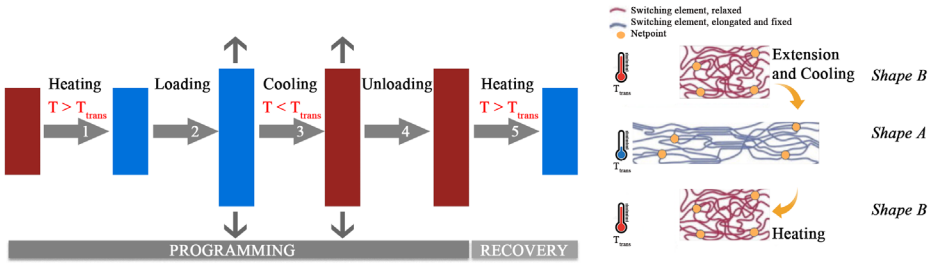


Fig. 4.7. Effetto a memoria di forma nei polimeri

La successiva programmazione della sagoma provvisoria richiede una forza meccanica esterna, che viene applicata al materiale al di sotto di TSW. Nel caso in cui il dispositivo formato venga esposto a temperature superiori a TSW durante l'uso, tornerà alla sua forma permanente. In linea di principio, questo ciclo di programmazione e ripristino della forma originale può essere ripetuto più volte [Hager et al., 2015]. Le deformazioni della fase a bassa temperatura, che si verificano al di sopra di una sollecitazione critica, vengono completamente recuperate durante la trasformazione solido-solido alla fase ad alta temperatura [Hu et al., 2012].

Progetto sperimentale: Il progetto analizzato è il *Breathing Skins* [Fig. 4.8] che nasce come tesi di laurea di Becker all'Università di Stoccarda è stato sviluppato a Mandelbachtal, in Germania, nel 2015.
Le facciate funzionano aumentando o diminuendo le dimensioni delle aperture sparse sulla superficie per controllare il flusso di calore tra interno ed esterno. Questi canali d'aria regolabili, definiti come muscoli pneumatici, possono essere chiusi pneumaticamente attraverso l'applicazione della pressione dell'aria all'interno della facciata. Su ogni metro quadrato, 140 canali d'aria sono controllati senza alcuna installazione tecnica visibile.

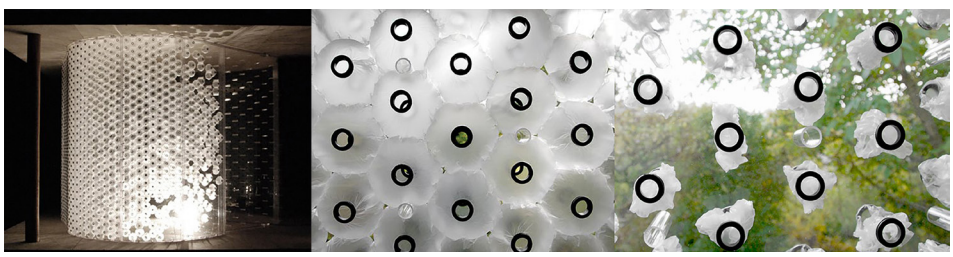


Fig. 4.8. Variazione del materiale nei canali d'aria

I processi di deformazione, gestiti da un attuatore pneumatico in SMP, richiedono un apporto energetico minimo. Una leggera sottopressione apre i muscoli pneumatici, che sono uniti reversibilmente tra due lastre di vetro e possono essere smontati e riciclati separatamente.

Modalità di controllo dei flussi: La tecnologia utilizzata per adattare la facciata alle condizioni ambientali, ovvero l'attuatore in SMP, si ispira al comportamento dei muscoli umani.
A seconda dell'angolo tra le fibre, l'attuatore è in grado di estendersi e contrarsi, e modificando l'angolo iniziale tra le fibre, si riesce a ottenere una rigidità variabile in ogni punto lungo la corsa totale dell'attuatore. Questi componenti si dilatano e si chiudono per controllare le condizioni esterne e consentono alla luce di penetrare all'interno, anche in base anche alle impostazioni scelte dagli utenti. I meccanismi applicati sono in grado di controllare il flusso termico e luminoso e, allo stesso tempo, i canali d'aria gestiscono un adeguato passaggio d'aria garantendo una ventilazione naturale.

4.3.4 Electro-Active Polymers

Materiale: Il comportamento dinamico degli Electro-Active Polymers, è innescato quando una corrente elettrica, lo stimolo, attraversa il laminato aumentando le forze elettrostatiche che generano una contrazione dell'elastomero [Villegas et al., 2020].
Un tipico polimero elettroattivo dielettrico [Fig. 4.9] (DEAP) - un tipo di EAP elettronico - è costituito da una membrana di elastomero dielettrico posta tra due elettrodi.

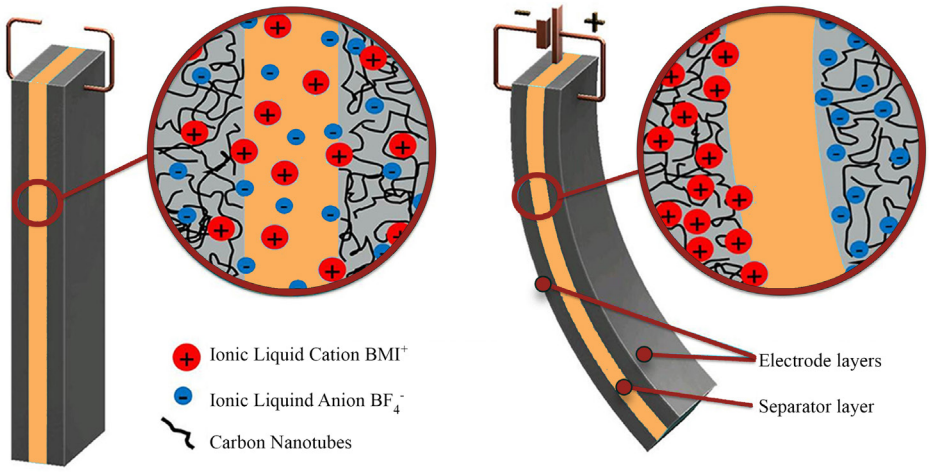


Fig. 4.9. Deformazione in EAP

Quando viene applicato un campo elettrico, la membrana si comprime e si allunga, facendo cambiare forma al materiale [Zhao et al., 2016] con capacità di immagazzinare una grande quantità di energia. Attuatori, generatori e sensori basati su questa tecnologia hanno due proprietà in comune: una pellicola di materiale dielettrico, che funge da materiale attivo, ed elettrodi conformi attraverso i quali viene fornita l'eccitazione elettrica.
Il grado di conformità di questi elettrodi determina la quantità di variazione dimensionale consentita [Hodgins et al., 2015].
Nella modalità *attuatore*, l'energia elettrica, fornita da una differenza di potenziale elettrico tra gli elettrodi, viene sostanzialmente convertita in energia meccanica.
Nella modalità *generatore*, viene prima applicata una differenza di potenziale elettrico e

quindi l'energia meccanica immagazzinata nel materiale dielettrico, allungando o comprimendo il materiale, viene convertita in energia elettrica.
Nella modalità *sensore*, le variazioni di capacità sono indotte a seguito di variazioni dimensionali meccaniche (spessore, area della sezione trasversale) sia del film dielettrico che degli elettrodi conformi [Benslimane et al., 2010].

Progetto sperimentale: Un esempio di applicazione di questo materiale è *Homeostatic Facade Prototype* [Fig. 4.10] a New York, un sistema di facciata in vetro autoregolante alla luce e alla variazione di temperatura.
La tecnologia utilizza il muscolo artificiale per controllare la percentuale di aperture in un sistema di schermatura, al fine di o impedire il guadagno di calore solare. Il sistema è costituito da un nastro ingegnerizzato, all'interno della cavità di una facciata in vetro a doppia pelle. Il materiale EAP è avvolto intorno a un nucleo flessibile che può piegarsi con l'espansione o la contrazione dell'attuatore. Il tipo di elettrodo utilizzato è uno strato di argento spesso 200 nm [Decker, 2016]. Quando le condizioni ambientali cambiano, la carica nello strato d'argento provoca il movimento di un attuatore sensibile. L'aumento delle cariche fa espandere l'elastomero, facendo piegare il nucleo e tirando l'elastomero verso un lato.
Il risultato è la chiusura della facciata regolando la temperatura all'interno dell'edificio.

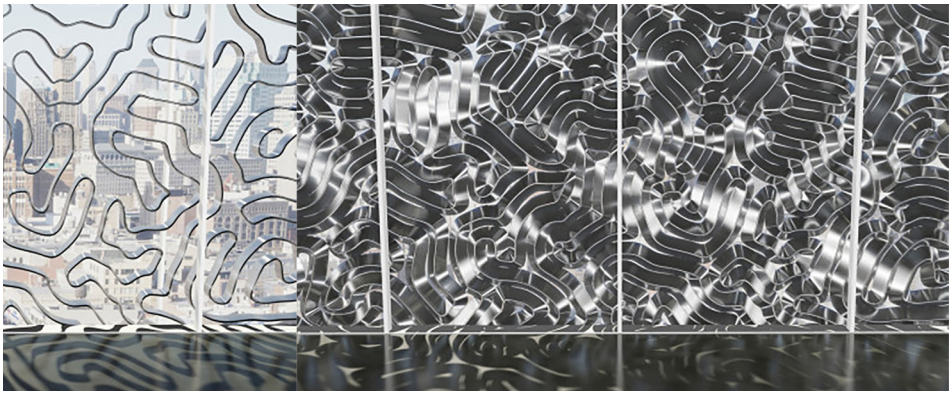


Fig. 4.10. Comportamento adattivo della facciata

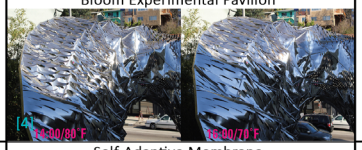
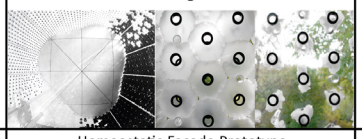
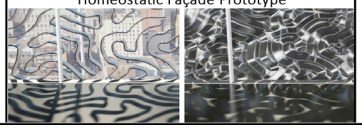
Modalità di controllo dei flussi: Quando al sistema tecnologico applicato in facciata viene applicata una tensione, come può essere una differenza di temperatura, le forze elettrostatiche tra i due elettrodi provocano la deformazione del polimero. Per questo motivo, i componenti materici hanno l'abilità di controllare il flusso termico e gestire quello luminoso per consentire un corretto apporto di radiazione solare negli spazi interni degli edifici. L'espansione del materiale può essere anche causata da correnti d'aria calda limitando la pressione sfavorevole della temperatura e minimizzando l'impatto sulle superfici dell'involucro. Da ciò, si può dedurre un buon livello di controllo della ventilazione.

4.4 Valutazioni critiche

Lo studio sistematico delle caratteristiche materiche dei casi studio mette in luce le capacità intrinseche ed estrinseche che comportano un'organizzazione dinamica e strategica delle facciate adattive. La ricerca approfondisce la tematica legata al concetto di adattività dell'involucro edilizio, tentando di sistematizzare le informazioni raccolte e avanzare l'impiego di queste tecnologie innovative.

Sulla base della revisione della letteratura, si sono evidenziati materiali e tecnologie promettenti che potrebbero soddisfare requisiti in riferimento a delle sollecitazioni esterne e si sono analizzati i casi studio con una spiegazione sintetica del loro funzionamento in modo olistico.
Dallo scenario analizzato, si è costruita una matrice di lettura di sintesi [Fig. 4.11] che mette in relazione le caratteristiche di adattività degli stimoli ambientali dei diversi materiali individuati con il tentativo di associarli alla gestione del controllo dei flussi termico, luminoso, d'aria e d'acqua.

Fig. 4.11. Matrice di lettura. Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Materiale	Casi studio	Tipo di attuazione	Controllo	Adattamento agli stimoli	Tempo di risposta	Controllo dei flussi
Shape Memory Hybrid (SMH)	Bloom Experimental Pavilion 	● Meccanico ○ Pneumatico ○ Elettrico	● Intrinseco ○ Estrinseco	● Si ○ No	○ Secondi ● Minuti ○ Ore	● Flusso Termico ● Flusso Luminoso ○ Flusso D'aria ● Flusso d'acqua
Shape Memory Alloy (SMA)	Self-Adaptive Membrane 	● Meccanico ○ Pneumatico ○ Elettrico	● Intrinseco ○ Estrinseco	● Si ○ No	● Secondi ○ Minuti ○ Ore	● Flusso Termico ● Flusso Luminoso ● Flusso D'aria ● Flusso d'acqua
Shape Memory Polymers (SMP)	Breathing Skins 	○ Meccanico ● Pneumatico ○ Elettrico	○ Intrinseco ● Estrinseco	● Si ○ No	● Secondi ○ Minuti ○ Ore	● Flusso Termico ● Flusso Luminoso ● Flusso D'aria ○ Flusso d'acqua
Electro-Active Polymers (EAP)	Homeostatic Façade Prototype 	● Meccanico ○ Pneumatico ○ Elettrico	○ Intrinseco ● Estrinseco	● Si ○ No	● Secondi ○ Minuti ○ Ore	● Flusso Termico ● Flusso Luminoso ○ Flusso D'aria ○ Flusso d'acqua

Il principio di base che lega i materiali analizzati *Shape Memory Hybrid*, *Shape Memory Alloy*, *Shape Memory Polymers* e *Electro-Active Polymers* è il meccanismo di attivazione alla scala microscopica che favorisce la risposta adattiva rispetto ad una sollecitazione esterna. Sebbene tutti i materiali individuati reagiscono ad un'espansione termica e, nel caso degli Electro-Active Polymers, il loro allungamento è indotto da una transizione termica, questo non equivale ad una gestione del controllo del flusso luminoso.
Difatti, l'applicazione degli Shape Memory Alloy utilizzati in combinazione con altra componentistica avanzata nel prototipo della membrana adattiva non sono progettati per regolare il flusso luminoso, piuttosto lo riducono, comportando l'accensione di impianti di illuminazione, rendendo così l'involucro meno efficiente dal punto di vista prestazionale, in quanto non ottimizza le risorse naturali.
Gli Shape Memory Hybrid a cui fanno riferimento termo-bimetalli possono limitare la quantità di acqua da infiltrazione dovuta a precipitazioni intense allontanandola dalla superficie della facciata, consentendo un buon livello di controllo del flusso d'acqua.
Un aspetto critico da considerare è l'acqua che si può infiltrare tra i vari elementi di termo-bimetalli, poiché gli stessi elementi quando sono soggetti alla trasformazione di chiusura, non sono ermetici e risulta problematico risolvere la questione di allontanamento del flusso d'acqua se il sistema adattivo non è progettato adeguatamente.

Per quanto riguarda la ventilazione, sono progettati per deviare o respingere il flusso d'aria. Di contro, i meccanismi applicati al caso studio Breathing Skins e l'utilizzo degli Shape Memory Polymers, sono in grado di controllare il flusso termico e luminoso e, allo stesso tempo, i canali d'aria danno la possibilità di gestire un adeguato passaggio d'aria garantendo una ventilazione naturale. L'espansione degli Electro-Active Polymers - in reazione ad una sollecitazione termica o radiazione solare che favoriscono un alto livello di controllo del flusso termico e luminoso - può essere anche causata da correnti d'aria calda limitando la pressione sfavorevole della temperatura e minimizzando l'impatto sulle superfici dell'involucro. Per questo motivo si può dedurre un buon livello di controllo della ventilazione.

La matrice di lettura vuole essere uno strumento utile per indirizzare scelte materiche per futuri componenti di involucro adattivo, per una migliore gestione, intesa come mitigazione e adattamento, degli eventi estremi di cambiamento climatico della Regione del Mediterraneo. Questo servirà come base per proporre e perseguire nuovi concetti per facciate adattive e per sviluppare nuovi criteri e indicatori nell'ambito dei requisiti prestazionali delle facciate. Tutti questi sistemi mostrano modi interessanti e diversi di affrontare la questione della risposta adattiva alle variabili fluttuazioni micro-ambientali.
Questa attività è stata necessaria per l'acquisizione delle conoscenze in merito all'innovazione e alla sperimentazione di materiali per orientare indirizzi strategici per la progettazione degli involucri del futuro, con il fine di soddisfare specifici criteri edilizi e ambientali, che fungono da obiettivi progettuali da raggiungere. I progetti qui considerati dimostrano e contribuiscono all'impiego di materiali adattivi negli involucri edilizi, frutto delle ultime innovazioni tecnologiche, per un ulteriore rinnovato dibattito sui concetti di innovazione e sostenibilità ambientale.
Per queste ragioni, l'uso consapevole degli smart materials è finalizzato a preservare la qualità prestazionale l'ambiente costruito.

Gli aspetti innovativi di questo studio coinvolgono molteplici scale:

- *alla scala materica*: che rileva un impatto tecnologico e produttivo, si determina un avanzamento nella definizione di prodotti, caratterizzati da un forte contenuto innovativo di materiali per l'adattamento al climate-change, rivolti ai trend del mercato e delle facciate efficienti. Attraverso gli smart materials si tracciano ottimizzazioni a livello prestazionale dell'edificio nel suo complesso;

- *alla scala delle facciate*, si individuano componenti adattivi al fine di innalzare la capacità di rispondere alle mutevoli esigenze sia degli utenti sia delle mutevoli condizioni ambientali, oggi di grande impatto a fronte dei cambiamenti climatici.

Tuttavia, per la complessità della tematica trattata, alcuni campi di applicazione non sono stati trattati ma l'analisi materica, frutto delle ultime innovazioni, vuole mettere in evidenza come la progettazione delle facciate adattive richiede il mantenimento di uno stato di equilibrio ottimale in relazione a specifiche condizioni contestuali mutevoli nel tempo.
Nonostante esistano esempi di involucri e componenti edilizi adattivi che sfruttano le proprietà specifiche degli smart materials, sono pochi e la maggior parte sono ancora in fase di sviluppo [Modin, 2014].
D'altro canto, le tecnologie adattive, in costante sviluppo e sperimentazione, sono legate a casi singoli di progettazione architettonica, limitando l'applicazione su larga scala di sistemi innovativi di involucro possono contribuire in modo significativo al controllo delle variazioni microclimatiche che si innescano tra edificio-contesto.
Le informazioni carenti si individuano anche nella mancanza di manuali d'uso e manuten-

zione che rappresentano degli strumenti indispensabili sia per il personale qualificato ai possibili interventi manutentivi, sia per i fruitori in quanto hanno la gestione completa dei sistemi adattivi che possono gestire in base alle loro esigenze e conoscere gli eventuali guasti o malfunzionamenti per poter attuare azioni correttive e manutentive.
Pertanto, è necessario continuare a provare, verificare e ottimizzare per mettere a punto e diffondere massicciamente questo tipo di sistemi di involucro, perché oggi, tra l'altro, i costi elevati dei sistemi ne limitano l'applicazione, oltre ai limiti tecnologici prestazionali.
Ad esempio, quando si applicano gli SMA o i termo-bimetalli, è necessario combinare questi materiali in un sistema di facciata multistrato per soddisfare i requisiti termici, igro-termici e acustici e al fine di evitare che queste leghe si ossidano, soprattutto in ambienti marini o industriali [Juaristi et al., 2018].

I limiti di applicazione degli involucri edilizi di tipo adattivo si riversano nelle lacune nei metodi di valutazione esistenti in riferimento ad una corretta misurazione del livello prestazionale, data la mancanza di parametri dinamici necessari per la valutazione delle facciate adattive e, in aggiunta, la verifica del controllo della qualità non può avvenire ex-post.
Di conseguenza si rileva la mancanza di dati tecnologici necessari per la progettazione di facciate in regime di cambiamento climatico, poiché gli interventi di applicazione dei sistemi adattivi devono essere considerati a lungo termine nell'ottica dell'approccio di *Adaptive and Climate Resilient Design* (Cfr. Cap.1).
In aggiunta, gli studi che indagano la relazione che intercorre tra l'involucro edilizio di tipo adattivo e gli effetti del cambiamento climatico sono limitati, rappresentando un campo ancora da indagare e, quindi, risulta importante tracciare una base per la loro verifica prestazionale. Poichè le prestazioni degli involucri edilizi adattivi non sono assicurate da un apparato normativo specifico, si sottolinea l'esigenza di classificare il comportamento delle tecnologie adattive in funzione al contesto ambientale di riferimento, affinché i sistemi possano essere replicati in altri luoghi con caratteristiche ambientali simili.

Dopo aver dichiarato quali possono essere i sistemi per l'adattamento delle facciate riferiti ad un controllo termico, luminoso, d'aria e d'acqua - per gli step consequenziali riferiti alle fasi di analisi critica della ricerca - l'attenzione si concentra sulle prestazioni delle facciate continue, che rappresentano il sistema principale su cui vengono applicate le tecnologie adattive.
Emerge quindi la necessità di costruire nuove metodologie di supporto non solo alla progettazione ma anche alla verifica prestazionale delle facciate continue, che possano essere supportate dallo sviluppo di tecniche di modellazione, simulazione e testing in modo tale da avere risultati prestazionali affidabili e condivisi dagli stakeholder del settore e della comunità scientifica.
Per gli obiettivi della ricerca comprendere il comportamento delle facciate continue, attraverso normative di riferimento specifico, in regime di cambiamento climatico risulta un'azione imprescindibile al fine di misurarne il loro funzionamento *adattivo*, attraverso azioni di testing in regime simulato.

In questo contesto il termine adattivo, associato al funzionamento delle facciate continue continue si riferisce alla capacità del sistema - attraverso la sua componentistica (senza materiali adattivi) - di reagire in modo positivo e non subire danni dopo un evento estremo di cambiamento climatico, mantenendo le sue caratteristiche prestazionali.
Ad esempio, a seguito di una bomba d'acqua, non si devono rilevare infiltrazioni all'interno del sistema di facciata continua e non subire danneggiamenti agli elementi (come giunti e sigillanti) che prevengono le infiltrazioni d'acqua (Cfr. Cap. 5).

A fronte delle problematiche rilevate nel percorso metodologico della ricerca, il seguente capitolo sarà dedicato ad acquisire le conoscenze sui requisiti prestazionali delle facciate continue, attraverso una casistica che rileva i possibili deficit e malfunzionamenti che può subire una facciata a causa dei cambiamenti climatici in atto.
Questa attività risulta necessaria per definire e strutturare una metodologia di valutazione prestazionale che verifichi il funzionamento adattivo delle facciate continue soggette ad eventi estremi di cambiamento climatico

Per una migliore lettura e comprensione, si riporta un flow-chart relativo alla connessione metodologica delle tematiche che vengono prese in considerazione nei capitoli 4 e 5 [Fig. 4.12].

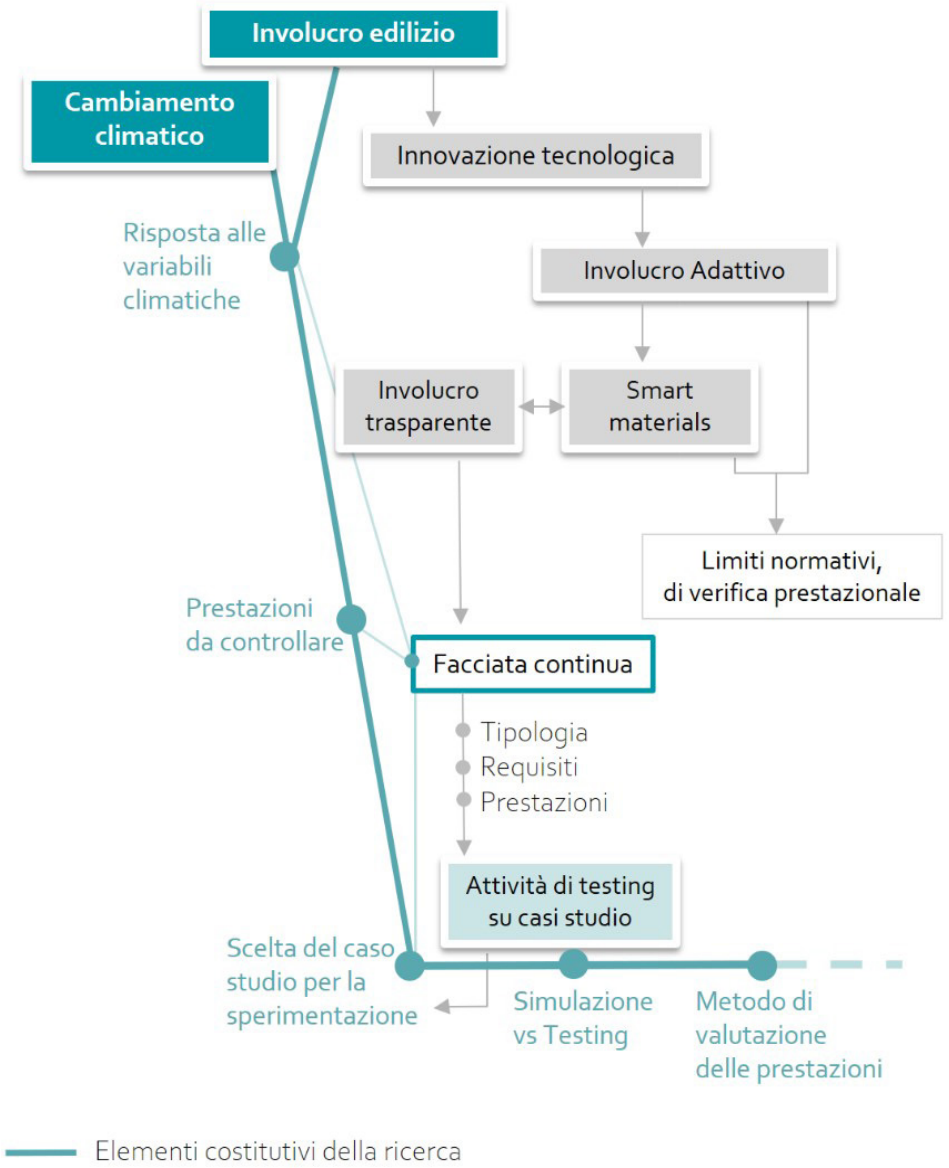


Fig. 4.12. Flow-chart di connessione tematica Capitolo 4 e Capitolo 5. Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Note

1. "Quindi, analogamente alla pelle umana, l'idea di pelle dell'edificio si riferisce all'involucro dell'edificio, interno o esterno, senza distinzione tra pareti e tetto - che in parte o totalmente perde il suo scopo principalmente strutturale a vantaggio di un comportamento funzionale interattivo/organico". Del Grosso, A. E., & Basso, P. (2010). Adaptive building skin structures. Smart Materials and Structures, 19(12), 124011. (12pp., cit. pag.1) DOI:10.1088/0964-1726/19/12/124011

2. Si fa riferimento all'ultima Conferenza delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (COP 27), tenuta a Sharm el-Sheikh nei giorni 7 e 8 novembre 2022. La conferenza sui cambiamenti climatici persegue quattro obiettivi principali:
- mitigazione: mantenere l'obiettivo di limitare il riscaldamento globale a 1,5 gradi rispetto ai livelli preindustriali;
- adattamento: stabilire un programma d'azione globale rafforzato in materia di adattamento;
- finanziamenti: esaminare i progressi compiuti in relazione alla messa a disposizione di 100 miliardi di USD all'anno entro il 2025 per aiutare i paesi in via di sviluppo ad affrontare gli effetti negativi dei cambiamenti climatici;
- collaborazione: assicurare un'adeguata rappresentazione di tutti i pertinenti portatori di interessi nella COP 27, soprattutto delle comunità vulnerabili. Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://cop27.eg/#/
In questo contesto, risulta utile riferirsi al Piano Energia Clima 2030 che costituisce lo strumento con il quale ogni Stato, in coerenza con le regole europee vigenti e con i provvedimenti attuativi del pacchetto europeo Energia e Clima 2030, stabilisce i propri contributi agli obiettivi europei al 2030 sull'efficienza energetica e sulle fonti rinnovabili e quali sono i propri obiettivi in tema di sicurezza energetica, mercato unico dell'energia e competitività. Le cinque dimensioni dell'energia sono decarbonizzazione, incluse le fonti rinnovabili; efficienza energetica; sicurezza energetica; mercato interno dell'energia; ricerca, innovazione e competitività.
Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://energiaclima2030.mise.gov.it/index.php/il-piano

3. Italia: Il Ministero dello Sviluppo Economico ha pubblicato il 21 gennaio 2020 il testo Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima PNIEC, in cui vengono stabiliti gli obiettivi nazionali al 2030 sull'efficienza energetica, sulle fonti rinnovabili e sulla riduzione delle emissioni di CO_2, nonché gli obiettivi in tema di sicurezza energetica, interconnessioni, mercato unico dell'energia e competitività, sviluppo e mobilità sostenibile, delineando per ciascuno di essi le misure che saranno attuate per assicurarne il raggiungimento. Per ulteriori informazioni consultare il sito: https://www.mise.gov.it/index.php/it/notizie-stampa/pniec2030
Nell'ambito del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza PNRR, si fa riferimento alla missione 2: Rivoluzione verde e transizione ecologica, che concerne i grandi temi dell'agricoltura sostenibile, dell'economia circolare, della transizione energetica, della mobilità sostenibile, dell'efficienza energetica degli edifici, delle risorse idriche e dell'inquinamento.
Per ulteriori informazioni consultare il sito: https://temi.camera.it/leg18/pnrr/missioni.html

Spagna: Si far riferimento alla Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética, che rappresenta il quadro istituzionale per facilitare, in modo prevedibile, il progressivo adattamento della realtà del Paese ai requisiti che regolano l'azione climatica e per garantire il coordinamento delle politiche settoriali, assicurando coerenza tra di esse e sinergie per raggiungere l'obiettivo della neutralità climatica. L'obbligo di limitare le emissioni condiziona le politiche settoriali e implica cambiamenti nei modelli di consumo. Questa legge contiene gli elementi normativi per il primo PNIEC, nonché per i successivi PNIEC da presentare alla Commissione europea.
Per ulteriori informazioni consultare i siti: https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2021-8447; https://www.miteco.gob.es/es/prensa/pniec.aspx

4. Definizione di involucro dall'Enciclopedia Italiana Digitale Treccani: https://www.treccani.it/vocabolario/involucro/

5. Si fa riferimento alla crisi petrolifera degli anni '70, a causa della quale i governi dovettero adottare misure drastiche per far fronte all'emergenza energetica. Da questo avvenimento, il dibattito su un modello di sviluppo ecologicamente compatibile e su possibili alternative energetiche al petrolio e agli altri fossili è divenuto progressivamente sempre più centrale.

6. Un involucro edilizio massivo funziona come volano termico, sia d'inverno che d'estate. La sua buona capacità di accumulo termico consente il raggiungimento di un equilibrio climatico e il ridimensionamento degli impianti di climatizzazione. Un edificio realizzato massivamente in muratura pesante, in un modello dinamico di utilizzo, cioè in un arco giornaliero o stagionale di tempo, ha un fabbisogno energetico per riscaldamento e raffrescamento assai inferiore, rispetto agli altri tipi di edifici, a parità di condizioni. Un muro leggero, possedendo una capacità termica inferiore, trasmette più prontamente il caldo d'estate verso l'interno e d'inverno verso l'esterno; immagazzina meno energia, provocando immediatamente i cambiamenti di temperatura interna rispetto a quella esterna. Un muro massivo, invece, accumula energia nelle ore più calde e la immette dilazionata nel tempo nei locali, conservandola al suo interno.
Di Ruocco, G. (2012). Oltre la facciata. L'evoluzione tecnologica dell'involucro edilizio tra tradizione e innovazione. CUES Edizioni, Salerno, Italia. ISBN 978-88-97821-24-3

7. La chiusura è un'unità tecnologica e rappresenta l'insieme delle unità tecnologiche e degli elementi tecnici del sistema edilizio aventi come funzione di separare e conformare gli spazi interni del sistema edilizio rispetto all'esterno. Definizione da Norma UNI 8290-1:1981 + A122:1983 - Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia

8. Si può definire l'involucro come un sistema (tridimensionale) di chiusura integrale dell'edificio: sistema in quanto costituito da diversi elementi tecnici strettamente interdipendenti (strati), e chiusura integrale grazie alla continuità degli elementi che lo compongono. La distinzione funzionale tra "strato" ed "involucro" è legata al loro grado di autonomia strutturale. Gli "strati" non sono di per sé portanti e non fanno parte di un'unità strutturale principale: sono uno "strato" una lastra di rivestimento metallico, un pannello isolante, le lastre di un vetro-camera o le singole membrane di un cuscino pneumatico.

9. Thomas Herzog ha evidenziato il pensiero di 'architettura involucrata' amplificando le capacità dell'involucro edilizio come sistema-filtro selettivo e polivalente in risposta alle sempre più articolate necessità e

condizioni di benessere del fruitore. La funzione primaria di supporto dell'involucro rispetto allo scheletro portante si delinea nella misura in cui ad esso viene affidato il compito di creare un equilibrio tra ambiente interno ed esterno in termini di diffusione della temperatura, flussi d'aria, purezza e umidità dell'aria e tipologia della radiazione in relazione al rapporto tra la localizzazione e la conformazione dell'involucro rispetto alle immediate vicinanze fisiche al contorno. Tucci, F. (2004). Thomas Herzog. Modulo 302 (2004), pp. 548-558. Online avaible at: https://modulo.net/it/approfondimenti/thomas-herzog#page/1 Accessed: 10 novembre 2022

10. L'evoluzione tecnologica permette oggi al progettista di intendere l'involucro edilizio non più come un semplice diaframma interno-esterno, ma bensì come un filtro dinamico in grado di rispondere correntemente alle esigenze di benessere, di sostenibilità e risparmio energetico e capace contemporaneamente di coniugarsi con le istanze di espressione e "linguaggio".

11. L'approccio performance-based building è un approccio progettuale che affronta specificamente criteri relativi alla soddisfazione di determinati requisiti prestazionali misurabili o prevedibili, come l'efficienza energetica o il carico sismico. Tale approccio può aiutare gli attori del processo progettuale a comprendere l'opportunità di impatto sulle prestazioni, i vincoli di costruzione/progetto e i limiti progettuali/realizzativi che ne derivano, offrendo un continuo feedback di validazione delle prestazioni complessive del sistema progettuale. Tutto questo è reso possibile anche attraverso lo sviluppo di strumenti di simulazione e metodi di test delle prestazioni necessari nei processi di progettazione e valutazione che rappresentano un valido strumento in termini di verifica ex-ante delle prestazioni durante l'intero processo progettuale. A differenza della progettazione tradizionale, l'analisi viene utilizzata fin dall'inizio del processo di progettazione per valutare l'impatto che varie decisioni di progettazione avranno sugli obiettivi di prestazione. Becker, R. (2008). Fundamentals of performance-based building design. In Building Simulation, Vol. 1, No. 4, pp. 356-371. Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/s12273-008-8527-8

12. La trasmittanza termica U è il parametro principale utilizzato per calcolare le dispersioni termiche attraverso l'involucro di un edificio e rappresenta il flusso di calore che attraversa una superficie unitaria sottoposta a differenza di temperatura pari a 1ºC. L'unità di misura è il W/m2K. Più basso è il valore di trasmittanza termica degli elementi che costituiscono l'involucro edilizio, minore sarà il flusso di calore che attraversa gli elementi stessi. Un basso valore di U consente quindi di ridurre le dispersioni di calore. Le variabili che influenzano il calcolo della trasmittanza termica di una chiusura trasparente sono: la tipologia di vetro, la tipologia di telaio; la tipologia di un eventuale distanziatore.

13. Il fattore solare g di una superficie vetrata indica la percentuale di energia termica che la attraversa, rispetto al totale dell'energia incidente sulla superficie stessa. Il fattore solare è un parametro determinante nella progettazione di un edificio, soprattutto quando gli ambienti presentano ampie superfici trasparenti, poiché è in grado di quantificare il calore che entra negli ambienti interni, ricoprendo un'importanza assai rilevante nella determinazione del bilancio energetico complessivo dell'edificio. Nei mesi invernali, infatti, gli apporti solari gratuiti contribuiscono a ridurre il fabbisogno energetico per il riscaldamento, ma, comportando un aumento della temperatura interna, possono essere problematici nella stagione estiva se non correttamente considerati durante la fase progettuale o durante la scelta del prodotto vetrario, in modo particolare per i paesi mediterranei.

14. La Norma UNI EN ISO 6946:2018 - Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodi di calcolo, ornisce il metodo per il calcolo della resistenza termica e della trasmittanza termica dei componenti e degli elementi per edilizia, escluse le porte, le finestre e altre parti vetrate, le facciate continue, i componenti che implicano uno scambio termico con il terreno e i componenti in cui è previsto che l'aria possa circolare. Il metodo si applica ai componenti e agli elementi costituiti da strati termicamente omogenei (che possono includere intercapedini d'aria). La norma fornisce inoltre un metodo approssimato che può essere utilizzato per gli elementi contenenti strati non omogenei, incluso l'effetto di fissaggi metallici, per mezzo di un termine di correzione.

15. La Norma UNI EN 410:2011 Vetro per edilizia - Determinazione delle caratteristiche luminose e solari delle vetrate, è la versione ufficiale in lingua inglese della norma europea EN 410 (edizione febbraio 2011). La norma specifica i metodi per la determinazione delle caratteristiche luminose e solari delle vetrate per edilizia. Queste caratteristiche possono servire come base per il calcolo della illuminazione, riscaldamento e raffreddamento delle stanze e permettono una comparazione tra i differenti tipi di vetrate.

16. Thomas Herzog, architetto tedesco può essere considerato un pioniere dell'innovazione oltre che uno dei massimi esponenti nel campo dell'architettura bioclimatica e del progetto ecosostenibile. Grazie a un costante rapporto con il mondo della produzione industriale ha sviluppato un'ampia conoscenza delle dinamiche correlate ai processi costruttivi e considera l'edificio parte di una nuova dimensione di equilibrio energetico corrispondente al quartiere urbano, in cui deve essere controllato ogni elemento di consumo e di produzione energetica. L'opera di Herzog, può essere considerata transdisciplinare, dove l'architetto progettista lega le proprie competenze a quelle di una pluralità di specialisti (dei settori dell'acustica, dell'energetica, dell'illuminotecnica, dell'impiantistica, delle strutture) capaci di fornire contributi determinanti e tecnicamente di alto livello prestazionale.

17. "È significativo parlare di un edificio come di una "pelle" e non meramente di una "protezione", qualcosa che "respira", che regola le condizioni climatiche e ambientali tra interno ed esterno. È il segnale che si sta cominciando a guardare a questa "pelle" in analogia a quella delle creature umane. Il bisogno di riconoscere queste analogie e di sviluppare edifici con relazioni complesse variabili e regolabili interno-esterno e con qualità adattabili dal punto di vista termico e visivo, è un punto cardine su cui occorre sviluppare a lungo studi e ricerche per compiere i passi necessari nella direzione di un equilibrio umo/architettura/ambiente". Thomas Herzog, 1995 riportato da Tucci, F. (2000). Thomas Herzog. Modulo, 259, pp. 154-155

18. UNI EN 13830:2022 Facciate continue - Norma di prodotto. Questo documento specifica i requisiti delle facciate continue utilizzate come involucro edilizio al fine di fornire resistenza agli agenti atmosferici, sicurezza d'esercizio e risparmio energetico e ritenzione del calore. La norma fornisce metodi di prova, valutazione, calcolo e i criteri di prestazione ad assicurare la conformità.

19. Il valore interdisciplinare dell'involucro è eviden-

ziato dal fatto che il suo progetto è sempre più spesso affidato a figure professionali eterogenee tra loro, architetti, designers, artisti, che si occupano spesso esclusivamente del design dell'involucro. Il progetto della superficie degli edifici è diventato così un campo di incontro interdisciplinare e di ibridazione dei linguaggi, che necessita di competenze sempre più specializzate e spesso di capacità di gestire espressioni e performances delle nuove tecnologie.

20. L'utilizzo del termine membrana serve ad introdurre la narrazione di un processo evolutivo che ne ha visto progressivamente ridursi lo spessore, amplificando nel contempo le sue capacità di risposta alle sempre più articolate necessità e condizioni di benessere del fruitore. Busa, L. (2006). Architettura e involucro. Tecnologia dell'architettura: creatività e innovazione nella ricerca: Materiali del I Seminario OSDOTTA. Viareggio, 14-16 settembre 2005 / a cura di Maria Antonietta Esposito. – Firenze: Firenze University Press, 2006 (DOTTA; 1), pp. 161-166. ISBN-10 88-8453-479-8 (online)

21. L'involucro assolve, infatti, il ruolo di parte metabolica e morfologica dell'edificio interpretato in senso olistico, e attraverso il complesso sistema di attuatori e sensori, che lo caratterizzano nella conformazione tecnologica più evoluta, diventa in grado di regolare in modo attivo le dinamiche termico-funzionali che caratterizzano un edificio evoluto.

22. La quarta rivoluzione industriale e la trasformazione digitale sottostante, nota come Industria 4.0 sta cambiando radicalmente il modo in cui le persone vivono e lavorano e il pubblico rimane ottimista riguardo alle opportunità che l'Industria 4.0 può offrire per la sostenibilità. Queste tecnologie digitali determinano una maggiore automazione, la manutenzione predittiva, l'ottimizzazione automatica dei miglioramenti di processo e, soprattutto, un nuovo livello di efficienza e di capacità di risposta ai clienti non possibili. Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. Journal of cleaner production, 252, 119869. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119869

23. L'Internet of Things (IoT) è un argomento importante per l'industria tecnologica, la politica e gli ambienti ingegneristici ed è diventato una notizia da prima pagina sia nella stampa specializzata che nei media popolari. Questa tecnologia si concretizza in un ampio spettro di prodotti, sistemi e sensori collegati in rete, che sfruttano i progressi della potenza di calcolo, della miniaturizzazione dell'elettronica e delle interconnessioni di rete per offrire nuove funzionalità prima non possibili. Un'abbondanza di conferenze, relazioni e articoli di cronaca discutono e dibattono l'impatto prospettico della "rivoluzione IoT", dalle nuove opportunità di mercato e modelli di business alle preoccupazioni per la sicurezza, la privacy e l'interoperabilità tecnica. Rose, K., Eldridge, S., & Chapin, L. (2015). The internet of things: An overview. The internet society (ISOC), 80, pp. 1-50.

24. Con sistemi smart, quindi intelligenti, si intendono quelle soluzioni architettoniche e tecnologico-costruttive di involucro multifunzionali ed efficienti, concepite sulla base di un approccio integrato finalizzato a minimizzare i fabbisogni dell'edificio attraverso la gestione ottimale dei flussi energetici, della ventilazione e della luce naturale. Ad esempio, tecniche che favoriscono lo sfruttamento dell'energia solare, sistemi di facciata multifunzionali che integrano diverse tecnologie come parte integrante del linguaggio architettonico, delle prestazioni e della tecnologia dell'organismo edilizio.

25. UNI 10375:2011 - Metodo di calcolo della temperatura interna estiva degli ambienti. La norma descrive un metodo per il calcolo della temperatura interna degli ambienti durante il periodo estivo in assenza di impianto di climatizzazione.

26. Il comfort termico è "quella condizione mentale che esprime soddisfazione per l'ambiente termico ed è valutata mediante valutazione soggettiva". ANSI/ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy è uno standard nazionale americano pubblicato da ASHRAE che stabilisce gli intervalli di condizioni ambientali interne per ottenere un comfort termico accettabile per gli occupanti degli edifici. È stato pubblicato per la prima volta nel 1966 e dal 2004 è stato aggiornato ogni tre o sei anni. La versione più recente dello standard è stata pubblicata nel 2020.

27. UNI EN ISO 7726:2002- Ergonomia degli ambienti termici - Strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche. La presente norma è la versione ufficiale in lingua inglese della norma europea EN ISO 7726 (edizione luglio 2001). La norma specifica le caratteristiche minime degli strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche che caratterizzano un ambiente e specifica i metodi per la misurazione delle grandezze fisiche di questo ambiente.

28. "Una uova generazione di involucri ad alte prestazioni ha contribuito alla nascita di assemblaggi sofisticati che combinano la risposta ambientale in tempo reale, i materiali avanzati, l'automazione dinamica con microprocessori incorporati, sensori e attuatori wireless e tecniche di progettazione per la produzione". Velikov, K., & Thün, G. (2013). Responsive building envelopes: characteristics and evolving paradigms. Trubiano, F., Design and Construction of High Performance Homes, pp. 75-92. (cit. pag. 75).

29. L'obiettivo principale dell'azione COST TU1403 è quello di armonizzare, condividere e diffondere le conoscenze tecnologiche sulle facciate adattive a livello europeo. Ciò porterà a una maggiore condivisione delle conoscenze tra i centri di ricerca europei e tra questi centri e l'industria, lo sviluppo di nuovi concetti, tecnologie e nuove combinazioni di tecnologie esistenti per facciate adattive, nonché lo sviluppo di nuove conoscenze come strumenti di valutazione/progettazione efficaci metodi per facciate adattive. Questa azione si concentrerà sul coordinamento della ricerca attuale intrapresa attraverso programmi nazionali in tre aree scientifiche:
- Sviluppo di nuove tecnologie e concetti per facciate adattive;
- Metodi di caratterizzazione multidisciplinare di nuove tecnologie e concetti di facciata adattiva a livello di componenti;
- Metodi di valutazione a vita intera di una nuova facciata adattiva a livello di edificio e integrazione edificio/utente.
I risultati delle attività condotte dai vari gruppi di ricerca portano alla redazione di Report che, se sfruttati, hanno il potenziale per generare idee e concetti innovativi a un livello scientifico fondamentale, nonché per produrre nuovi prodotti e sistemi per facciate adattive.
Per ulteriori informazioni, consultare il sito: http://tu1403.eu/

30. Definizione di adattivo dall'Enciclopedia Italia Treccani digitale. Disponibile al seguente link: https://www.treccani.it/enciclopedia/adattativo_%28Dizionario-delle-Scienze-Fisiche%29/#:~:text=adattativo%20%5Bagg.,di%20adattarsi%20a%20certe%20condizioni.

31. In riconoscimento dell'importanza dell'uso dell'energia negli edifici, nel 1977 l'Agenzia internazionale per l'energia ha stabilito un accordo di attuazione sull'energia negli edifici e nelle comunità (EBC-precedentemente noto come EBCCS). La funzione di EBC è quella di intraprendere ricerche e fornire un focus internazionale per l'efficienza energetica degli edifici. La missione dell'IEA Energy in Buildings and Communities (IEA EBC) è sostenere l'accelerazione della trasformazione dell'ambiente costruito verso edifici e comunità più efficienti dal punto di vista energetico e sostenibili, attraverso lo sviluppo e la diffusione di conoscenze, tecnologie e processi e altri soluzioni attraverso la ricerca collaborativa internazionale e l'innovazione aperta.
Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://www.iea-ebc.org/

32. "L'involucro non è nulla senza i materiali che lo compongono, i materiali sono i confini e le loro proprietà aprono a soluzioni adattive, poiché tutti i materiali si adattano per essere in equilibrio con l'ambiente, sia a livello molecolare che attraverso un cambiamento di forma". Modin, H. (2014). Adaptive building envelopes. Civil and Environmental Engineering, Master's Thesis 2014:147

33. Nel mese di Giugno 2022 è stata pubblicata la bozza del documento "Materials 2030 Roadmap", creata dalle Piattaforme Tecnologiche Europee più rilevanti nel settore delle tecnologie dei materiali: EUMAT, SUSCHEM, MANUFUTURE and the Energy Materials Industrial Initiative (EMIRI). Gli autori testimoniano che l'Europa è leader globale nel settore dei materiali avanzati e dei relativi processi, che costituiscono il 20% della propria base industriale e formano la radice di quasi tutte le catene del valore, attraverso la trasformazione delle specifiche materie prime. La visione del Manifesto Materials 2030 è quella di consentire la duplice transizione verde e digitale dell'UE, ancorata a principi di buona progettazione combinati con sinergie tra materiali avanzati, circolarità, tecnologie digitali e industriali.
Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://materiali.sostenibilita.enea.it/news/materials-2030-roadmap

34. L'Industria 5.0 completa il paradigma esistente dell'Industria 4.0, mettendo in primo piano la ricerca e l'innovazione come motori per una transizione verso un'industria europea sostenibile, incentrata sull'uomo e resiliente. Sposta l'attenzione dal valore per gli azionisti a quello per gli stakeholder, con benefici per tutti gli interessati. L'industria 5.0 cerca di catturare il valore delle nuove tecnologie, assicurando una prosperità non limitata solo al lavoro e alla crescita, rispettando i limiti del pianeta e mettendo il benessere del lavoratore dell'industria al centro del processo di produzione. Nel definire il modello di sviluppo dell'Industria 5.0, la Commissione Europea ha individuato tre pilastri essenziali che guidano questa transizione:
- approccio human-centric: per l'Industria 5.0 la persona è al centro del processo di produzione. Un approccio che tutela i diritti dei lavoratori, la loro autonomia e dignità, che promuove talenti, diversità ed empowerment;
- approccio alla sostenibilità: attraverso l'utilizzo delle energie rinnovabili, obiettivi di abbattimento delle emissioni del 55% entro il 2030 e processi circolari di utilizzo delle risorse, uniti a riduzione degli sprechi e alla minimizzazione dell'impatto sull'ambiente;
- approccio alla resilienza: alla luce dell'esperienza della pandemia, risulta fondamentale per l'industria sapersi adattare ai cambiamenti climatici, geopolitici e a eventuali crisi affrontandole come una sfida. Un processo di adattamento reso possibile da tecnologie flessibili e adattabili.
European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Breque, M., De Nul, L., & Petridis, A. (2021). Industry 5.0: towards a sustainable, human-centric and resilient European industry, Publications Office, 2021.
Online avaible at: https://data.europa.eu/doi/10.2777/308407 Accessed: 15 novembre 2022

35. In architettura, i materiali intelligenti possono essere classificati in base alle loro azioni. Addington e Schodek (2005) hanno affermato che i materiali intelligenti possono essere classificati in base alle loro prestazioni come segue: (1) Cambiamento di proprietà: variazione fondamentale della risposta del materiale a specifiche motivazioni interne o esterne, come la termocromia (risposta al calore), la termotropia (risposta alla luce), la magnetoreologia (risposta all'elettricità) e la memoria di forma (risposta al calore). (2) Scambio di energia: le risposte possono essere controllate o potenziate dal punto di vista computazionale, come quella fotovoltaica (risposta al calore e alla luce), termoelettrica o stimolata dalla corrente elettrica sulla base di una differenza termica alle due estremità della superficie del materiale, piezoelettrica (risposta all'elettricità) per produrre una deformazione (deformazione), fotoluminescente all'energia delle radiazioni dello spettro ultravioletto (o all'energia elettrica per un elettroluminescente), e infine elettrostrittiva attraverso un campo magnetico che altera la distanza interatomica attraverso la polarizzazione, producendo energia elastica - deformazione. Saidam, M. W., Al-Obaidi, K. M., Hussein, H., & Ismail, M. A. (2017). The application of smart materials in building facades. Ecology, Environment and Conservation, 23 (Nov. Suppl. Issue), S8-11. ISSN 0971–765X

36. Sono stati dimostrati due approcci per fabbricare ibridi a memoria di forma reattivi all'acqua. Nel primo approccio, la forma temporanea è stata ottenuta mediante la ricristallizzazione del materiale di inclusione all'interno della matrice porosa deformata. Nel secondo approccio, la forma temporanea è stata ottenuta riscaldando l'ibrido alla temperatura di fusione dell'inclusione, deformando l'ibrido e poi deformare l'ibrido e poi raffreddarlo di nuovo a temperatura ambiente. Fan, K., Huang, W. M., Wang, C. C., Ding, Z., Zhao, Y., Purnawali, H., ... & Zheng, L. X. (2011). Water-responsive shape memory hybrid: design concept and demonstration. Express Polymer Letters, 5(5). DOI: 10.3144/expresspolymlett.2011.40

References

AAVV, (2022). *Materials 2030 Roadmap, Draft, June 2022*. Online avaible at: https://materiali.sostenibilita.enea.it/news/materials-2030-roadmap Accessed: 15 novembre 2022 Cit. pag. 8.

Buanne, M. (2015). New materials for smart envelope. Tema: Technology, Engineering, Materials and Architecture, 1(1), pp. 178-183. Cit. pag. 181.

Del Grosso, A. E., & Basso, P. (2010). Adaptive building skin structures. *Smart Materials and Structures*, 19(12), 124011. (12pp.) DOI:10.1088/0964-1726/19/12/124011 Cit. pag. 1.

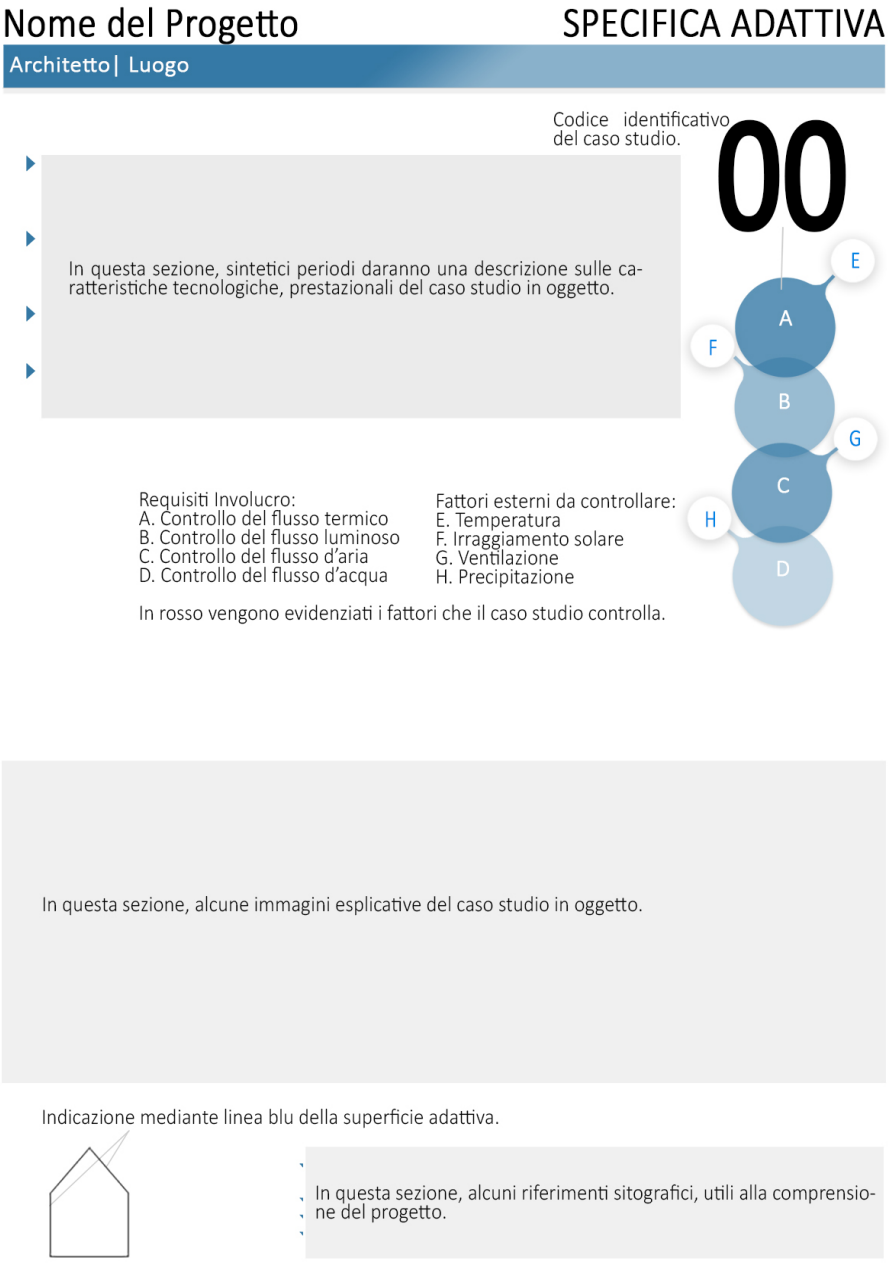
Di Salvo, S. (2016). Smart Materials in Architecture. In *International Journal of Engineering Research in Africa*, Vol. 23, pp. 72-79. Trans Tech Publications Ltd. DOI: 10.4028/www.scientific.net/JERA.23.72. Cit. pag. 72.

Modin, H. (2014). Adaptive building envelopes. Civil and Environmental Engineering, Master's Thesis 2014:147. Cit. pag. 21.

Velikov, K., & Thün, G. (2013). Responsive building envelopes: characteristics and evolving paradigms. *Trubiano, F., Design and Construction of High Performance Homes*, pp. 75-92. Cit. pag. 75.

Allegato2

L'allegato 2 presenta esempi di involucri edilizi caratterizzati da tecnologie in grado di modificare il comportamento rispetto a sollecitazioni esterne e gestire le proprie funzionalità mantendendo le stesse proprietà funzionali o adattandole a determinati stress ambiantali.Gli esempi di involucro edilizio riportati fanno riferimento ai termini della discussione riportati nel paragrafo 4.2 del presente capitolo: smart, intelligente, interattivo, responsivo, adattivo e dinamico. Gli esempi sono stati classificati in base alla loro capacità di gestire il controllo del flusso termico, luminoso, del flusso d'aria e d'acqua, requisiti che sono stati messi in evidenza dalla fase precedente relativa allo studio degli impatti del cambiamento climatico sugli involucri edilizi e viceversa.
Si riporta la scheda tipo come esemplificazione della lettura del reportorio sugli involucri edilizi analizzati.



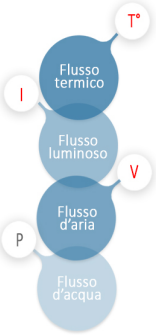
SOLAR XXI

SMART

Pedro Cabrita, Isabel Diniz| Lisbona

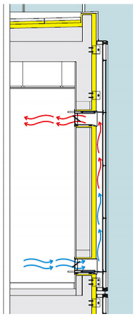
01

- La facciata principale dell'edificio Solar XXI (orientata a sud) è coperta da finestre e moduli fotovoltaici di proporzioni equivalenti. Questa ampia superficie vetrata (circa il 46% della facciata sud e il 12% della superficie del pavimento condizionata dell'edificio) interagisce direttamente con i locali uffici permanentemente occupati, raccogliendo l'energia solare diretta, fornendo calore e luce naturale a questi spazi. L'aumento dei guadagni di calore solare nel periodo invernale è stata una delle strategie dominanti nella progettazione degli edifici, adottando caratteristiche essenziali come la posizione, le dimensioni e l'orientamento (a sud) dell'area vetrata principale.
- La ventilazione naturale è fornita grazie al vento trasversale e all'effetto camino tramite le aperture nella facciata e nel livello del tetto. Le aperture della facciata insieme alle prese d'aria regolabili su tutte le porte delle stanze degli uffici forniscono la ventilazione trasversale, consentendo all'aria di fluire dall'interno all'esterno e viceversa.









Riferimenti sitografici
- https://www.buildup.eu/en/practices/cases/solar-xxi-portuguese-office-building-towards-net-zero-energy-building
- https://core.ac.uk/download/pdf/70658683.pdf
- https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/solar-xxi-a-portuguese-office-building-towards-net-zero-energy-building

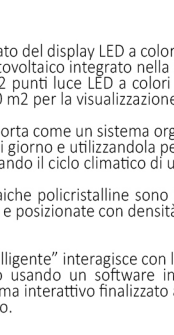
King Fahad National Library

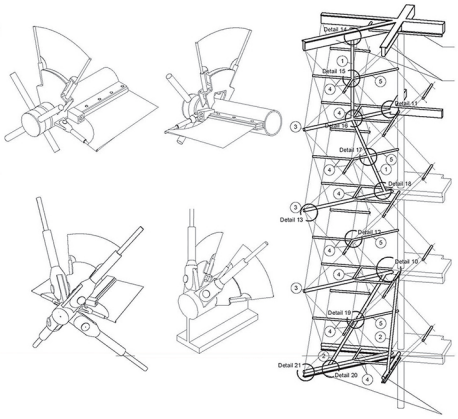
INTELLIGENTE

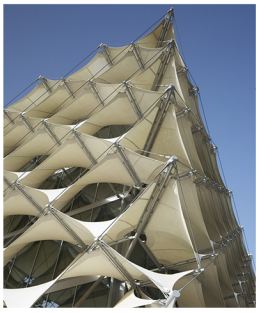
Gerber Architekten| Riyadh

02

- L'elemento chiave della facciata è un rivestimento composto da tende tessili romboidali, sostenute da una struttura in cavo d'acciaio tridimensionale tensile, fungendo da frangisole e interpretando in chiave moderna e tecnologica la tradizione delle tende arabe.
- Questa struttura in filigrana di cavi d'acciaio ha un livello di penetrazione solare di solo il 7% e allo stesso tempo permette di guardare sia dentro che fuori. Con temperature esterne fino a 50 ° C, la facciata a membrana, ottimizzata in relazione al percorso solare locale mediante una complessa rifrazione della luce tridimensionale, combina la necessaria protezione dal sole con la massima penetrazione e trasparenza della luce.
- Questa facciata è stata inoltre combinata con la ventilazione e il raffreddamento dell'edificio mediante ventilazione a strati e raffreddamento a pavimento. In questo modo, il comfort termico viene aumentato e il consumo energetico ridotto in modo significativo utilizzando per la prima volta nel mondo arabo determinati metodi e tecnologie.







Riferimenti sitografici
- https://www.archdaily.com/469088/king-fahad-national-library-gerber-architekten
- https://www.world-architects.com/en/gerber-architekten-dortmund/project/king-fahad-national-library
- https://www.gerberarchitekten.de/en/project/king-fahad-national-library/
- https://archnet.org/sites/15151

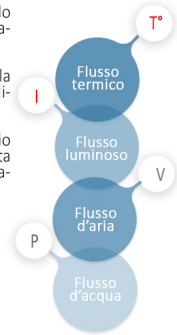
GreenPix- Zero Energy Media Wall

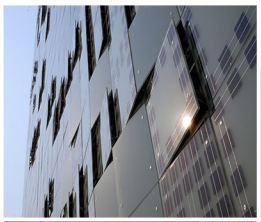
INTERATTIVO

Simone Giostra & Partners Architects| Pechino

03

- L'involucro è dotato del display LED a colori più grande del mondo, alimentato da un sistema fotovoltaico integrato nella facciata continua in vetro. Il display comprende 2.292 punti luce LED a colori (RGB) paragonabili a uno schermo monitor da 2.200 m2 per la visualizzazione dinamica dei contenuti.
- L'edificio si comporta come un sistema organico autosufficiente, raccogliendo l'energia solare di giorno e utilizzandola per illuminare lo schermo dopo il tramonto, rispecchiando il ciclo climatico di una giornata.
- Le celle fotovoltaiche policristalline sono laminate all'interno del vetro della facciata continua e posizionate con densità variabile sulla pelle dell'intero edificio.
- La sua "pelle intelligente" interagisce con l'interno dell'edificio e con lo spazio pubblico esterno usando un software integrato, che trasforma la facciata stessa in un sistema interattivo finalizzato all'intrattenimento e alla partecipazione del pubblico.

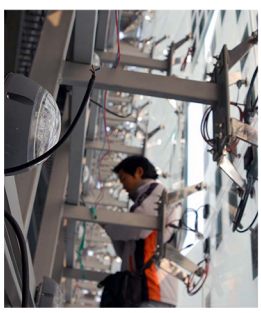












Riferimenti sitografici
- https://www.archilovers.com/projects/7673/greenpix-zero-energy-media-wall.html
- https://www.mediaarchitecture.org/greenpix-zero-energy-media-wall-beijing/
- https://www.arup.com/projects/greenpix-zero-energy-media-wall
- https://www.archdaily.com/245/greenpix-zero-energy-media-wall

Al Bahar Towers

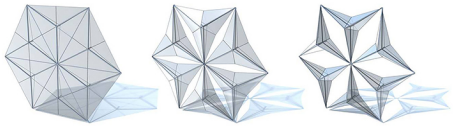
Aedas| Abu Dhabi

RESPONSIVO

04

- La facciata reattiva che prende spunti culturali dalla "mashrabiya", caratterizzata da una serie di inserti esagonali in PTFE (politetrafluoroetilene), è in grado di adattare il suo funzionamento in risposta all'esposizione al sole e al cambiamento degli angoli di incidenza durante i diversi giorni dell'anno.
- Lo schermo si presenta come una facciata continua, posto a due metri dall'esterno degli edifici su un telaio indipendente. Ogni triangolo è rivestito in fibra di vetro e programmato per rispondere al movimento del sole come un modo per ridurre il guadagno solare e l'abbagliamento. La sera tutti gli schermi si chiuderanno.
- Ogni dispositivo ombreggiante oltre a ridurre significativamente gli apporti solari riduce anche il bisogno di inserire vetri fortemente oscurati, diminuendo così la necessità di luce artificiale e permettendo agli occupanti dell'edificio migliori visuali sul paesaggio circostante. Si tratta del primo esempio di una facciata dinamica di questo tipo realizzata su ampia scala, che permette una riduzione degli apporti solari di più del 50%. E' controllata dal Building Management System, realizzando così un sistema di facciata intelligente.
- Premio per l'innovazione 2012 dal Council of Tall Buildings and Urban Habitat.









Riferimenti sitografici

- https://www.infobuildenergia.it/progetti/al-bahar-towers-le-torri-di-abu-dhabi-con-facciata-solare-intelligente/
- https://www.e-architect.co.uk/dubai/al-bahar-towers-abu-dhabi
- https://www.theplan.it/architettura/al-bahr-towers-it
- https://www.archdaily.com/270592/al-bahar-towers-responsive-facade-aedas

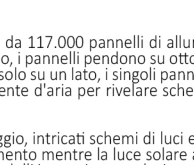
SDU Campus Kolding

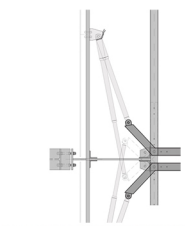
Henning Larsen Architects| Kolding

ADATTIVO

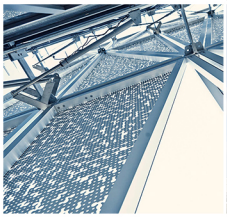
05

- Il Campus è dotato di schermatura solare adattiva, che si adatta alle condizioni climatiche specifiche e ai modelli degli utenti e fornisce una luce diurna ottimale e un clima interno confortevole lungo la facciata.
- L'impianto di schermatura solare è composto da ca. 1.600 persiane triangolari di acciaio perforato. Sono montati sulla facciata in un modo che consente loro di adattarsi alla luce diurna mutevole e all'afflusso di luce desiderato. Quando le persiane sono chiuse, sono piatte lungo la facciata, mentre sporgono dalla facciata quando sono semiaperte o completamente aperte e conferiscono all'edificio un aspetto molto espressivo.
- L'impianto di schermatura solare è dotato di sensori che misurano continuamente i livelli di luce e calore e regolano meccanicamente le tapparelle tramite un piccolo motore.
- Gli obiettivi energetici raggiunti dalla struttura (13.700 metri quadrati) derivano anche dal sistema di ventilazione meccanico integrato nella superficie del soffitto, dall'impianto di illuminazione a Led, dal sistema fotovoltaico sul tetto e dal grande lucernario.













Riferimenti sitografici

- https://www.floornature.it/henning-larsen-architects-inaugura-il-kolding-campus-in-danimarca-10258/
- https://www.archilovers.com/projects/16806/kolding-campus-university-of-southern-denmark.html#info
- https://www.arch2o.com/sdu-campus-kolding-henning-larsen-architects/
- http://www.sustainablemediterraneanconstruction.eu/SMC/The_Magazine_n.8_files/Smc%20N.8_pap_07.pdf

Brisbane Airport Carpark

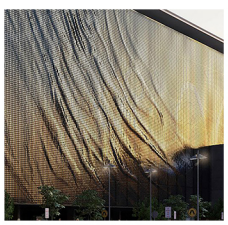
Ned Kahn, UAP| Brisbane

DINAMICO

06

- La facciata è ricoperta da 117.000 pannelli di alluminio sospesi. Fissati a una sottostruttura in acciaio, i pannelli pendono su otto piani e coprono un'area di 5000 mq. Incernierati solo su un lato, i singoli pannelli sono incoraggiati a spostarsi in base alla corrente d'aria per rivelare schemi complessi di turbolenza del vento.
- All'interno del parcheggio, intricati schemi di luci e ombre verranno proiettati sulle pareti e sul pavimento mentre la luce solare attraversa la facciata cinetica. Oltre a rivelare i modelli in continua evoluzione del vento, l'opera d'arte ha molti vantaggi ambientali essendo progettata per fornire anche ventilazione e ombra per l'interno del parcheggio.





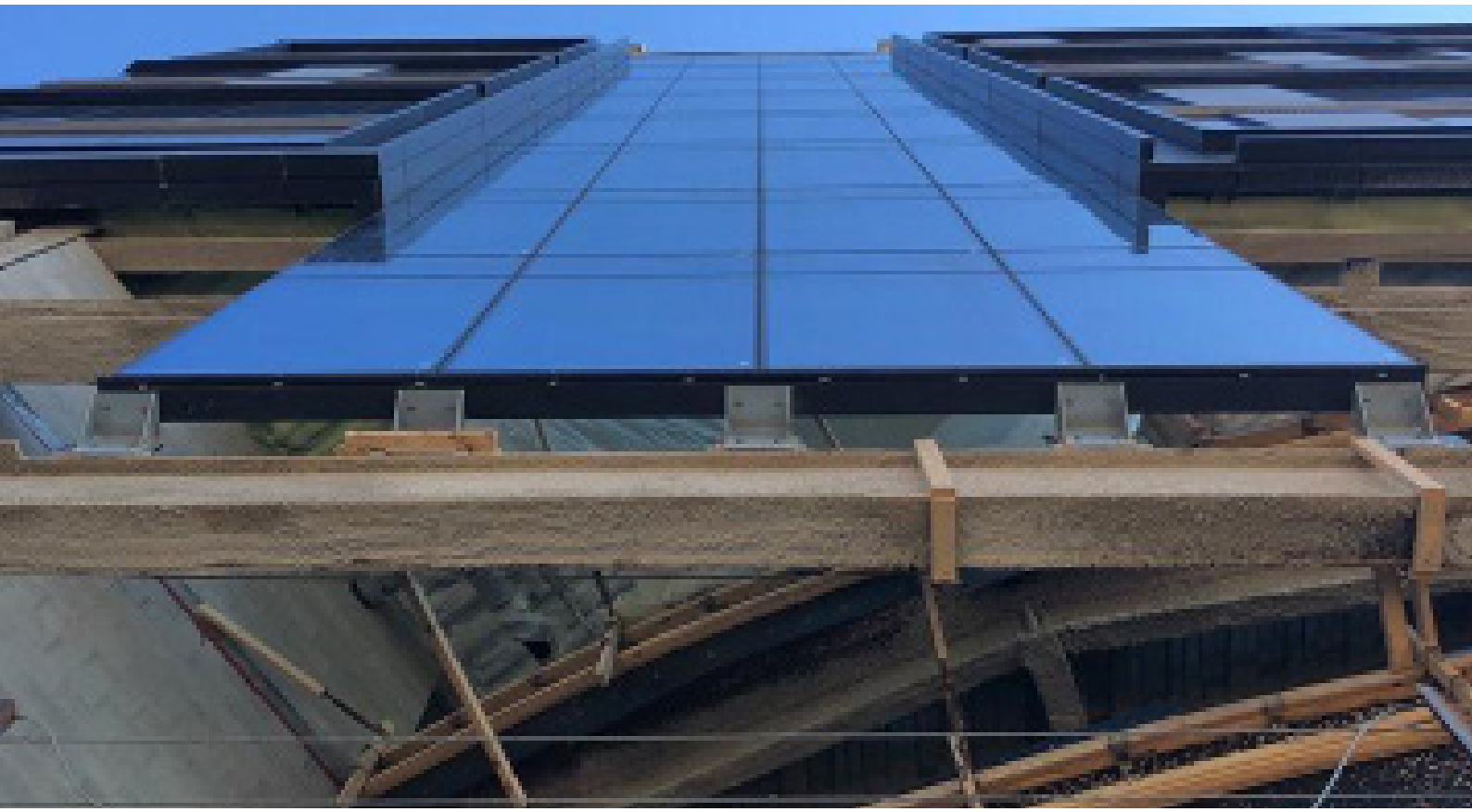






Riferimenti sitografici

- https://www.designboom.com/art/brisbane-airport-kinetic-parking-garage-facade-by-ned-kahn-uap/
- https://www.archdaily.com/69219/uap-ned-kahn-to-create-kinetic-artwork-for-brisbane-airport
- https://www.mark-magazine.com/news/brisbane-airport-kinetic-parking-garage-facade-by-ned-kahn-and-uap



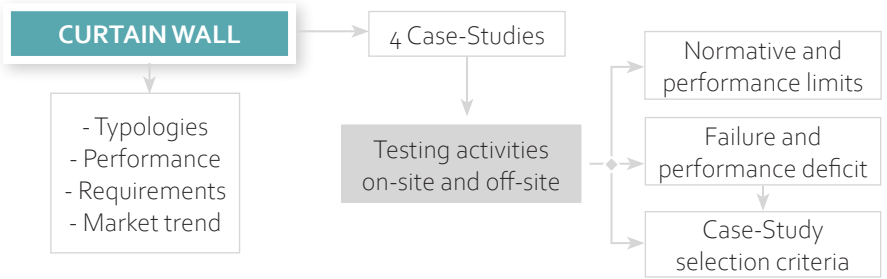
Capitolo 5

Il tema specifico
Le facciate continue e il criterio di scelta del caso studio

Abstract

The fifth chapter provides a critical review of curtain wall systems. The choice of analyzing curtain wall systems stems from the fact that they are highly vulnerable to the extreme effect of climate change events, such as increased temperature, precipitation, and wind. These factors affect the curtain wall causing possible performance degradation. The most frequent failures are found in air leakage and water infiltration, often caused by the degradation of the components that make up the curtain wall sealing system, such as joints, sealants, and gaskets.
The failures identification has led to the construction of a classification of curtain wall degradations to assist designers and maintenance operators in identifying the cause of the damage and the relevant remedial actions. The analysis shows that there are few studies in the literature on the 'long-term' performance of curtain walls, representing an area of great interest and a crucial issue for stakeholders involved in the design and production process, especially if performance is linked to a changing climate.
To structure a scenario on the measurability of curtain wall performance, testing conducted according to European and American standards on curtain wall systems (unitized and stick system) has led to the construction of a critical repertoire on curtain wall performance. From the testing activities, it emerges that water infiltration is one of the most recurrent problems of curtain wall systems. This analysis emphasizes the need to implement additional tests to the standard procedures to verify the performance under operating conditions of curtain wall systems under changing climatic conditions, specifically for extreme temperatures, heavy rainfall and intensified wind loads.

Key-words
curtain wall, market trend, performance requirements, mock-up, testing activities, failures classification



Capitolo 5: Thematic Flow-Chart - Dalla Fase Analitica (diretta) alla Fase Propositiva

Introduzione

"From a technical viewpoint the facades is one of the most complex building parts.
It must withstand environmental impact, while separating
the interior and exterior climates creates numerous building physical issues.
But the facade is also significant from an architectural standpoint. [...]
At the same time, it determines the relationship of interior and exterior space and user comfort level."[1]
[Klein, 2013, pp. 24-25]

In questo capitolo, l'elemento di analisi critica è il *curtain wall*, o facciata continua, che rappresenta un'evoluzione a livello tecnologico e prestazionale delle chiusure verticali del sistema dell'involucro edilizio, oggi costituito da sistemi sempre più leggeri e trasparenti.
La scelta di analizzare i sistemi di facciata continua deriva dal fatto che queste sono altamente vulnerabili agli effetti derivanti da eventi estremi del cambiamento climatico, come l'aumento della temperatura, delle precipitazioni e del vento e di conseguenza più sollecitata dai flussi energetici esterni. Questi fattori climatici investono la facciata continua e sono la causa di un possibile decadimento prestazionale.
Si mette in evidenza, la necessità di tenere in considerazione le esperienze progettuali maturate in campo internazionale, per prevedere l'adeguata progettazione delle facciate continue anche nel nostro contesto climatico-ambientale.
Tuttavia, nella letteratura scientifica vengono identificate alcune problematiche relative alla qualità ambientale che oggi orienta la ricerca sperimentale su nuovi requisiti delle facciate continue, soprattutto per quelli relativi al benessere termico e luminoso, visto l'utilizzo del materiale trasparente, quale il vetro. Ad esempio, diventa importante studiare analiticamente il comportamento della facciata continua rispetto alla temperatura superficiale e alla temperatura media radiante per comprendere come la superficie funzioni a temperature sempre più elevate e come le caratteristiche tecniche del vetro possano contribuire ad amplificare un effetto o rispondere positivamente ad una sollecitazione esterna, garantendo la qualità delle prestazioni e il comfort degli spazi interni.
Per queste ragioni, si richiedono anche nuove tecnologie di valutazione nell'analisi prestazionale del sistema involucro che considerino tutti i criteri necessari alla qualità ambientale. Allo stesso tempo, si rileva la necessità di definire e sviluppare una sequenza di azioni iterative per definire le caratteristiche e le prestazioni minime che gli involucri, ed in particolare le superfici trasparenti, debbano garantire per assicurare il loro funzionamento anche a seguito di eventi sempre più violenti e repentini.
Se nel capitolo precedente, si era fatto un accenno al termine di facciata, in questo contesto, si descrivono brevemente i requisiti, le caratteristiche prestazionali e tecnologiche – attraverso la normativa tecnica di riferimento – delle facciate continue di tipologia montanti e traversi e a cellula, che rappresentano i sistemi più diffusi anche per la progettazione degli edifici a grande altezza. Da evidenziare come la combinazione di fattori come, ad esempio, la tecnologia, i materiali e le finiture impiegate, le prestazioni, la dimensione e l'ubicazione del progetto, rendono la progettazione di facciate continue un compito complesso.
In questo sintetico scenario, le attività di analisi hanno come oggetto le facciate di involucro trasparente di aziende leader nel settore per comprendere le performance tecnologiche e prestazionali ed individuare i possibili deficit che possono compromettere il funzionamento complessivo dell'involucro. In aggiunta, in assenza di un decreto nazionale che esprima i requisiti per la progettazione di facciate continue, la costruzione di un quadro ragionato e critico sulle tipologie e degradi delle facciate continue vuole essere strumento sistematico nella selezione di tecnologie in grado di evitare importanti perdite in termini di proprietà - termiche, di permeabilità all'aria, di tenuta all'acqua - che in termini di sicurezza (utile non solo ai progettisti ma anche ai produttori).
Altri problemi di facciata comuni e significativi sono fessurazione, permeabilità all'aria, inadeguatezza e difetti dei sigillanti, corrosione.

Questi derivano spesso dal fatto che, nella fase di progettazione dei sistemi di facciata continua si scelgono assetti tecnologici e materici che non prendono in considerazione (ad esempio) delle dinamiche di pressurizzazione, che però i test, presso laboratori specializzati, misurano e validano. Progettare i sistemi di facciata continua significa considerare lo svolgimento di test rigorosi che non possono essere riferiti a condizioni di minima ma di massima sollecitazione, soprattutto in questa era di eventi climatici estremi.
D'altro canto, all'atto della posa in opera, si assiste a un peggioramento delle prestazioni delle facciate continue rispetto a quanto atteso in sede di progetto ed anche nei confronti di quanto misurato durante i test di laboratorio. È infatti importante sottolineare che le procedure di posa in opera influenzano trasversalmente tutto il processo produttivo delle facciate continue, dal progetto all'installazione. In letteratura, ci sono studi molto limitati sulle prestazioni a lungo termine dei sistemi di facciate continue; esiti delle indagini e delle esperienze condotte, indicano che le infiltrazioni d'acqua sono il problema più significativo per questi edifici, incidendo negativamente sulle prestazioni complessive del sistema.

Al fine di strutturare uno scenario sulla misurabilità delle prestazioni delle facciate continue, si è costruito un repertorio critico su prove di testing condotte su sistemi di facciata continua, delle tipologie unitized e stick system.
Si vuole mettere in evidenza che i casi studio selezionati e analizzati (che costruiscono il repertorio critico) fanno riferimento alle attività di prova svolte in cantiere effettuate su facciate continue, durante il periodo di stage presso il laboratorio di certificazione per gli involucri edilizi IRCCOS srl - Istituto di Ricerca e Certificazione delle Costruzioni Sostenibili - a Cassano Magnago e alle attività di testing condotte presso la Sezione TCLab del Building Future Lab dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria. Le attività di prova sono state eseguite in conformità alle normative Europee e Americane per testare i requisiti prestazionali di porzioni, mock-up in scala 1:1, delle diverse tipologie di facciate continue.
Dal quadro analitico, si espone il criterio con cui è stato scelto il caso studio di facciata continua, su cui si orienteranno le attività di testing in regime simulato, attraverso lo sviluppo di un protocollo metodologico di prove che possano leggere, in modo dinamico, le prestazioni della facciata continua analizzata associando l'evento estremo di cambiamento climatico della Regione del Mediterraneo.

5.1 Discussione sugli aspetti tecnici-normativi della facciata continua

> "Today, the successful design of a curtain wall system requires
> extensive knowledge of materials and appropriate detailing;
> an accurate assessment of the building's anticipated environmental conditions (both interior and exterior);
> a comprehensive understanding of the required performance, and a clear strategy
> for the relationship of the curtain wall to the building structure."[2]
> [Murray, 2009, p. 67]

Le risultanze innovative riferite all'involucro edilizio non si limitano a raggiungere requisiti prestazionali ma si spingono *versus* la sua 'smaterializzazione'[3] attraverso sperimentazioni di carattere tecnologico e costruttivo che sostituiscono gli elementi opachi a favore di superfici trasparenti, alle quali viene demandato il controllo dei flussi termici e luminosi. L'affermarsi di nuovi materiali quali ghisa, acciaio e vetro [Mazzucchelli, & Anagni, 2021] e il loro impiego mediante nuove tecniche di costruzione, assemblaggio e posa in opera, rappresentano un punto di svolta nell'evoluzione del *curtain wall*[4], o facciata continua.
Fra i vari esempi, risulta fondamentale citare la *Lever House* di Skidmore, Owings e Merril a New York, l'*Alcoa Building* di Harrison e Abramovitz a Pittsburg e forse il più noto *Seagram Building* di Mies van der Rohe a New York [Fig. 5.1].
Basandosi quindi sul concetto della produzione in serie, il curtain wall, grazie a questi architetti e all'avanzare della tecnologia e delle capacità costruttive, si è evoluto nel corso

del tempo, diventando ufficialmente un sistema di primaria importanza per le prestazioni dell'edificio e simbolo delle potenzialità dell'architettura moderna e contemporanea.

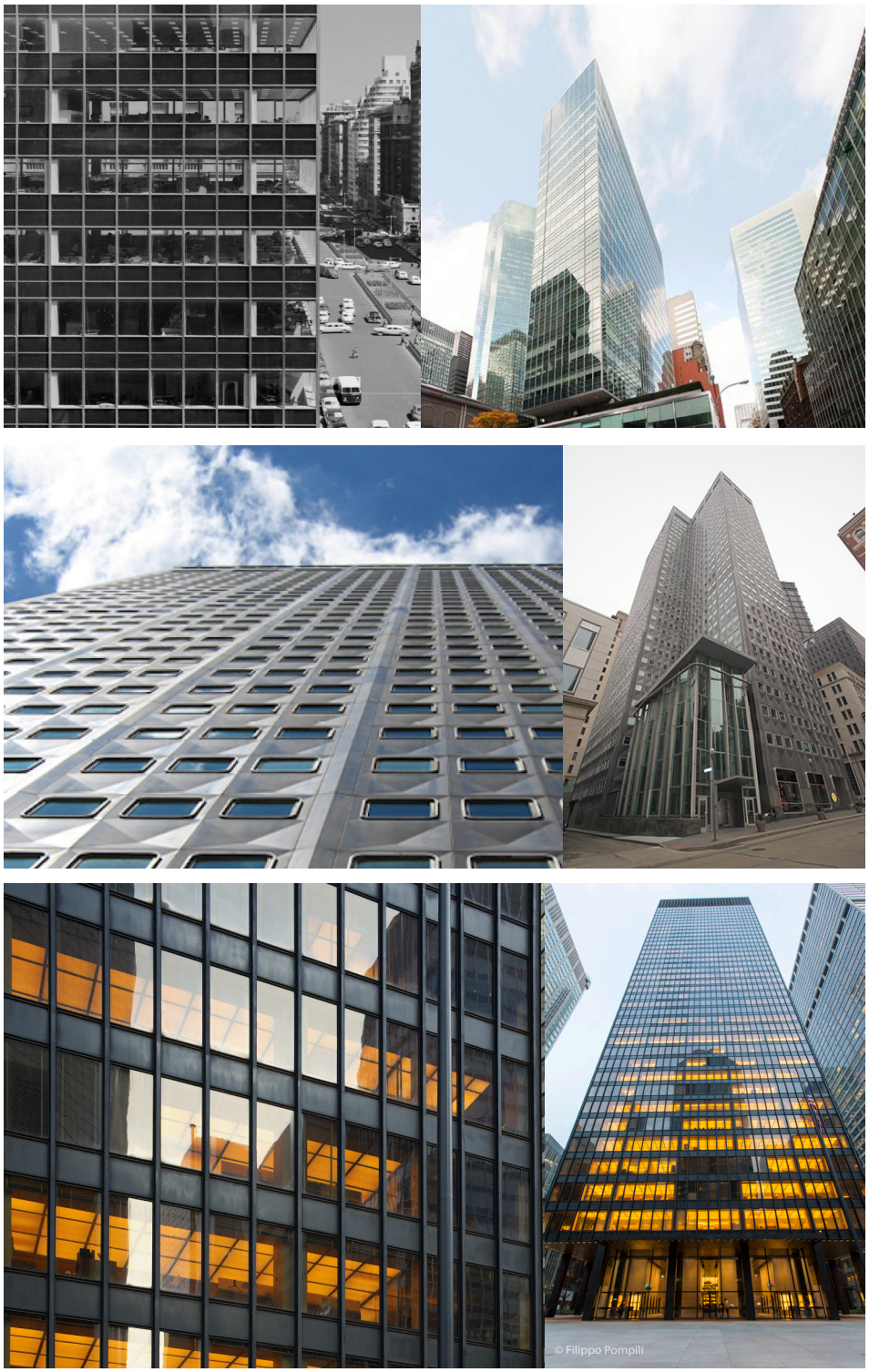


Fig. 5.1. Lever House, Alcoa Building, Seagram Building

A livello di normazione europea, l'ultima revisione della norma di prodotto EN 13830:2015+A1:2020: Curtain walling - Product standard[5], recentemente approvata dal CEN[6], riporta la definizione di curtain wall sulla base di quanto indicato nella norma EN 13119:2016: Curtain walling – Terminology[7]:

"Parte dell'involucro edilizio costituita da un'intelaiatura solitamente composta da profili orizzontali e verticali, collegati tra loro e ancorati alla struttura portante dell'edificio, e contenente tamponamenti fissi e/o apribili, che fornisce tutte le funzioni richieste di una parete interna o esterna o di una parte di essa, ma non contribuisce alla portanza o alla stabilità della struttura dell'edificio. La facciata continua è progettata come una costruzione autoportante che trasmette i carichi morti, i carichi imposti, il carico ambientale (vento, neve, ecc.) e il carico sismico alla struttura principale dell'edificio".

Pertanto, la facciata continua [Fig. 5.2] può essere concepita come un sistema di intelaiatura rigida secondaria (non portante), cioè come un assemblaggio coordinato di componenti progettati per funzionare in un modo specifico [Murray, 2009; Herzog, et al., 2017], consentendo una gamma più ampia di funzionalità e prestazioni [Martinez, et al, 2015].

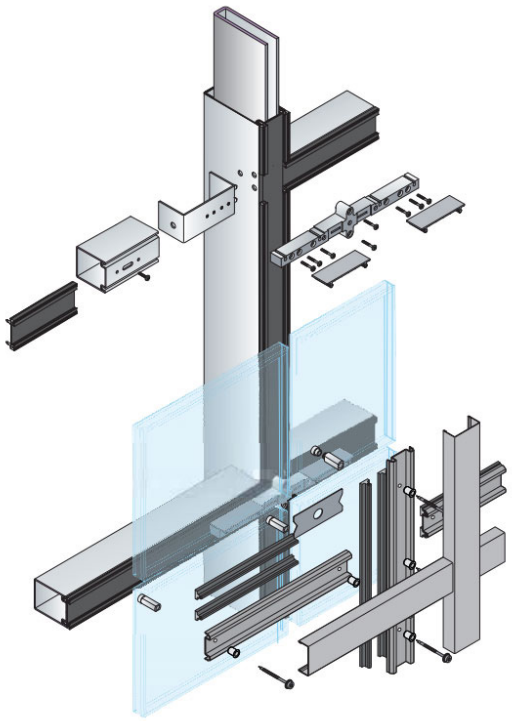


Fig. 5.2. Esempio di assemblaggio degli elementi di una facciata continua

La separazione dalla pelle[8] e dallo scheletro che comporta una nuova specializzazione a livello strutturale definisce i ruoli dei diversi componenti della facciata continua: il primo è quello di portare i carichi sia verticali che orizzontali mentre il secondo è quello di controllare l'ambiente all'interno dell'edificio, attraverso la capacità di regolare la radiazione solare e termica, aria, acqua, vento e fuoco [Fitch,1955].
I sistemi di facciata continua devono essere progettati in modo tale da tenere in consi-

derazione gli aspetti di: integrità strutturale, movimento (termico, sismico, differenziale), tenuta all'acqua, condensazione, isolamento termico e risparmio energetico. Altre considerazioni specifiche per il progetto riguardano la trasmissione e l'isolamento acustico, la resistenza ai detriti volanti (Cfr. Cap. 3) e la resistenza all'esplosione delle bombe.
Attraverso una lettura della normativa di settore, si intendono esplicitare i differenti requisiti prestazionali richiesti dalle specifiche di progetto e dalle condizioni di utilizzo e sicurezza dell'edificio da parte degli occupanti [Rossetti, 2019].
L'entrata in vigore della marcatura CE[9] per la maggior parte degli elementi dell'involucro vetrato (porte e finestre, facciate continue, vetri e sistemi oscuranti) ha, di fatto, introdotto la necessità di testare in laboratorio, oppure in situ, le prestazioni dei propri prodotti e di garantirle nel tempo. Questo processo di controllo ha lo scopo di limitare eventuali danni e rischi durante la vita utile delle facciate continue.
L'obiettivo è quello di fornire risultati sperimentali intesi come esiti reali del comportamento degli elementi che costituiscono la facciata continua, sulla base dei quali poter valutare il livello di affidabilità nel tempo delle condizioni di sicurezza per gli utenti.
Il controllo della qualità del prodotto finito rappresenta quindi un aspetto fondamentale di validazione e verifica delle prestazioni in modo da progettare in conformità alle normative di settore e agli obiettivi di progetto. La valutazione delle prestazioni delle facciate continue durante il processo di pre-costruzione ha un ruolo notevole al fine di prevenire condizioni indesiderate e problemi costosi durante la vita dell'edificio.

I requisiti previsti dalla norma di prodotto EN 13830:2015+A1:2020: Curtain walling - Product standard (che si applica a facciate continue che vanno dalla posizione verticale fino a ±15° dalla verticale) sono:
Reazione al fuoco, Resistenza al fuoco, Propagazione all'incendio, Resistenza al carico di vento, Resistenza al peso proprio (carico permanente), Resistenza all'urto, Resistenza ai carichi orizzontali accidentali.
Altri requisiti per cui non vi è l'obbligatorietà di valutazione della prestazione da parte di un Ente Notificato sono: Permeabilità all'aria, Tenuta all'acqua, Isolamento acustico, Trasmittanza termica, Permeabilità al vapore d'acqua.
Per facilitare la lettura dei requisiti prestazionali della facciata continua si è costruito un prospetto che classifica le prestazioni in base ai requisiti di comfort intesi come condizioni di servizio, sicurezza e energia [Fig. 5.3].

Requisiti delle facciate continue		
Comfort - Serviceability	Sicurezza - Safety	Energia - Energy performance
- Permeabilità all'aria - Tenuta all'acqua - Permeabilità al vapore acqueo - Trasmissione del suono	- Resistenza al carico da vento - Reazione al fuoco - Propagazione incendio - Resistenza al carico proprio - Resistenza ai carichi orizzontali - Resistenza all'urto - Resistenza ai carichi sismici	- Trasmittanza termica - Proprietà alle radiazioni - Resistenza agli shock termici

Fig. 5.3. Requisiti prestazionali delle facciate continue sulla base della norma di prodotto EN 13830:2015+A1:2020. Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

La norma EN 13830:2015+A1:2020 fornisce inoltre metodi di prova, valutazione, calcolo e i criteri di prestazione ad assicurare la conformità e specifica la sequenza di prove per la resistenza agli agenti atmosferici.

Di seguito, si riporta la sequenza di prove che deve essere considerata come un'unica e complessiva prova di resistenza agli agenti atmosferici:
- *permeabilità all'aria* per la classificazione (il metodo di prova viene specificato dalla norma UNI EN 12153 Curtain walling - Air permeability - Test method[10]);
- *tenuta all'acqua sotto pressione statica*, per la classificazione (il metodo di prova viene specificato dalla norma UNI EN 12155 Curtain walling – Watertighness - Laboratory test under static pressure[11]);
- *resistenza al carico del vento* (condizioni di esercizio; il metodo di prova viene specificato dalla norma UNI EN 12179 Curtain walling- Resistence to wind load – Test Method[12]);
- *ripetizione della permeabilità all'aria* per confermare la classificazione di resistenza al carico del vento;
- *ripetizione della tenuta all'acqua* per confermare la classificazione di resistenza al carico del vento;
- *resistenza al carico del vento* (condizioni di sicurezza).

Tuttavia, può essere richiesta un'ulteriore prova aggiuntiva per verificare la resistenza di tenuta all'acqua in regime di vento dinamico (il metodo di prova in laboratorio viene specificato dalla norma UNI EN 13050 Curtain Walling - Watertightness - Laboratory test under dynamic condition[13] of air pressure and water spray mentre per le prove in sito viene utilizzato il metodo di prova contenuto nella norma UNI EN 13051 Curtain Walling - Watertightness - Site test[14], che deve essere eseguita dopo la ripetizione della tenuta all'acqua in condizioni statiche.
L'integrità della facciata continua in caso di improvvise forze d'urto sulle superfici può essere determinata mediante le indicazioni contenute nella norma UNI EN 14019 Curtain Walling - Impact resistance - Performance requirements[15].
La prova della resistenza all'impatto (detta anche resistenza all'urto da corpo molle e pesante) è una verifica che tende a valutare la capacità della facciata continua di resistere, quando viene sottoposta a condizioni di carico dovuto all'urto.
Questa prova non rientra nella sequenza di prove, in quanto viene considerata prova eccezionale e quindi, può essere condotta separatamente rispetto le prove sopra indicate; le stesse condizioni valgono per caratterizzare le prestazioni della facciata continua a livello sismico.

Questa sequenza di prove trova riscontro nei metodi di prova sulla verifica dei requisiti prestazionali delle facciate continue proposti da AAMA[16] (American Architectural Manufacturers Association) e ASTM[17] (American Society for Testing and Materials International). Nello specifico:
- *permeabilità all'aria* per la classificazione (il metodo di prova viene specificato dalla norma ASTM E283-04[18]);
- *tenuta all'acqua sotto pressione statica*, per la classificazione (il metodo di prova viene specificato dalla norma ASTM E331[19]);
- *tenuta all'acqua sotto pressione dinamica*, per la classificazione il metodo di prova viene specificato dalla norma AAMA 501.1-05[20]);
- *resistenza al carico del vento* (carico di progetto; il metodo di prova viene specificato dalla norma ASTM E330[21]);
- *ripetizione della permeabilità all'aria* per confermare la classificazione di resistenza al carico del vento;
- *ripetizione della tenuta all'acqua* per confermare la classificazione di resistenza al carico del vento;
- *resistenza al carico del vento* (condizioni di sicurezza).

Un aspetto rilevante che si vuole mettere in evidenza, sia in ambito normativo europeo sia americano, riguarda la prova di resistenza al carico da vento che viene considerata come prova aggiuntiva e non come prova necessaria a validare le prestazioni dei sistemi di facciata continua, che come analizzato nel precedente capitolo (Cfr. Cap. 5), la sollecitazione estrema del vento può causare dei problemi a livello strutturale. Per questi motivi, è necessario un aggiornamento della normativa in materia, al fine di misurare le prestazioni *reali* dei sistemi di facciata continua, tenendo quindi in considerazione fenomeni climatici che diventeranno sempre più estremi.
Stessa considerazione vale per la verifica della facciata continua a stress termici, secondo la norma AAMA 501.05:2007 "*Test Method for Thermal Cycling of Exterior Walls*", che invece dovrebbe rientrare nella sequenza di prove visto che uno dei problemi rilevanti dovuto al cambiamento climatico è l'innalzamento della temperatura.
Conoscere quindi le prestazioni reali, in particolar modo per carico da vento e stress termico, diventa una prerogativa imprescindibile per sistemi di facciata continua sempre più complessi e che devono gestire il loro funzionamento adattivo in base a sollecitazioni esterne in continuo mutamento.

Un altro aspetto da sottolineare riguarda le prestazioni sismiche delle facciate.
Mentre la norma europea EN 13830:2015, prevede una prova sismica statica la più eseguita è la statunitense AAMA 501-6 "*Recommended dynamic test method for determining the seismic drift causing glass fallout from a wall system*"[22] che prevede una prova di tipo dinamico, il cosiddetto crescendo test. Il test prevede spostamenti applicati a velocità crescente e in funzione del tempo e la determinazione del valore minimo di sollecitazione (determinazione del drift di piano, ovvero lo spostamento relativo tra i due livelli dell'edificio a cui è vincolata la facciata) che causa la rottura e la fuoriuscita del vetro dal telaio.
Per uniformarsi alle leggi e agli obblighi presenti nei diversi Stati Membri, la revisione della norma EN EN 13830:2015+A1:2020 introduce una specifica sezione sulle modalità di valutazione sperimentale del comportamento sismico di elementi di chiusura esterni, cioè di elementi non portanti dell'edificio, ma che rivestono un significativo ruolo per quanto attiene il funzionamento prestazionale dell'edificio (condizioni di servizio) e la sicurezza delle persone (stato limite di danno e stato limite ultimo).
Oltre alla Resistenza al sisma (espressa come sicurezza nell'impiego e funzionamento) sono stati aggiunti rispetto alla precedente versione, nuovi annessi al fine di fornire principi di progettazione e verifica, metodi di test condivisi quali: *Resistenza al carico della neve* (per inclinazioni tra o e 60° rispetto all'orizzontale), *Trasmissione laterale del rumore*, *Proprietà radiative delle superfici trasparenti e traslucide* e *Durabilità*.

Come evidenziato nel precedente capitolo, il controllo del flusso termico è un importante requisito che caratterizza il livello prestazionale delle facciate. La componente energetica viene definita dal parametro della trasmittanza termica U, espressa in W/m^2K.
Per le facciate continue, la procedura di calcolo semplificato è definita dalla norma UNI EN ISO 12631:2018. Le variabili che influenzano il calcolo della trasmittanza termica di una chiusura trasparente sono: la tipologia di vetro, la tipologia di telaio e la tipologia di un eventuale distanziatore. Più basso è il valore di trasmittanza termica degli elementi che costituiscono la chiusura trasparente, minore sarà il flusso di calore che attraversa gli elementi stessi, che consente un utilizzo limitato degli impianti di riscaldamento e raffreddamento con il conseguente risparmio energetico.

La trasmittanza delle chiusure trasparenti Uw viene calcolata secondo quanto riportato nella UNI EN ISO 10077-1:2017[24], attraverao la formula: $$Uw = \frac{Ag\,Ug + Af\,Uf + lg\,\Psi g}{Af + Ag}$$
dove:

- *AW* è l'area del serramento o dimensione del vano finestra considerata esternamente, [m2];
- *Ag* è l'area del vetro, [m2];
- *Ug* è la trasmittanza termica del vetro, [W/(m2K)];
- *At* è l'area del serramento (telaio), [m2];
- *Ut* è la trasmittanza termica del telaio, [W/(m2K)];
- *lg* è il perimetro del vetro, [m];
- *ψg* è la trasmittanza termica lineare del distanziatore, [W/(mK)]. Il valore di trasmittanza termica lineare è riferito alla conduzione di calore supplementare che avviene a causa dell'interazione tra telaio, vetri e distanziatore dei vetri in funzione delle proprietà termiche di ognuno di questi componenti.

I valori della trasmittanza termica devono tenere in considerazione i valori soglia espressi dal Decreto interministeriale 26 giugno 2015 ai fini della riqualificazione energetica.
Tuttavia, al fine di attuare il Superbonus, sono stati pubblicati in Gazzetta Ufficiale (n. 246 del 5 ottobre 2020) i due decreti attuativi del MISE: il decreto requisiti Ecobonus e il Decreto Asseverazioni, che prescrive dei valori di trasmittanza leggermente più bassi [Fig. 5.4].

Zona Climatica	Trasmittanza termica Decreto 26/01/2010	Trasmittanza termica D.M. Requisiti minimi 26/06/2015 per edifici pubblici	Trasmittanza termica D.M. Requisiti minimi 26/06/2015 per edifici privati (non ancora in vigore)	Trasmittanza termica Decreto Prezzi 2020
A	3,7	3,2	3	2,6
B	2,4	3,2	3	2,6
C	2,1	2,4	2	1,75
D	2	2,1	1,8	1,67
E	1,8	1,9	1,4	1,3
F	1,6	1,7	1	1

Fig. 5.4. Valori soglia Trasmittanza termica

Sebbene non è lo scopo di questa trattazione analizzare nello specifico le diverse normative, la lettura in parallelo della normativa Europea e Americana vuole indicare una buona uniformità nella gestione del processo di validazione delle prestazioni delle facciate continue. Questo permette la progettazione con requisiti che possono essere esaustivi ed esportati sia nel contesto Europeo che in quello Americano.
Particolare importanza viene quindi data alle normative di settore, in costante aggiornamento e revisione in linea con le trasformazioni specifiche rappresentate dall'evoluzione tecnologica dei prodotti del settore delle costruzioni e con gli scenari delle Direttive Europee e internazionali sulle questioni ambientali ed energetiche che direttamente influenzano l'ambito prestazionale dell'involucro edilizio.
Ciò avvalora il fatto che le normative di riferimento non rappresentano uno stato dell'arte ben definito ma si rileva invece che il processo normativo è costituito da feedback e revisioni, dimostrando la sua continua evoluzione. In questo contesto, la tematica relativa alle procedure di prove su mock-up, in stretta relazione al processo di certificazione per l'immissione sul mercato Europeo dei prodotti, vuole mettere in evidenza il ruolo strategico dei laboratori di prova specializzati nella verifica delle prestazioni delle facciate continue e altri prodotti ed elementi per l'involucro edilizio come infissi, porte, lucernari.
Questi concetti saranno ripresi nel repertorio dei casi studio delle facciate continue sottoposte ad attività di prove sulla base delle procedure di prova europea e americana e, in

particolare, nel capitolo riferito alla sperimentazione del caso studio: una facciata continua della tipologia a cellula.

Questo approccio ad un'analisi in ambito normativo, seppur sintetico, rispecchia la base delle conoscenze di procedure di prova e per definire le condizioni al contorno per la fase applicativa e sperimentale della ricerca, in cui l'obiettivo di sviluppare un protocollo metodologico per la verifica delle prestazioni reali delle facciate continue, sottoposte ad eventi climatici estremi, presuppone un riferimento normato, solido e collaudato.

5.1.1 Sistemi di facciata continua: tipologie e componenti

"Glass curtain walls consist of two basic components: the glass and the frame.
How these two elements are manipulated, including
the proportion, properties, and anchorage of each,
constitutes the essential distinction among individual curtain wall systems."[25]
[Sanders, & Craig, 2012, p. 2]

L'American Architectural Manufacturers Association (AAMA) ha sviluppato un nuovo manuale - AAMA CWM-19 "Curtain Wall Manual" (in sostituzione a AAMA MCWM1-89, il "Metal Curtain Wall Manual") – che fornisce le linee guida per la progettazione del curtain wall, definita come "*una facciata continua esterna che può essere costituita interamente o principalmente da metallo, oppure può essere una combinazione di metallo, vetro e altri materiali di rivestimento sostenuti da o all'interno di una struttura metallica*"[26].

Il curtain wall viene distinto dal window wall (finestra muro), in quanto di solito, viene installata all'interno del bordo dei solai, mentre le facciate continue sono strutturalmente indipendenti e non richiedono supporto su ogni piano e, quindi non contribuiscono alla rigidità della struttura dell'edificio [CMHC, 2004]. Alla luce delle varie definizioni, per facciata continua si intende un sistema generalmente costituito da una griglia di supporto costituita in profili metallici come montanti e traversi e da pannelli di tamponamento di vetro o in altri materiali di rivestimento [Taywade, & Shejway, 2015].
Come espresso nel precedente paragrafo, i requisiti prestazionali della facciata continua sia in condizioni di servizio che di sicurezza sono: tenuta all'aria e all'acqua, adeguata luminosità degli ambienti interni, idonea risposta alle azioni dinamiche del vento, capacità di assecondare i movimenti dell'edificio dovuti sia alle variazioni termiche sia alle sollecitazioni del sisma [Rigone, 2011; Klein, 2013; Herzog, et al., 2017]. Le prestazioni delle facciate continue sono soggette a scelte di progettazione e lavorazione in cantiere e possono essere migliorate con pratiche di installazione adeguate [Cascone, 2016, Rossetti, 2019].

Pur ormai consolidate, sembra utile richiamare la tassonomia riconosciuta rispetto le tipologie di facciate continue, al fine di evidenziare aspetti ed elementi caratteristici.
Mantenendo come punto fermo la posizione esterna e il fissaggio agli elementi strutturali dell'edificio, si distinguono le note cinque tipologie di facciata continua:
1. *facciate a montanti e traversi* (stick system facade);
2. *facciate a cellule* (unitized system facade);
3. *facciate a fissaggio puntuale* (point fixed facade);
4. *facciate strutturali* (structural facade);
5. *facciate a doppia pelle* (double skin facade).

Per ogni tipologia vengono esplicitate, in sintesi, le caratteristiche tecnologiche che contraddistinguono gli elementi che costituiscono i vari sistemi di facciata continua e le tecniche di posa in opera e installazione.

Tipologie

Le *facciate a montanti a traversi* [Fig. 5.5] sono costituite da un'intelaiatura costituita da elementi verticali *mullion* e elementi orizzontali *transom*.
Questi sono normalmente profili di alluminio estruso, protetti da anodizzazione o verniciatura a polvere, ma possono anche essere in acciaio laminato a freddo (per una maggiore resistenza al fuoco) o in alluminio rivestito in PVC-U.
I componenti vengono tagliati e lavorati in fabbrica prima di essere assemblati in cantiere come un kit di parti: prima vengono montati i montanti verticali che vengono fissati al solaio (servono a reggere il carico strutturale della facciata con tutti i suoi elementi, scaricandolo sulla struttura), e poi i traversi orizzontali, che vengono fissati tra i montanti. I traversi consentono il posizionamento dei pannelli in vetro. Montanti e traversi hanno di solito sezione scatolare e sono dotati di appendici che consentono l'inserimento dei vetri che vengono bloccati meccanicamente da pressori che accolgono anche le guarnizioni di tenuta.

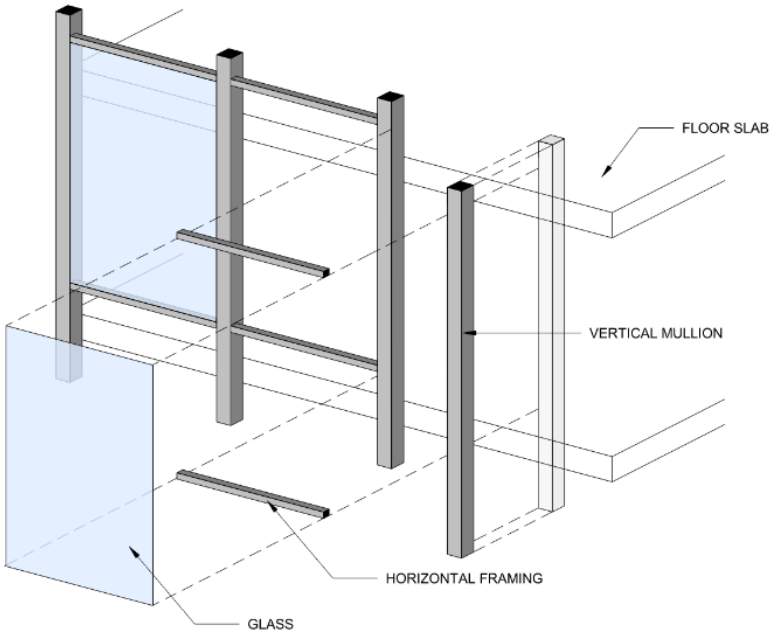


Fig. 5.5. Facciata continua a montanti e traversi

Le *facciate a cellule* [Fig. 5.6] si configurano come un sistema in cui gli elementi-base vengono pre-assemblati in moduli o cellule in condizioni controllate in officina, trasportati in cantiere completi di pannello opaco (spandrel) e trasparente (vision) e posti in opera.
Gli elementi presentano un'altezza pari all'interpiano dell'edificio e vengono ancorati mediante staffe di collegamento, in modo analogo al sistema a montanti e traversi. Il fissaggio delle parti vetrate può essere meccanico, con pressori avvitati ai telai, oppure effettuato attraverso l'impiego di siliconi strutturali. In cantiere tutte le operazioni di installazione avvengono dall'interno dell'edificio, senza la necessità di un ponteggio esterno.
Tuttavia, l'assemblaggio deve essere eseguito in una sequenza specifica per garantire il giusto posizionamento e il corretto incastro tra le singole cellule. Rispetto al sistema di facciata a montanti e traversi, riduce i costi di manodopera e, quindi, i tempi di installazione in cantiere. Attenzione particolare viene data alle operazioni di sistemazione delle guarnizioni e delle sigillature per assicurare una tenuta agli agenti atmosferici.

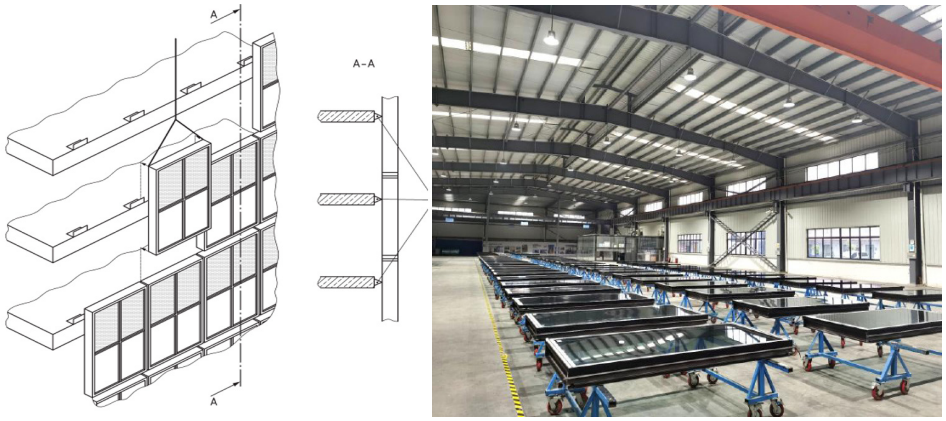


Fig. 5.6. Facciata a cellula

Le *facciate a fissaggio puntuale* sono costituite da lastre di vetro che sono connesse alla struttura portante mediante dispositivi d'ancoraggio meccanico, fissati in prossimità degli angoli. La struttura portante può essere realizzata in acciaio zincato verniciato o in alluminio estruso a seconda dell'esigenze statiche ed estetiche del progetto.
Gli elementi puntuali [Fig. 5.7] hanno il compito di sostenere ogni singolo vetro e di assorbirne le spinte dinamiche. I moduli vetrati di tamponamento della facciata vengono solitamente sigillati con materiali siliconici strutturali.
Un aspetto determinante è la scelta del vetro: per questa tipologia si predilige quello temperato per evitare di innescare la rottura delle lastre e impedire ulteriori deformazioni, quando si praticano i fori per alloggiare i bulloni. Esistono anche sistemi realizzati da un supporto ed un pressore esterno, entrambi in alluminio e collegati da una vite che, tramite la combinazione con elementi sferici, genera uno snodo sferico senza forare le lastre. L'installazione avviene in cantiere ed è facilitata dal fatto che per questa tipologia di facciata, non sono presenti gli elementi orizzontali, i traversi, minimizzando i tempi di posa in opera.

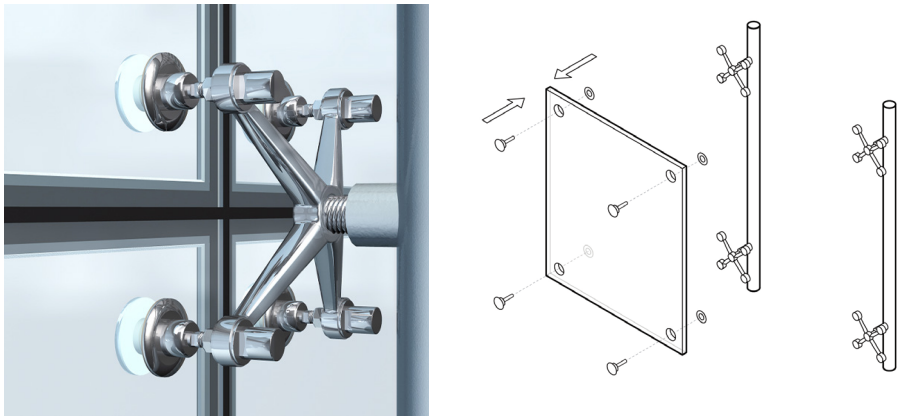


Fig. 5.7. Elementi puntuali della Facciata a fissaggio puntuale

Le *facciate strutturali* [Fig. 5.8] sono un sistema costituito da elementi vetrati, apribili o fissi, in cui il vetro è collegato al telaio retrostante attraverso collanti (silicone strutturale) che trasmettono tutti i carichi al telaio stesso. Esistono sistemi che adottano, oltre agli adesivi siliconici, elementi meccanici (non visibili dall'esterno) per assicurare le lastre alla struttura. Questo permette una distribuzione omogenea dei carichi lungo il perimetro del vetro, evi-

tando l'effetto di azioni localizzate. Una volta terminata l'operazione in officina, gli elementi vengono posti in opera fissando i telai, mediante appositi accessori, al reticolo di montanti e traversi già precedentemente connesso alla struttura portante dell'edificio.
In alternativa, telai e vetri possono essere prodotti come cellule e applicati direttamente al corpo di fabbrica, senza l'interposizione di un'ulteriore sottostruttura metallica. In questa tipologia di facciata, si richiedono alte caratteristiche performanti dei siliconi strutturali che oltre al ruolo di tenuta agli agenti atmosferici, devono garantire la capacità di sostenere il peso delle lastre di vetro.

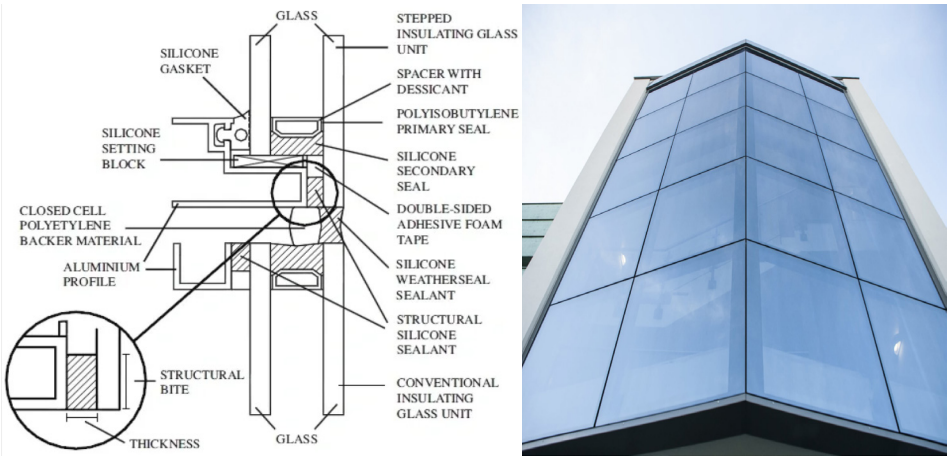


Fig. 5.8. Facciata strutturale

Le *facciate a doppia pelle* [Fig. 5.9] sono costituite da un involucro realizzato con due pareti trasparenti parallele che generano una intercapedine d'aria. All'interno dell'intercapedine il riscaldamento dell'aria provocato dall'effetto-serra genera dei flussi che vengono convogliati verso l'esterno oppure verso l'interno dell'edificio: il calore accumulato può essere così utilizzato per riscaldare l'edificio nella stagione fredda o espulso in quella estiva.
La pelle interna è di norma realizzata mediante la tecnologia a montanti e traversi mentre quella esterna può essere realizzata con varie soluzioni, come a telai, a montanti e traversi o a fissaggio puntuale. Le specifiche relative all'installazione dipendono dalla tipologia delle due pelli che vanno a costituire l'intero sistema di facciata.

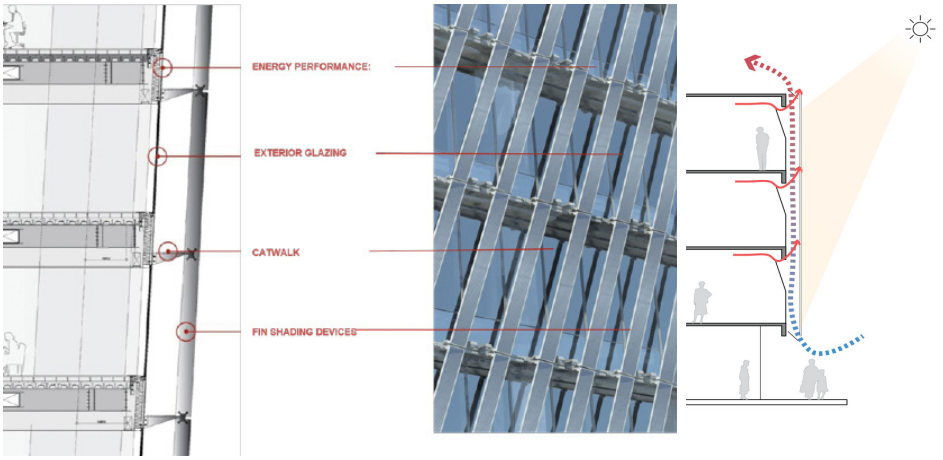


Fig. 5.9. Facciata doppia pelle

L'inquadramento dello stato dell'arte sulle facciate continue non vuole essere fine a se stesso, in quanto si riconosce che le varie definizioni delle facciate continue sono assodate, note e ben condivise dalla letteratura di settore, dalla produzione industriale e dal mercato di riferimento.
Per questa reagione, lo scopo è inquadrare le tipologie di facciate continue al fine di evidenziare le problematiche più frequenti rispetto a limiti e deficit prestazionali delle stesse, che possono essere causate non solo da agenti atmosferici, ma anche dall'intensificarsi degli eventi di cambiamento climatico, che rappresenta uno dei focus principali della ricerca.
Da quanto riportato sopra, è utile sottolineare che sebbene le tipologie di facciate differiscono dagli elementi che le compongono, il concetto tecnologico che sta alla base delle differenti tipologie è una struttura 'leggera' con un alto livello di trasparenza dettato delle caratteristiche tecniche del vetro.
Come sostenuto da Knaack [Knaack et al., 2014] tre aree principali di costruzione possono essere distinte nelle facciate continue:

- *Struttura primaria* (involucro dell'edificio) che costituisce la struttura portante principale dell'edificio;

- *Struttura secondaria*, che è la struttura portante della facciata e costituisce l'elemento di collegamento tra la struttura primaria e i pannelli di tamponamento;

- *Elementi intermedi*, quali lastre in vetro o pannelli di altro materiale che vengono connessi alla struttura secondaria.

La progettazione delle facciate continue risulta un processo molto complesso poiché i diversi sistemi che la costituiscono devono essere ben progettati al fine di evitare malfunzionamenti durante le condizioni di servizio, o meglio durante la vita utile dell'edificio.
Ad esempio, l'interfaccia verso l'esterno rappresentata dalla struttura secondaria di supporto deve rispondere a dei restrittivi requisiti di funzionamento termico e strutturale visto che deve accogliere gli elementi di tamponamento ed evitare l'intensificarsi di sollecitazioni dinamiche che potrebbero causare problematiche a livello di comfort abitativo e, nello specifico, una conseguenza negativa è il noto ponte termico. La discontinuità del flusso di calore tra interno ed esterno può essere riscontrata in corrispondenza dei giunti tra la struttura secondaria di supporto e le lastre di vetro e può essere causata da un posizionamento errato delle guarnizioni, che hanno la funzione di garantire una tenuta termica e alle infiltrazioni d'aria e d'acqua.
Da ciò si può dedurre che il funzionamento complessivo della facciata continua è direttamente interrelato e basato non solo sul comportamento prestazionale delle singole parti ma anche dal modo in cui sono connesse tra di loro [Klein, 2013]. A questo si aggiungono le condizioni climatiche che possono influenzare i requisiti prestazionali delle facciate, che derivano da differenze tra ambiente interno e esterno, come quelli causati da differenze di temperatura, umidità e pressione [Herzog, et al., 2017].
Questi effetti impongono sollecitazioni meccaniche su materiali e sulla struttura della facciata in condizioni estreme. Pertanto, tali sollecitazioni devono essere in grado di essere assorbite da una serie di elementi quali giunti di dilatazione, giunti flessibili, connessioni.

Per questi motivi, appare necessario mettere in luce gli elementi più importanti della componentistica delle facciate continue, in quanto svolgono un ruolo primario nel limitare problematiche che possono inficiare le prestazioni complessive dell'intero sistema.
Questa analisi è fondamentale per porre le basi alle analisi dei casi studio, che si focalizza sui fallimenti a livello prestazionale della facciata continua.

In aggiunta, un'indagine critica sui componenti essenziali che costituiscono i sistemi di facciata continua rappresenta uno step necessario per la fase di definizione e progettazione del sistema di facciata che sarà sottoposto a specifiche attività di testing in regime simulato.
Nello specifico, i componenti riportati, andranno a confluire nel *processo di design* (Cfr. 6), in cui confluisce non solo un apporto metodologico, ma anche un apporto tecnologico in linea con i processi di ricerca e sviluppo, produzione e innovazione.

Componenti
In questa sezione sono riportati i componenti fondamentali della facciata continua che contribuiscono al suo efficace funzionamento e comportamento prestazionale.
Per restringere il campo di indagine e vista la complessità della progettazione delle facciate continue, si fa riferimento ai componenti principali che vanno a caratterizzare le tipologie *stick system* (montanti e traversi) e *unitized system* (cellule), in quanto questi sistemi sono i più diffusi e se installati correttamente, soddisfano i requisiti per i quali la facciata viene costruita. I componenti quali profili in alluminio che costituiscono l'intelaiatura delle facciate continue, sigillanti e guarnizioni per l'isolamento termico e la tenuta all'aria e all'acqua devono essere assemblati con tolleranza specifiche e molto ridotte al fine di realizzare un prodotto altamente ingegnerizzato.
Come evidenziato precedentemente, le caratteristiche prestazionali delle facciate continue - per essere immesse nel mercato produttivo e quindi installate – devono essere verificate e validate attraverso attività di testing condotte presso laboratori di prova specializzati che certificato il corretto funzionamento della componentistica al fine di rispondere a requisiti dettati dalla normativa di riferimento.

1) Intelaiatura
I profili che costituiscono l'intelaiatura della facciata continua sono rappresentati dagli elementi verticali e orizzontali, i montanti e traversi, che attraverso degli ancoraggi vengono connessi alla struttura primaria di supporto dell'edificio al fine di rendere rigida la struttura ai movimenti dinamici. Le piastre di ancoraggio sono costruite dello stesso materiale dei profili ma di solito queste non vengono rifinite mediante l'utilizzo di vernici.
Il materiale più utilizzato per la costruzione dei profili è l'alluminio di tipo estruso visto che la sua caratteristica di estrudibilità consente di ottenere forme complesse e comprensive [Fig. 5.10] di nervature che rendono i profilati più resistenti sia alla flessione e sia alla torsione, consentendo la realizzazione di un'intelaiatura di ampie dimensioni senza comprometterne sicurezza e funzionalità.
L'utilizzo di questo materiale è anche favorito dal fatto che presenta un alto livello di resistenza alla corrosione in condizioni di atmosfera normale, in quanto si ossida immediatamente a contatto con l'aria creando una protezione superficiale che lo rende resistente all'acqua e ad altre sostanze chimiche.

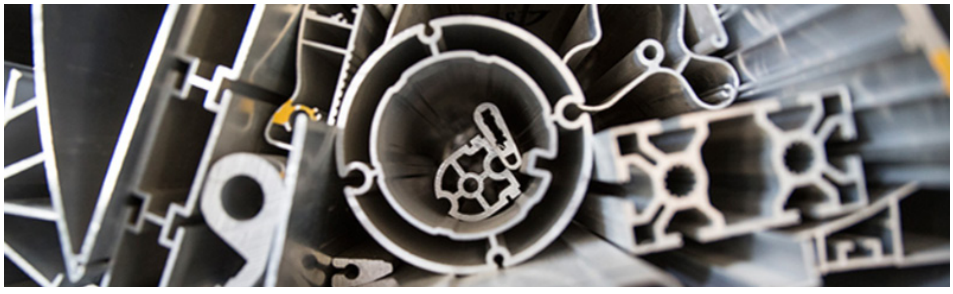


Fig. 5.10. Profilati in alluminio estruso

Le principali leghe (da trattamento termico) e tempra di alluminio utilizzate per le applicazioni di facciate continue sono [Tab. 1]

Alloy - Temper	Ultimate strenght (MPa)	Yield strenght (MPa)
6063 – T5	150	110
6063 – T5	230	250
6063 – T5	205	170
6063 – T5	260	240

Tab. 1. Leghe e trattamento dell'alluminio

La lega più utilizzata è la 6063 e la scelta della tempra è dettata dai requisiti di resistenza che deve asseverare la facciata continua. La tempra T5 è più comune per le forme chiuse mentre la tempra T6 è più comune per le forme aperte. La lega 6061 è considerata una lega strutturale a media resistenza e, per questo motivo trova meno applicazione come intelaiatura estrusa. Gli estrusi in alluminio sono ampiamente utilizzati per le campate di media lunghezza in quanto hanno una resistenza adeguata. Per le applicazioni a lunga portata, è più efficiente utilizzare l'acciaio come rinforzo nascosto all'interno di una sezione di alluminio. Altri materiali utilizzati per l'intelaiatura possono essere il legno, il vetro o il polimero rinforzato con fibra di vetro pultrurata, riconosciuto con il nome di GFRP.

Per quanto riguarda i profili delle piastre di pressione sono personalizzati per adattarsi al particolare sistema di tenuta del produttore. Le facciate a cellule utilizzano un profilo tipico per le guide intermedie; tuttavia, a seconda del sistema di incastro, possono essere utilizzate piastre di pressione in due parti per l'incastro delle guide verticali e orizzontali del telaio. La funzione dei profili è bloccare il vetro o il pannello di altro materiale nella cornice in alluminio. Un aspetto fondamentale da tenere in considerazione è il sistema di drenaggio dei profili, per evitare l'ingresso l'acqua e quindi drenare all'esterno.
Le aperture di drenaggio devono essere dimensionate per consentire un drenaggio adeguato e uno sfiato della cavità vetrata. Il drenaggio d'acque residuanti da infiltrazione e/o condensazione dovrà avvenire mediante le canalizzazioni presenti sui montanti. Nel caso di facciate d'altezza superiore ai 20 mt, dovranno essere previsti drenaggi a quote intermedie oltre a quelli sempre presenti all'estremità inferiore della facciata. Per traversi di lunghezza superiore ai 2 mt andranno previsti drenaggi per singola campitura. Il sistema dovrà provvedere ad equalizzare le pressioni agenti in modo che il deflusso per gravità non risulti ostacolato.
A tal proposito, risulta importante sottolineare che la sovrapposizione del traverso sul montante deve garantire che eventuali tracce d'acqua residuanti per infiltrazione o condensazione siano convogliate dai traversi sui montanti; quest'ultimi saranno dotati, nella loro sagoma, di canalizzazioni atte a raccogliere l'acqua dai traversi e a scaricarla verso il basso. In corrispondenza del giunto meccanico fra traversa e montante (interposto tra i due) sarà collocato un elemento in EPDM funzionale ad evitare gli attriti diretti tra parti metalliche e i conseguenti scricchiolii dovuti ad escursione termica.
La continuità della tenuta, in corrispondenza dei giunti tra montanti, sarà garantita mediante appositi accessori in acciaio inossidabile e dotati di guarnizione (voce sotto) in EPDM sulla testata superiore. Tale accessorio, installato per contrasto e fissato al montante superiore, garantirà la continuità dei canali di drenaggio compensando i movimenti d'adattamento del giunto.
Da ciò si deduce che il sistema di tenuta dei giunti, in corrispondenza dei pannelli di tamponamento (trasparenti e non), dovrà essere garantita mediante guarnizioni in EPDM collocate sia internamente sia esternamente al pannello di tamponamento.

2) Guarnizioni

Il 'trattenimento' dei vetri avviene tramite un pressore continuo con guarnizioni al quale è possibile applicare varie forme [Fig. 5.11], siano esse quadrate o tondeggianti. Il ruolo delle guarnizioni è quello di attutire il bordo di vetro per evitare il contatto metallico che potrebbe comportare la rottura e sigillare il perimetro della lastra di vetro per impedire la penetrazione di acqua e perdite d'aria. Alle guarnizioni sono richiesti diversi requisiti che spaziano dalla resistenza agli agenti atmosferici, alle prestazioni fisico-meccaniche in un ampio intervallo di temperature con la capacità di sopportare forti escursioni termiche.

Le guarnizioni devono essere installate in modo tale che ci sia una compressione longitudinale e una tendenza ad espandere e chiudere le articolazioni piuttosto che ritirarle (gli angoli sono punti critici). Le guarnizioni dei montanti e dei traversi collocate internamente al tamponamento, che rappresentano il piano di tenuta efficace del sistema, potranno essere tra loro unite mediante sigillanti, angoli preformati o fornite in telai vulcanizzati a misura.

I materiali più utilizzati per la produzione delle guarnizioni sono il neoprene, il termopolimero etilene-propilene-diene, conosciuto con l'acronimo di EPDM e la gomma metil vinil siliconica VMQ, sigla che identifica il silicone. Il neoprene e l'EPDM vengono utilizzati in modo intercambiabile in quanto presentano simili caratteristiche fisiche, come per esempio un'elevata elasticità e resistenza alla deformazione permanente, all'abrasione, al taglio e allo schiacciamento, all'ossidazione, all'ozono, a raggi UV e all'invecchiamento.

Per quanto riguarda la gomma siliconica, una delle caratteristiche distintive è essere idrorepellente all'acqua, con il vantaggio che una goccia d'acqua non può estendersi sulla sua superficie.



Fig. 5.11. Tipologie di guarnizioni

3) Sigillanti

La sigillatura consiste nell'utilizzo del sigillante siliconico che deve mantenere integrità adesiva e coesiva poiché la facciata è soggetta al carico del vento e alle sollecitazioni termiche. La sigillatura mediante sigillante siliconico non riguarda soltanto le facciate di tipo strutturale per fissare meccanicamente il vetro (viene utilizzato in questo caso il sigillante di tipo strutturale per incollare le varie lastre di vetro) ma si applica tra i pannelli di vetro nelle facciate a cellule per fornire resistenza agli agenti atmosferici. Il sigillante più utilizzato per questo tipo di applicazioni è il sigillante butilico a basso ritiro che hanno una buona estensione elastica e rispondono bene alla compressione.

Questa sintetica disamina sui componenti primari delle facciate continue viene intensa come base di conoscenza delle funzioni dei singoli elementi che compongono la facciata in modo tale da indicare quali possibili problematiche causate dagli agenti atmosferici e in particolare dagli eventi di cambiamento climatico, come l'innalzamento delle temperature, l'intensificarsi delle precipitazioni e del vento, possono causare dei fallimenti sui diversi

componenti e di conseguenza, provocare dei deficit prestazionali sul sistema complessivo dell'edificio. Le cause che determinano difetti a livello prestazionale sono quindi da ricercarsi nelle condizioni ambientali e climatiche, negli stress subìti nelle fasi di esercizio, nel naturale deperimento dei materiali, nell'eventuale messa in opera errata e utilizzo scorretto da parte dell'utenza.
Ad esempio, si riscontra spesso la perdita di tenuta all'acqua e all'aria delle facciate continue causata dall'invecchiamento di guarnizioni e sigillanti gommosi e, a volte, da errori di progettazione, che innescano in condizioni estreme infiltrazioni dannose all'integrità delle parti metalliche. Il cedimento delle guarnizioni può anche essere causato dai movimenti stessi (termici e strutturali) della facciata continua o all'esposizione prolungata alle radiazioni solari e all'acqua. Per quanto riguarda i profili in alluminio, questi possono essere soggetti a corrosione galvanica quanto entrano in contatto con altri materiali.

Prima di addentrarci nella trattazione sui fallimenti e deficit prestazionali delle facciate continue, sembra utile riferirsi ai trend nel mercato che dimostrano l'incremento dell'adozione di questi sistemi grazie alla loro innovazione tecnologica e prestazionale.

5.1.2 Sistemi di facciata continua: trend nel mercato e prospettive di crescita

> "Il mercato andrà monitorato con grande attenzione in quanto la reperibilità delle materie prime potrebbe determinare sia un rallentamento della crescita sia una contrazione dei margini. Le aziende non dovranno cadere nella trappola della crescita ad ogni costo, preservando i livelli di efficienza raggiunti e continuando ad investire in innovazione di prodotto."[27]
> [Garzia, 2021]

La struttura industriale del mercato in relazione alle facciate continue varia da Paese a Paese. Ciò è dovuto principalmente al fatto che molte aziende utilizzano tecnologie obsolete e spesso non hanno le risorse per investire in nuove attrezzature, altre sono specializzate in particolari settori tecnici e, in minima parte, poche aziende risultano competitive e innovative per lo sviluppo di nuove tecnologie.
Secondo il '*Global Glass Curtain Wall Market – Industry Trends and Forecast to 2029*'[28], il mercato globale delle facciate continue in vetro è stato valutato a 48,06 miliardi di dollari nel 2021 e dovrebbe raggiungere i 101,85 miliardi di dollari entro il 2029, registrando un tasso di crescita dei ricavi del 7,80% durante il periodo di previsione 2022-2029.
Nel periodo 2021-2022, l'epidemia di coronavirus ha avuto un impatto negativo sul mercato delle facciate continue in vetro, con le conseguenze di un arresto forzato della catena di approvvigionamento delle materie prime per la costruzione e la sospensione dei progetti già avviati alla realizzazione in cantiere, dovuti alla carenza di manodopera. Dopo questo rallentamento, la domanda sul mercato di facciate continue sta subendo una continua espansione.
Secondo quanto stimato dal rapporto '*Aluminum Curtain Wall Market Size, Share & Trends Analysis Report*'[29] si prevede che il mercato assisterà a una crescita incrementale della domanda, a causa delle crescenti esigenze di protezione (isolamento termico) delle pareti esterne delle strutture aziendali, compresi gli impianti industriali e i luoghi di lavoro.
Si mette in luce, come la crescente consapevolezza sull'utilizzo di strutture di costruzione ad alta efficienza energetica e la crescente preferenza per i materiali da costruzione che mirano alla sostenibilità alimenteranno ulteriormente il tasso di crescita del mercato delle facciate continue in vetro.
Ad avvalorare tale scenario, le ultime tendenze – indicate nel rapporto '*Glass Curtain Wall Market Size, Share & Covid-19 Impact Analysis*'[30] – sull'adozione e la conseguente realizzazione di facciate continue in vetro sono favorite da un risparmio a livello energetico e sui costi che rivelano una diminuzione sull'utilizzo di impianti di illuminazione e di riscaldamento

(soprattutto nei periodi invernali), grazie alla trasparenza del vetro e alla sua capacità di immagazzinare un apporto di calore desiderato per gli spazi interni dell'edificio.
In generale, un'opportunità agli investimenti in questo settore che sottendono un impulso competitivo è data dalle attività di ricerca e sviluppo dei principali produttori[31] che spingono sulla progettazione di nuovi sistemi di facciata continua rispetto a geometrie complesse e grandi dimensioni (le dimensioni di una lastra di vetro di grandi dimensioni possono raggiungere i 3660x18000 mm, note con il nome di jumbo size).

Altri fattori [Fig. 5.12] che incidono sulla domanda delle facciate continue e, di conseguenza apportano significativi output nel mercato si riscontrano nella crescita delle economie emergenti e nella richiesta di involucri che non siano solo efficienti dal punto di vista energetico ma che abbiano un forte impatto estetico, a sua volta fattore che qualifica la città.



Fig. 5.12. Trend del mercato e fattori che incidono sulla richiesta di facciate continue

Tuttavia, le restrizioni si individuano nei costi elevati sia nei processi di installazione sia nelle attività di manutenzione; ad esempio, quando la facciata continua subisce un malfunzionamento, dovuto a infiltrazioni d'acqua o d'aria, è richiesta una manodopera altamente qualificata che potrebbe rappresentare un fattore limitante al trend di mercato.
Questo rapporto inoltre analizza anche la crescita dei ricavi a livello globale, regionale e nazionale e fornisce un'analisi delle ultime tendenze del settore delle facciate continue in vetro. Viene specificato che Il Nord America domina il trend nel mercato in termini di quota di mercato e entrate e continuerà a prosperare durante il periodo di previsione 2022-2029.

La crescita del mercato in questa regione è attribuita agli investimenti esteri, al crescente numero di attività di costruzione e al crescente settore industriale all'interno della regione. Si stima invece che l'Asia-Pacifico mostri una crescita redditizia nel periodo di previsione 2022-2029, a causa del crescente fascino estetico delle infrastrutture nelle economie emergenti della regione. Il principale fattore che influenza il mercato dell'Asia Pacifico è il significativo aumento dello sviluppo edilizio e infrastrutturale nelle economie emergenti.
L'Europa deteneva la seconda quota di mercato più grande, seguita da vicino dal Nord America, nel 2019; si prevede che i paesi dell'Europa centrale e orientale saranno i principali motori di crescita nella regione visto che questi paesi sono ancora in via di sviluppo. Inoltre, si stima che l'industria delle costruzioni del Regno Unito superi il livello tedesco al fine di diventare la sesta industria produttiva più grande al mondo entro la fine del 2030.

Per quanto riguarda le tipologie di facciate continue più richieste, il grafico [Fig. 5.13] mostra che il sistema unitized system (facciata a cellula) domina il mercato, rappresentano una quota importante ed in crescita, seguita dai sistemi stick system (facciate a montanti e traversi) e altre tipologie meno popolari sul mercato a causa dei vantaggi offerti dalle prime due tipologie.

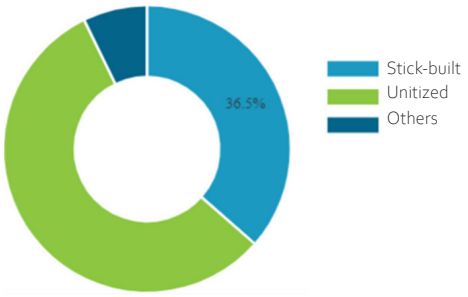


Fig. 5.13. Analisi per tipo di prodotto, Trend del mercato delle facciate continue in vetro 2019.

Un aspetto rilevante da sottolineare che spiega la crescita nel mercato delle facciate continue a cellula è che questa tipologia di sistema veniva già utilizzata dagli anni '50 per la realizzazione di strutture commerciali, per uffici e, in maggior misura grattacieli, mentre il sistema a montanti e traversi è 'limitato' alla progettazione di edifici più piccoli e anche residenziali. La spiegazione è data dal fatto che la tipologia a cellula è idonea in termini strutturali a resistere in misura maggiore i carichi rispetto ad altezze abbastanza elevate, come quelle per gli edifici alti. I montanti e traversi, sebbene costituiscano l'intelaiatura della facciata, subiscono delle deformazioni più accentuate in relazione all'altezza dell'edificio.

Spostando l'attenzione in Italia, il '*Rapporto sul mercato dell'involucro edilizio*'[32], redatto da UNICMI[33], basa le sue analisi sulla domanda nel settore delle costruzioni e sulla struttura dell'offerta e delle dinamiche di mercato nei seguenti comparti: serramenti, facciate, carpenterie, sistemi oscuranti. Il rapporto è stato presentato lo scorso marzo 2022, e rileva che dopo un 2021 in crescita per il settore delle costruzioni (+24,8%), grazie alla spinta degli incentivi fiscali, la ripresa marca un significativo rallentamento nel 2022 (+10,1%) e le prospettive per il 2023 indicano una crescita degli investimenti nelle costruzioni del 6,1%.
Dalle stime effettuate, la crescita del mercato legato alla produzione di componenti per facciata degli involucri edilizi si è consolidata nel 2022 al 10,4% mentre nel 2023 si prospetta un calo fino al 6,2%.
Entrando nel merito delle analisi [Fig. 5.14], in Italia, i settori che stimolano il mercato dei serramenti e delle facciate continue, si distinguono in:
- *settore residenziale*: la crescita si attesta al 11% nel 2022 e del 6,6% nel 2023;
- *settore non residenziale*: la crescita si attesta al 9% nel 2022 e del 5,5% nel 2023.

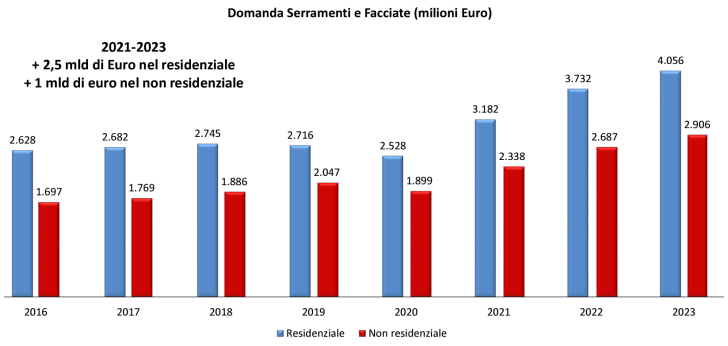


Fig. 5.14. Domanda serramenti e facciate

Considerando l'evoluzione generale del contesto economico, i dati relativi al settore residenziale possono essere considerati positivi, tuttavia si tratta di una crescita generata, in buona parte, dall'aumento del costo delle materie prime. Ferro, alluminio e acciaio sono alcune delle principali materie prime utilizzate dai produttori di facciate continue in vetro.
I produttori possono essere vulnerabili lungo tutta la catena del valore a causa dello spostamento dei prezzi di alcune materie prime e si sottolinea che le grandi aziende sono spesso i fornitori di materie prime. Queste società possono aumentare il prezzo delle materie prime, che a sua volta aumenta il costo degli input grazie alla loro capacità di trasferire l'aumento dei costi delle materie prime. Di conseguenza, si prevede che la crescita del settore delle facciate continue in vetro sarà limitata per tutto il periodo di proiezione dall'instabilità e dall'aumento dei prezzi dei metalli e di altre materie prime.
Nel settore non residenziale, il rallentamento del 2023 è imputabile al clima di incertezza sulla crescita economica che porterà a rimodulare le iniziative immobiliari di medie e grandi dimensioni, che alimentano il mercato delle facciate. Dunque, i trend di crescita del marcato sono strettamente correlati al settore residenziale che rappresenta il segmento trainante del fatturato delle facciate continue, dove gli incentivi fiscali sono un motore di sviluppo che contribuiscono a sostenere la domanda.
Allo stesso tempo, intervenire su edifici non residenziali e quindi sul settore terziario significa dimostrare l'efficacia dell'adozione di nuove tecnologie d'involucro, in quanto è proprio in questo settore che si rilevano problematiche energetiche legate alla gestione degli impianti di riscaldamento-raffreddamento e di illuminazione, che richiedono interventi nel breve termine. Una spinta significativa alla crescita potrebbe provenire dall'avvio delle opere pubbliche finanziate con il PNRR specialmente per l'ammodernamento e la costruzione degli edifici pubblici e del settore terziario che potrebbe portare ad un'accelerazione dei tassi di crescita.
D'altra parte, con l'introduzione del *Green Deal*, che spinge al miglioramento del rendimento energetico degli edifici (anche attraverso la sostituzione degli infissi con quelli ad alto rendimento energetico), gli investitori e le aziende produttrici devono puntare ai benefici che questo tipo di soluzioni possono offrire ai fruitori.
L'elevata concentrazione di istanze formali (la composizione, l'aspetto, il rapporto con l'intorno), energetiche (la regolazione dei flussi di calore e luce, l'isolamento termico, il contributo al bilancio energetico dell'edificio) e di sicurezza (la protezione al fuoco e la resistenza agli agenti atmosferici, soprattutto in un'ottica di durabilità), sono tutti aspetti che, lungi dall'essere 'compartimenti stagni', si influenzano reciprocamente formando un sistema complesso dove qualsiasi modifica genera delle ricadute sull'insieme.
Le aziende italiane[34], produttrici dei sistemi di facciata continua, sono sempre più orientate versus la realizzazione di nuovi componenti, caratterizzati da un alto livello di complessità tecnologica, in grado di garantire prestazioni variabili e dinamiche durante le diverse stagioni dell'anno e di gestire i fenomeni climatici, in un'ottica tale da consentire l'adattamento (approccio adaptive e climate resilient design) personalizzato e graduale rispetto a requisiti prestazionali specifici richiesti dalla normativa e dai fruitori stessi.
Tuttavia, l'attività delle aziende non si limita alla mera realizzazione dei sistemi di facciata, ma forniscono un supporto tecnico basato sull'individuazione della soluzione più idonea (rispetto alla scelta della tipologia del sistema di facciata continua) in funzione delle indicazioni progettuali, delle condizioni ambientali e delle richieste della committenza, configurando un processo che porta alla progettazione esecutiva dei vari elementi che configurano i sistemi di facciata continua al fine di garantire una qualità tecnologica e ambientale.

Considerazioni critiche per gli obiettivi della ricerca

Si fa quindi strada la necessità di una costruzione sempre più efficiente e questa esigenza, soprattutto in climi sensibili come quello della Regione del Mediterraneo, indurrà gli sta-

keholder del settore industriale e produttivo a proporre nuove soluzioni tecnologiche di facciata continua che siano in grado di mantenere un buon livello di comfort a fronte degli eventi di cambiamento climatico in atto e siano in linea con le Direttive Europee sui requisiti ambientali e prestazionali.
La ricerca vuole inserirsi in questo ampio *panorama*, nell'offrire la garanzia di affidabilità delle caratteristiche tecniche della facciata continua (presa come caso-studio) attraverso la verifica prestazionale con gli strumenti messi a disposizione dall'innovazione tecnologica, ovvero il 'mondo' delle simulazioni e quello del testing avanzato.
Ciò vuole contribuire ad accrescere la conoscenza rispetto ai possibili limiti nell'immissione nel mercato delle facciate continue, riferiti alla carenza di manuali di manutenzione attraverso un'indagine dei possibili degradi che possono subire durante la loro vita utile amplificati dagli effetti del cambiamento climatico che possono peggiorare le prestazioni dell'intero sistema in modo repentino e improvviso.
Gli sforzi della ricerca si spingono verso l'introduzione di indicatori prestazionali innovati per la verifica prestazionale delle facciate continue, attraverso un controllo misurabile delle loro performance, per promuovere un'innovazione che leghi requisiti tecnologici delle facciate continue e condizioni climatiche mutevoli del contesto di riferimento.
Il legame che si instaura tra ricerca, sviluppo, produzione e trend nel mercato vuole essere un punto di riferimento per contribuire al processo innovativo dei sistemi di facciata. Questo approccio consente di adottare delle soluzioni tecnologiche studiate e validate per condizioni ambientali specifiche e non esportabili da un contesto all'altro senza un'analisi adeguata al comportamento funzionale e prestazionale.
Al contempo, risulta necessario mettere in campo l'esigenza di un aggiornamento e un adeguamento a livello normativo, che defisca nuove procedure di prova, nell'ambito delle attività di testing, che stiano al passo con nuovi requisiti tecnologici, prestazionali ed esigenziali. Pertanto, al nuovo ventaglio delle opzioni tecnologiche che dettano nuove stratificazioni e quindi nuove performance, devono corrispondere nuove modalità di misurare, in ambito reale, i livelli del funzionamento e di risposta delle facciate rispetto a sollecitazioni estreme di cambiamento climatico.

Da questo ragionamento, nasce la volontà di sviluppare un protocollo metodologico per misurare le prestazioni della facciata continua, della tipologia a cellula, in modo tale da definire uno strumento utile alla gestione delle performance degli involucri del futuro in regime di cambiamento climatico per la Regione del Mediterraneo, dove le previsioni climatiche dettano soluzioni tecnologiche di tipo efficiente per un mercato in continua evoluzione e crescita.

Alla luce di queste considerazioni, il prossimo paragrafo sarà dedicato ai fallimenti e deficit prestazionali delle facciate continue, il cui scopo è costruire un quadro esaustivo delle possibili problematiche che caratterizzano i sistemi di facciate continua, oggi in continuo aumento a causa degli effetti del cambiamento climatico.
Questa attività, per gli step metodologici della ricerca, rappresenta un fertile campo di esplorazione, al fine di individuare da un lato quali sono i componenti e gli elementi che falliscono maggiormente rispetto a fenomeni di cambiamento climatico, dall'altro per sviluppare la procedura di prova più idonea a testare i livelli di risposta della facciata continua (presa come caso studio), attraverso la quale, si possano validare i fallimenti e i deficit prestazionali, messi in evidenza dall'analisi teorica.

5.2 Revisione critica: analisi sui deficit e limiti prestazionali delle facciate continue

"Curtain walls are the most abused of building elements being subjected to wind loading, extreme events, building movements, sudden temperature changes, driven rain, atmospheric pollution and corrosion."[35]
[Hunton, & Martin, 1987, p. 88]

Le facciate continue in metallo e vetro rappresentano generalmente dal 50 al 100% del rivestimento esterno di grandi edifici e sono elementi determinanti le prestazioni dell'involucro verticale dell'edificio [Gonjalves, et al., 2010]. Data la complessità tecnologica e la moltitudine di funzione che devono svolgere, i sistemi di facciate continue vengono considerati più propriamente come filtro selettivo, in quanto devono fornire una barriera ad alcuni effetti (sia esterni che interni) e consentire il passaggio di altri [CMHC, 2004], al fine di raggiungere un adeguato livello prestazionale.
Nello specifico, le facciate continue devono essere a tenuta d'aria e d'acqua, impedire la formazione di condensa sulle superfici interne, controllare il flusso termico e resistere al carico del vento e ad altre forze esterne che agiscono sull'involucro dell'edificio. Nonostante lo sviluppo tecnologico nell'industria delle facciate continue, il mercato in costante espansione che comporta la loro diffusione (nel settore residenziale e in quello terziario), in letteratura ci sono studi molto limitati sulle prestazioni a lungo termine dei sistemi di facciate continue [Yalaz, et al., 2016], specialmente se si considera la risposta prestazionale in conseguenza agli effetti del cambiamento climatico. Le previsioni climatiche che indicano un innalzamento delle temperature, delle variazioni del regime delle precipitazioni e del vento, in termini di frequenza e intensità (Cfr. Cap.1), rappresentano ulteriori scenari di condizioni estreme per gli edifici, che richiedono considerazioni progettuali specifiche.
Le facciate continue non sono esenti da queste problematiche, ciò è dovuto principalmente alla loro intrinseca vulnerabilità ai carichi dinamici, alle forti sollecitazioni e agli urti in generale, per cui occorre prestare molta attenzione sia in fase di progettazione che di installazione [Bedon, et al., 2017]. Considerando la funzione degli elementi principali delle facciate continue come i sistemi di tenuta quali guarnizioni, sigillanti e giunti, bisogna *affrontare* le prestazioni rispetto alle dinamiche legate al contesto ambientale di riferimento.
Sebbene la maggior parte degli odierni sistemi di facciata continua sia tecnologicamente migliorata e soddisfi requisiti più elevati, recenti studi indicano che l'impatto continuo delle condizioni ambientali causa una significativa perdita di prestazioni (fino al 54% a causa di infiltrazioni d'aria, 18,53% a causa della pressione del vento) durante la vita del sistema di facciata continua [Yalaz, et al., 2018].
Per il corretto funzionamento delle facciate continue, non bisogna solo considerare come unici criteri di prestazione la resistenza alla penetrazione dell'acqua e la resistenza alle perdite d'aria [Trabucco, 2019] in quanto altri aspetti sulla prestazione includono il controllo termico, la resistenza alla condensazione e la resistenza al carico del vento.
L'insieme di questi criteri caratterizza i sistemi di facciata dal punto di vista dell'integrità strutturale, dalla possibilità di movimentazione (consentita: termica e strutturale) e rispetto alla tenuta agli agenti atmosferici, i quali rivestono particolare importanza nella presente ricerca per l'analisi e la valutazione delle possibili criticità che può subire una facciata, durante le condizioni di servizio.
Circa la metà di tutti gli edifici costituiti da facciate continue presenta perdite e un terzo sperimenta un'usura prima della fine della loro vita utile [Matthews, et al., 1996]. I deficit possono riguardare i diversi componenti che costituiscono la facciata come vetro, alluminio, acciaio, guarnizioni e sigillanti. Si riscontra spesso la perdita di tenuta degli infissi all'acqua e all'aria causata dall'invecchiamento di guarnizioni e sigillanti gommosi e, a volte, da errori di progettazione, che provocano infiltrazioni dannose all'integrità delle parti metalliche.

Secondo Kazmierczak e Hershfi [2010], i principali fallimenti prestazionali di una facciata continua sono direttamente collegati:
- *Condensa e brina*: prestazioni inadeguate dei componenti che non favoriscono un controllo del flusso di calore;
- *Abbagliamento*: caratteristiche fisiche del componente vetro non idonee a garantire un controllo adeguato della luce;
- *Rumore*: attenuazione del suono inadeguata;
- *Infiltrazioni*: resistenza all'acqua piovana inadeguata;
- *Rottura dei vetri*: imperfezioni estetiche del vetro o connessioni inadeguate o non dimensionate correttamente;
- *Corrosione*: protezione anticorrosione inadeguata, azione galvanica36 di metalli dissimili.

Conoscere quindi le cause che provocano un decadimento prestazionale dei sistemi di facciata continua, diventa un'azione indispensabile per una corretta progettazione al fine di prevenire danni e fallimenti del sistema e sottolinea l'esigenza di identificare le vulnerabilità e le criticità oltre ai punti deboli su cui il progettista deve porre attenzione, viste le dinamiche degli effetti del cambiamento climatico in atto.

Al fine di facilitare la lettura dei deficit prestazionali delle facciate continue, si propone un quadro di riferimento strutturato sulla base degli eventi estremi più frequenti nella Regione del Mediterraneo: temperature estreme, precipitazioni intense e aumento dell'intensità del carico del vento. Questa ripartizione intende configurarsi come strumento utile che individua la possibile causa del fallimento prestazionale della facciata continua.

Temperature estreme
Un effetto determinante sulle prestazioni complessive delle facciate continue è rappresentata dalle esposizioni a temperature estreme, che comporta l'espansione e la contrazione dei materiali, facendo emergere la necessità di controllare il passaggio del calore attraverso la facciata e soprattutto la sua instabilità. L'espansione dei materiali si riferisce alle lastre di vetro e ai montanti con le dirette conseguenze di un inarcamento del pannello trasparente in vetro e di un movimento nelle guarnizioni. È l'effetto del calore solare sulla facciata che crea una delle maggiori preoccupazioni nella progettazione delle facciate continue in alluminio, ovvero il movimento termico.
Le fluttuazioni di temperatura, sia diurne che stagionali, influenzano in modo critico i dettagli della facciata. Sebbene, tutti i materiali da costruzione si espandono e si contraggono in una certa misura con i cambiamenti di temperatura, la quantità di movimento è maggiore nell'alluminio che nella maggior parte dei materiali da costruzione. I telai in alluminio che quelli in acciaio hanno una conducibilità termica molto alta.
Questo si traduce in un'elevata perdita di calore attraverso i montanti delle facciate continue in alluminio o acciaio [Song, et al., 2013]. Un aspetto da considerare riguarda la presenza di elementi interni come i tagli termici (realizzati con un materiale non conduttivo) e gli isolatori termici che possono contribuire al miglioramento delle prestazioni dell'intelaiatura in alluminio, in quanto impediscono il trasferimento di calore attraverso il metallo (questo aspetto influenza anche la resistenza al fenomeno della condensa).
Le continue sollecitazioni termiche e gli impatti possono anche causare crepe sui vetri, note come fessurazioni termiche dei vetri[37], provocando dei danni sproporzionati che influiscono in modo determinante sulle prestazioni complessive dell'edificio e in particolare sulla sicurezza degli abitanti. Questi deficit si amplificano quando le lastre di vetro sono grandi e di conseguenza è grande la dimensione dei giunti: più lunghi sono gli elementi, maggiore sarà il movimento della sollecitazione da accogliere per ogni giunto, ciò comporta un'attenzione alla progettazione dei giunti.

Quando la facciata continua risponde ai movimenti dovuti alle variazioni di temperatura, il suo movimento improvviso può causare una rottura delle guarnizioni [CMHC, 2004], che si distaccano dal telaio provocando perdite d'aria e causando infiltrazioni d'acqua all'interno dell'edificio.
Le guarnizioni, di solito in materiale plastico, possono essere deteriorate a causa delle radiazioni UV o dell'invecchiamento e anche il sigillante può essere rilasciato dai sistemi di facciata continua a causa di diversi movimenti [Yalaz, et al., 2016].
Sia le guarnizioni che i sigillanti sono elementi di primaria importanza per il funzionamento complessivo della facciata continua, per questo motivo è importante l'attività di manutenzione[38] che può contribuire a evitare malfunzionamenti più gravi all'intero sistema.
Si mette in evidenza quindi che i materiali e i componenti che costituiscono le facciate continue devono essere in grado di sopportare le sollecitazioni a livello termico al fine di garantire l'integrità del sistema e una barriera termica continua.

Precipitazioni intense
Le infiltrazioni d'acqua e le perdite d'aria sono le problematiche più ricorrenti nei sistemi di facciata continue e sono strettamente correlate [CMHC, 2004].
Quando la pioggia continua abbastanza a lungo, l'acqua scorre su tutta la facciata, bagnando pesantemente tutte le aree: le facciate di materiali impermeabili disperderanno grandi quantità di acqua a livelli inferiori rendendo difficile l'allontanamento dell'acqua piovana. Le infiltrazioni d'acqua creano il più grande potenziale di danni da umidità in un edificio.
Oltre a questi, i danni causati da infiltrazioni d'acqua possono comprendere il deterioramento prematuro della struttura, danni ai componenti e una diminuzione della qualità dell'aria interna.
Nel caso delle facciate continue, la maggior parte dei componenti è composta da materiali a tenuta d'aria che vengono uniti mediante giunti a contatto o scorrevoli, che limitano il flusso d'aria e di conseguenza il flusso d'acqua. Il sistema di barriera d'aria è costituito dal vetro, dai telai, dalle guarnizioni e dai sigillanti che collegano e uniscono i componenti [Marquis, et al., 2017]. La forza dell'azione capillare operante sulla facciata, se combinata con un flusso d'aria, può causare delle piccole fessure (che possono essere dovute a componenti che non si adattano completamente) che rappresentano un cedimento nei sigillanti. La rottura dei sigillanti può essere anche causata da una scarsa adesione ai telai, ai profili in alluminio dell'intelaiatura del sistema di facciata continua.
Le infiltrazioni d'acqua possono essere causate da un da un supporto inadeguato degli elementi in vetro della facciata, provocando dei movimenti che causano il distacco delle sigillature. Al fine di limitare l'ingresso d'acqua nella parte interna della facciata continua causando deficit a livello strutturale, è necessario prevedere e dimensionare adeguatamente (rispetto alla lunghezza dei profili) all'interno dell'intelaiatura della facciata stessa un sistema di drenaggio, quindi di scossaline e dispositivi di raccolta, che hanno il compito di allontanare l'acqua verso la facciata esterna della parete.
Una potenziale causa alle infiltrazioni d'acqua è la condensa dovuta alla discontinuità termica che indica un possibile malfunzionamento degli elementi di tenuta, permettendo l'intrusione di aria nello spazio interstiziale e compromettendo la tenuta termica [Sanders, et al., 2012]. Poiché le aree spandrel non sono generalmente esposte, come le lastre di vetro, queste sono più soggette a condensa e a movimenti differenziali dovuti a temperature estreme. I pannelli posteriori, che sono lastre metalliche progettate per prevenire le infiltrazioni d'acqua nelle aree spandrel, possono essere dotate di un isolamento sovrapposto per mitigare le fluttuazioni di temperatura.
Da evidenziare che la penetrazione della pioggia è la principale fonte di infiltrazione di umidità, che può provocare la crescita di muffe o degradare lentamente l'integrità del sistema di facciata fino al punto di cedimento strutturale.

Vento
La pressione del vento può causare danni all'intera struttura o parti di essa, come ad esempio ai componenti di sigillatura, ai componenti di fissaggio degli elementi in vetro al telaio della facciata stessa. I danni provocati dalle sollecitazioni e dalle vibrazioni del vento si amplificano quando il sigillante, invecchiando e subendo ripetuti cicli termici, si contrae e, in assenza di vincoli meccanici, provoca in casi estremi (in presenza di trombe d'aria, uragani, tornado) il cedimento delle facciate continue e la rottura delle lastre di vetro.
L'effetto combinato delle precipitazioni e della pressione del vento genera per la facciata continua un decadimento prestazionale caratterizzato dalla spinta dell'acqua verso l'interno dell'edificio, con la possibilità di un'instabilità a livello strutturale che inficia le condizioni di sicurezza per gli occupanti dell'edificio. Sia la velocità media del vento che la direzione prevalente, rispetto ad un contesto specifico di riferimento, devono essere considerate nel processo di progettazione affinché la facciata continua sia in grado di resistere al picco delle forze del vento.
Altri fallimenti delle facciate continue possono comportare problematiche e difetti a livello estetico ma che in condizioni estreme causano cedimenti strutturali riguardano nello specifico il vetro, che rappresenta la componente principale del sistema facciata continua e, conseguentemente, è anche l'elemento sottoposto alle sollecitazioni maggiori da parte dell'ambiente esterno.
I principali degradi riferiti alla componente trasparente vetro delle facciate continue possono essere ricondotti a:

- *stress termico*: le variazioni di temperatura diurne e stagionali producono sollecitazioni termomeccaniche cicliche che possono portare a guasti indotti dalla fatica, provocando il verificarsi deformazioni, delaminazioni[39] fino a fessurazioni delle lastre di vetro. Le fessurazioni e le crepe all'interno del vetro indicano un'eccessiva sollecitazione termica e sono causate da una differenza di temperatura tra la lastra di vetro esposta ad un'alta temperatura mentre i bordi del telaio metallico non esposti, sono ad una temperatura più bassa e creano così delle tensioni possono condurre alla rottura;

- *umidità*: è un altro importante fattore di stress per il vetro, in quanto l'ingresso dell'umidità può deteriorare i legami adesivi alle interfacce tra i componenti del vetro stratificato, provocando il degrado dei rivestimenti antiriflesso (dipendenti dalle tipologie di vetro) la delaminazione, che consiste nella perdita di adesione tra le lastre di vetro e la pellicola plastica, in genere PVB[40], che le tiene normalmente unite. In condizioni esterne, l'umidità presentandosi sotto diverse forme, come il vapore acqueo (o umidità), la condensazione (o rugiada), porta alla corrosione degli elementi di metallici che costituiscono il telaio di giacitura delle lastre di vetro. L'umidità, in forma solida come ghiaccio, può provocare variazioni di volume durante i cicli di gelo e disgelo e produrre sollecitazioni meccaniche sul lato esterno che portano alla delaminazione del vetro frontale o al danneggiamento della cornice;

- *corrosione*: può essere intesa come un processo chimico-fisico che porta alla degradazione del vetro in presenza di determinate condizioni di umidità e agenti corrosivi. Il vetro corroso dall'azione dell'acqua presenta solitamente una microporosità che permette agli agenti inquinanti di penetrare in profondità ed estendere l'azione corrosiva tanto da iniziare per poi propagarsi su tutta la superficie della lastra. La corrosione[41] si traduce in opacizzazione ed ingrigimento del vetro;

- *inclusione di solfuro di nichel*: la rottura delle lastre di vetro (fenomeno caratteristico per le lastre di vetro temprato) può avvenire, in assenza di cause evidenti, per infragilimento dovuto a inclusioni di solfuro di nichel[42]. Tali inclusioni derivano dalla lavorazione non ben

controllata del vetro, ovvero nichel e zolfo che danno origine al solfuro di nichel (NiS), con l'aggiunta di modeste quantità di altri metalli quali il ferro o il rame, che causano una discontinuità a livello fisico-chimico della lastra con conseguente improvvisa rottura.

Rispetto a quanto analizzato, i motivi principali per cui i sistemi di facciata continua possono subire fallimenti si possono suddividere in quattro grandi macro-aeree che fanno riferimento a:

- *carenze della progettazione*: le problematiche si riscontrano quando vengono utilizzati materiali o sistemi che non sono appropriati per l'uso previsto. Errori comuni includono la specifica di materiali incompatibili con i materiali con cui entrano in contatto o con criteri prestazionali inadeguati per il movimento termico, la capacità strutturale o la resistenza alla penetrazione dell'acqua. Deficit prestazionali si verificano quando i progettisti o altre figure nel processo di realizzazione delle facciate continue si adoperano per cercare di ridurre il peso, le dimensioni o la quantità di componenti dell'involucro edilizio (alluminio, vetro, sigillanti, scossaline, ecc.) richiesti per un progetto per i costi elevati di progettazione ma che influenzano negativamente le caratteristiche fisico-tecniche e il funzionamento dell'intero sistema;

- *carenze nei materiali*: rispetto agli errori di produzione che non soddisfano le prestazioni dichiarate. Si fa riferimento alla degradazione dell'adesione del sigillante, alla delaminazione del vetro stratificato e alla capacità di resistenza dei profili in metallo relativi ai profili del sistema strutturale di facciata continua o al telaio che tiene le lastre di vetro;

- *carenze di installazione*: rispetto all'insieme degli elementi e componenti del sistema di facciata continua che non vengono installati adeguatamente e secondo le specifiche di produzione;

- *effetti climatici-ambientali*: quando le condizioni ambientali superano quelle previste durante la progettazione. Gli effetti dei carichi di vento della forza degli uragani, della pioggia battente e delle fluttuazioni estreme della temperatura possono sovraccaricare una facciata continua correttamente progettata e costruita, causando danni al sistema e rendendola vulnerabile a ulteriori deterioramenti o cedimenti.

È abbastanza evidente che nella fase preliminare di progettazione delle facciate continue, il clima passato non può più essere considerato rappresentativo delle condizioni future in cui ci si aspetta che gli involucri edilizi nuovi ed esistenti funzionino correttamente. Di conseguenza, i professionisti del settore produttivo delle facciate continue hanno la responsabilità di tenere conto del cambiamento climatico e del rischio per i pericoli derivanti da eventi estremi quando considerano la progettazione di nuove facciate e la riqualificazione di quelle esistenti.

Da quanto sopra evidenziato, i cambiamenti rispetto temperature, precipitazioni e vento (i cui effetti sugli involucri edilizi sono stati trattati nel Cap. 3), si possono considerare come influenzanti esterni che causano guasti alle facciate continue; ciò può essere spiegato dal fatto che le sollecitazioni causate da un aumento della temperatura, dall'intensità delle precipitazioni e del vento agiscono sui sistemi di facciata continua causando cambiamenti dimensionali dei materiali che a loro volta possono portare a fessurazioni nei materiali stessi che costituiscono il sistema di facciata continua come vetro, giunti, sigillanti e guarnizioni.
I deficit più ricorrenti si rilevano nelle crepe sulle vetrate causate da sollecitazioni termiche derivanti dall'effetto delle temperature estreme e dall'intensità della radiazione solare e nel

deterioramento dei materiali di tenuta quali guarnizioni, sigillanti siliconici a causa dell'esposizione continua ai raggi UV e al carico della pioggia. L'effetto del carico da vento può comportare un problema strutturale dovuto ai guasti di sigillanti e guarnizioni che possono causare il distacco delle lastre di vetro dall'intelaiatura della facciata continua.

Si può quindi esplicitare che gli influenzanti di cambiamento climatico che possono avere un impatto diretto sulle facciate continue, causando dei deficit prestazionali, includono:

1. una maggiore intensità solare che si traduce in temperature superficiali esterne e interstiziali più elevate e per i componenti esposti e conseguente danno e degrado su giunti, sigillature e guarnizioni. Questi materiali soggetti a stress termico sono sottoposti ad un invecchiamento prematuro che si traduce in un livello basso di durabilità;

2. i cambiamenti nei modelli di precipitazione possono anche aumentare il numero di volte in cui i componenti possono subire bagnatura e essiccazione e aumentare la possibilità che si verifichino perdite d'aria, infiltrazioni d'acqua e corrosione negli elementi metallici dei profili dell'intelaiatura della facciata continua;

3. un aumento della frequenza e dell'intensità degli eventi di vento può agire come carico strutturale e contribuire al deterioramento accelerato e prematuro del sistema strutturale che configura la facciata continua. L'effetto continuo e ripetuto del vento fa sì che le lastre di vetro o i pannelli perdano la loro capacità di carico, provocando un cedimento a livello strutturale.

Ragionando sugli aspetti prestazionali, è fondamentale che il processo di progettazione delle facciate continue non si limiti solo alla produzione e realizzazione di queste ma prenda in considerazione le fasi di installazione e di manutenzione, in quanto le prime possono contribuire a migliorare le performance attraverso un assemblaggio controllato e coordinato di tutti gli elementi costitutivi di una facciata continua (a cui si fa riferimento nel paragrafo precedente) mentre la gestione del funzionamento complessivo è demandato ad una corretta ed efficiente manutenzione di tipo ordinario e straordinario (con l'ausilio di addetti specializzati) che può contribuire a ritardare e/o prevenire danni, degradi e guasti ai materiali come sigillanti, guarnizioni e lastre di vetro.
Tuttavia, se eseguiti in modo errato, gli stessi lavori di manutenzione ordinaria possono creare la conseguenza indesiderata di nascondere condizioni che tendono a diffondersi o, in molti casi, addirittura aggravare il problema.
Come precedentemente detto, gli elementi plastici, ovvero guarnizioni e sigillanti, che sono i componenti di completamento del sistema a facciata continua garantiscono la tenuta all'acqua e all'aria, oltre a consentire e favorire il corretto posizionamento delle componenti vetrate all'interno del telaio metallico. Il materiale plastico di cui sono composti è per sua natura deperibile e, se non adeguatamente installato, protetto e mantenuto, può andare incontro ad una perdita considerevole delle sue proprietà meccaniche ed estetiche, con la conseguente perdita di adesione e infiltrazioni.
Dunque, le procedure di posa in opera, caratterizzate da adeguate tecniche di installazione influenzano trasversalmente tutto il processo produttivo delle facciate continue, dal progetto all'installazione. Si specifica la guida '*X60 Guida alla posa in opera delle facciate continue*[43]', redatta da UNCSAAL, che rappresenta il documento tecnico per la corretta posa in opera delle facciate continue sia per i produttori ed i posatori, sia per i collaudatori ed anche gli enti di terzi controllo tecnico che sono chiamati alla verifica rispetto a quanto atteso in sede di progetto.

Lo sviluppo della matrice sperimentale sui deficit prestazionali delle facciate continue
Le prestazioni 'a lungo termine' delle facciate continue rappresentano un ambito di forte interesse e un tema cruciale per gli attori coinvolti nel processo di progettazione, di produzione, di installazione e di manutenzione e i feedback - derivanti dall'analisi dei possibili degradi sulla facciata continua causati dagli effetti del cambiamento climatico – possono guidare lo sviluppo di linee guida e informazioni pratiche che potrebbero aiutare i progettisti e altri stakeholder del settore a trarre beneficio nella progettazione e nella manutenzione delle facciate continue.

Per questi motivi, risulta necessario costruire un quadro di riferimento dei possibili fallimenti e dei degradi della facciata continua, proponendo una possibile classificazione e schedatura. Questa classificazione, sottoforma di matrice sperimentale, viene intesa come uno strumento utile ai progettisti, agli operatori per la manutenzione che indica i possibili degradi e deficit prestazionali che può subire una facciata continua rispetto ad agenti esterni (in questo caso si fa riferimento agli effetti del cambiamento climatico) e agenti interni, quali i movimenti di sollecitazione termica e strutturale del sistema di facciata continua.

Il *prodotto* sviluppato si inserisce nell'iter metodologico attraverso un processo di lettura dei malfunzionamenti dei sistemi di facciata continua, che possono essere causati da frequenti e repentini impatti da sollecitazioni esterne, rapportandosi in special modo con gli eventi estremi di cambiamento climatico.
Sebbene si tratti di una matrice di carattere sperimentale, che può essere validata (in seguito ad attività di manutenzione e testing) e continuamente aggiornata, si vuole gettare le basi per la sua applicazione come strumento di valutazione che definisce gli aspetti fondamentali tecnici e problematici nell'ambito delle prestazioni a lungo termine delle facciate continue. Per questi motivi, si sottolinea una possibile implementazione della matrice come prospettiva futura e campo aperto per la ricerca.
I criteri a supporto della metodologia che ha permesso l'avvio per lo sviluppo delle schede derivano da aspetti *misurabili* e non *misurabili.* Attraverso questa distinzione si vuole riferire ai primi, la natura quantitiva dei test che misurano, ad esempio, la quantità d'acqua che si infiltra all'interno delle facciate continue, mentre con aspetti non misurabili si intende 'di quanto' un elemento o un componente fallisce rispetto alla problematica relativa della tenuta all'acqua. In questo caso, il guasto ad una sigillatura non viene misurato con alcun strumento, ma viene identificato attraverso un'ispezione di tipo visivo.
Questo approccio potrebbe risultare funzionale nella definizione di possibili strategie progettuali e tecnologiche in termini di funzionamento e gestione adattiva delle facciate continue, sottoposte a continue variazioni e sollecitazioni climatiche. Ciò deriva dal fatto che, se i progettisti pensassero già nella fase di progettazione che durante la vita utile di questi sistemi, le loro caratteristiche prestazionali cambiano nel tempo, faciliterebbero le le operazioni di manutenzione in previsioni di guasti e fallimenti dovuti agli agenti atmosferici.
Oltre a questo, il processo di valutazione delle prestazioni non può essere limitato al superamento dei soli test di permeabilità all'aria e alla tenuta all'acqua, in quanto circoscrive la lettura dei deficit rispetto i requisiti prestazionali appena citati.
Avere a disposizione un quadro conoscitivo dei fallimenti e dei possibili degradi della facciata continua, definiti nelle condizioni di esercizio, potrebbe aiutare gli attori e gli stakeholder del settore a prevenire eventuali guasti e, soprattutto a conoscere le cause che, in alcuni casi, sono riconoscibili e quindi evitabili.

Perseguendo gli obiettivi della ricerca che mirano ad avanzare la conoscenza delle caratteristiche prestazionali delle facciate continue rispetto alle dinamiche di cambiamento climatico per la Regione del Mediterraneo, l'apporto della matrice sperimentale può essere

sostanziato nell'utilizzo come report di natura tecnica e strumentale a fronte di sopralluoghi in cantieri di costruzioni di facciate continue prima (*ex-ante*) che la progettazione si concluda per validare le prestazioni del sistema, oltre ai test su porzioni di facciata (a cui si dedica il successivo paragrafo).
Tuttavia, se le *radici* su cui si può innestare e applicare la matrice sperimentale sembrano essere differenti e molteplici, si vuole precisare che l'apporto significativo di questa analisi si definisce nell'avanzamento della conoscenza delle problematiche più rilevanti che investono i sistemi di facciata continua in relazione ad eventi di sollecitazione estrema che nel prossimo futuro saranno sempre più frequenti e intensi.

Entrando nello specifico della matrice di carattere sperimentale, la scheda, che rappresenta il suo elemento costitutivo, viene strutturata nel seguente modo:

- Nome del criterio che corrisponde al deficit prestazionale, identificato con il codice C e il numero progressivo (ad esempio C.1, C.2);

- Nella parte alta celeste vengono specificate la tipologia di facciata continua (a montanti e traversi o a cellula), la tipologia di vetro (basso-emissivo, selettivo, doppio vetro, triplo vetro), il numero di apribili e l'anno di costruzione della facciata;
- Nella parte alta grigia chiaro viene data l'indicazione sulla tipologia di funzione dell'edificio: edifico per uffici, residenziale, commerciale, scolastico, turistico-ricettivo;

- La sezione grigio scuro ha bisogno delle specifiche per comprendere in che modo viene indagato il fallimento prestazionale. Difatti, per le schede relative ai criteri di infiltrazione all'acqua e perdite d'aria, nella sezione viene indicata la normativa di riferimento che attesta le prestazioni della facciata continua rispetto la tenuta all'aria e all'acqua; ciò consente di avere dei dati e delle informazioni sicure rispetto le caratteristiche prestazionali del sistema analizzato che è stato sottoposto a procedure di prova seguendo la normativa di settore. Per le schede relative ai degradi dei giunti, sigillanti e guarnizioni, visto che l'analisi può essere visiva, la sezione riporta le informazioni sulle caratteristiche tecniche della tipologia del sigillante o delle guarnizioni utilizzati come elementi caratterizzanti la tenuta della facciata continua. I dati sono relativi alla base chimica del prodotto, alla sua temperatura di servizio, all'allungamento a rottura e al modulo di elasticità, caratteristiche rilevanti il corretto funzionamento di questi elementi quando messi a sistema;

- Nella parte centrale della scheda, attraverso un rilievo fotografico, vengono fornite informazioni a livello visivo sulla facciata continua, sul posizionamento delle sigillature, dei giunti e delle guarnizioni e sui degradi, ove possibile rilevare la zona degradata. Risulta importante sottolineare che, un limite al processo di manutenzione e ripristino degli elementi che hanno causato un fallimento della facciata continua è dato dalla difficoltà di disinstallare i profili metallici o le lastre di vetro, se non si dispone di attrezzature idonee e quindi di operai qualificati e specializzati;

- La parte sottostante il rilievo fotografico indica la descrizione del danno e le cause che lo hanno determinato. Tuttavia, a causa della complessità dei fattori che interagiscono al fallimento degli elementi dei sistemi di facciata continua, risulta difficile indicare con esattezza la causa del degrado, quindi si ipotizza l'origine del fallimento al fine di identificare i possibili interventi correttivi. Le cause sono indicative ed esplicative di un degrado ma sarà comunque necessaria un'indagine più approfondita per accertarsi delle cause, soprattutto se possono determinare altri danni;

- L'indicatore di prestazione sta ad indicare il livello del danno permettendo di determinare il decadimento prestazionale della facciata continua in relazione a ciascun criterio;

- La scala di amplificazione del danno viene intesa come uno strumento che rileva se il degrado può influenzare negativamente le condizioni strutturali del sistema di facciata, comportando delle conseguenze più gravi che compromettono le condizioni di sicurezza dell'intero edificio e degli occupanti. I riferimenti della scala si distinguono in tre livelli: *basso*, *medio* e *alto*, quindi da un impatto zero quasi nullo, ad uno di tipo intermedio che sta a significare un possibile innesco di fallimenti alla struttura fino alla soglia massima che identifica che il degrado stesso è stato la concausa di problematiche e danni strutturali, richiedendo quindi degli interventi per ripristinare l'efficienza e il funzionamento della struttura;

- L'ultima sezione della scheda riporta indicazioni sui possibili interventi di ripristino del degrado. Si vuole mettere in luce come le attività di riparazione prevedono la manodopera di operai e ditte specializzati, in grado anche di controllare l'efficacia degli interventi e di conseguenza della funzionalità degli elementi ripristinati.

Nella pagina seguente, si riporta la scheda tipo della matrice sperimentale [Fig. 5.15], come esemplificazione della strutturazione proposta.

Rispetto a degradi sopra menzionati, le schede fanno riferimento ai seguenti criteri di deficit prestazionali: C.1_ Infiltrazioni d'acqua, C.2_ Perdite d'aria, C.3_ Degrado dei sigillanti e delle guarnizioni e C.4_ Degrado dei giunti di dilatazione [Allegato 3].
La schedatura può essere implementabile con altri criteri già evidenziati precedentemente quali: corrosione, delaminazione del vetro, rottura del vetro.
Questa indagine che ha portato alla strutturazione di schede sui degradi, identificando criteri di deficit prestazionali viene intesa come uno strumento utile al processo sistemico di analisi sulle possibili cause e azioni di riparazioni correttive per affrontare correttamente la causa principale dei diversi fallimenti prestazionali delle facciate continue.
I progettisti, i produttori e gli installatori possono avere a disposizione questa schedatura nelle fasi di installazione e di manutenzione al fine di verificare le problematiche che comportano danni più estesi in questi tipi di sistemi. In aggiunta, questa classificazione può essere la base di un report tecnico quando si verificano le prestazioni delle facciate, nello specifico per le infiltrazioni all'acqua e le perdite d'aria e servire da supporto agli attori della progettazione, produzione e installazione per il corretto funzionamento dei sistemi di facciata continua. Un ulteriore aspetto positivo può essere rappresentato dal fatto che la scheda può essere immessa in programma di modellazione come il BIM, fornendo le indicazioni dei degradi più ricorrenti delle facciate, mettendo anche in evidenza quali tipologie di prodotti quali sigillanti, guarnizioni falliscono più velocemente rispetto quanto indicato dalla produzione. In un software, la scheda potrebbe essere implementata con informazioni a livello dimensionale di una facciata continua, orientando la progettazione verso soluzioni ottimali che rispecchiano le azioni correttive proposte. Indipendentemente dalla causa del fallimento, si mette in evidenza l'importanza dell'indagine attraverso attività di testing specifiche per ciascuna delle potenziali cause identificate al fine di dare una corretta misura delle prestazioni delle facciate continue.

Per questi motivi, il paragrafo successivo è dedicato alle attività di testing, necessarie per validare le performance dei sistemi di facciata continua. Ai fini degli obiettivi della ricerca l'analisi su casi studio intende indirizzare lo sviluppo di un protocollo che possa guidare la progettazione delle facciate continue, sviluppando delle metodologie di prove ad hoc per gli effetti derivanti dal cambiamento climatico.

Criterio C.X_ Nome Criterio

Tipologia di facciata continua: XXX **Tipologia di vetro:** XXX	**Numero apribili:** XXX **Anno di costruzione:** XXXX	**C.X**

Tipologia di edificio: ☐ Edificio per uffici ☐ Edificio residenziale ☐ Edificio scolastico ☐ Edificio commerciale ☐ Edificio turistico-ricettivo

NORMATIVA EUROPEA/AMERICANA - INFORMAZIONI TECNICHE DEL PRODOTTO

XXXXXX

CLASSIFICAZIONE

FOTO EDIFICIO	FOTO DELLA PARTE O ZONA IN CUI SI VERIFICA LA CRITICITA'

Descrizione: XXX

Cause: XXX

INDICATORE DI PRESTAZIONE

Livello del danno: XXX

SCALA DI AMPLIFICAZIONE DEL DANNO

☐ ***Basso***: XXX
☐ ***Medio***: XXX
☐ ***Alto***: XXX

Possibili interventi:
XXXX

5.3 Le attività di testing su sistemi di facciata continua

"Performance testing of a curtain wall sample prior to production can be a useful tool in identifying fabrication or design weaknesses before they are built into the site wall and difficult to correct."[44]
[CMHC, 2004, Cap. 5, p. 1]

Premessa

Dallo scenario sui deficit prestazionali più ricorrenti dei sistemi di facciata continua, risulta necessario un controllo misurabile e certificabile in grado di valutare quantitativamente la risposta prestazionale dei suddetti sistemi in funzione di nuovi quadri di performance legati a condizioni ambientali esterne in continuo mutamento.

Come precedentemente affermato, all'atto della posa in opera, si assiste spesso a un peggioramento delle prestazioni delle facciate continue rispetto a quanto atteso in sede di progetto, derivato dalla mancanza di un adeguato controllo di qualità.

Pertanto, la valutazione è essenziale per minimizzare il rischio di problemi indesiderati che possono avere un impatto negativo sul rendimento prestazionale durante la vita utile prevista dell'edificio. Nello specifico, i fallimenti più comuni e costosi (in quanto si richiede una manodopera specializzata) associati alle prestazioni in servizio delle facciate continue possono essere attribuiti alle perdite d'aria e alle infiltrazioni d'acqua e si prospetta un aumento di queste problematiche a fronte degli eventi estremi di cambiamento climatico associati ad un aumento di temperature e all'intensità di precipitazioni e carico da vento (a cui si rimanda per specifiche al Cap. 2). Infiltrazioni d'acqua e perdite d'aria vengono qui intesi e classificati come criteri che individuano delle criticità in riferimento a specifici elementi che costituiscono il sistema di facciata continua, quali profili in alluminio, sigillanti, guarnizioni e giunti di tenuta delle lastre di vetro.

Proprio per le caratteristiche complesse derivanti da una forte innovazione che investe i trend del mercato per lo sviluppo delle facciate continue, le attività di testing assumono particolare rilevanza, in quanto processo che permette di verificare e simulare 'dal vero' condizioni di esercizio di un involucro edilizio rispetto a specifiche condizioni del contesto di riferimento. Tale processo rappresenta quindi uno strumento utile sia in fase di progettazione sia in fase di costruzione, in quanto permette agli attori coinvolti (progettisti, produttori, installatori) di prevedere il comportamento dei sistemi testati (prima della messa in opera), di controllare la corrispondenza delle reazioni da parte del progetto stesso ma anche di sperimentare soluzioni tecnologiche alternative per implementarne le prestazioni.

Per quanto concerne le prove che si effettuano in laboratori specializzati mediante specifici macchinari e strumentazioni, è indispensabile ricorrere alla costruzione di *mock-up*[45] in scala 1:1, che rappresentano e replicano sezioni o porzioni del sistema di facciata continua o di involucro edilizio, sui quali vengono riprodotte condizioni ambientali simulate, come pioggia, vento, temperature estreme e l'esposizione sismica [Ilter, et al., 2015].

Il mock-up viene sottoposto a una sequenza di test[46] (a cui si fa riferimento nel primo paragrafo) la cui risposta prestazionale a ciascun test viene misurata secondo specifiche dettate dalla sequenza di prove dettata dalla normativa che, in genere, comprende la resistenza alle permeabilità all'aria e alla tenuta all'acqua in regime statico e, quando richiesta, anche quella in regime dinamico. Le prestazioni strutturali sotto il carico del vento e la resistenza agli stress termici mediante lo svolgimento di cicli differenziali di temperatura sono considerate prove aggiuntive e non obbligatorie alla verifica delle performance di un mock-up.

Per queste ragioni, i metodi di prova standard potrebbero non essere sufficienti a specificare tutti i requisiti di un programma di prove di testing per quanto riguarda la valutazione di alcune prestazioni. Risulta quindi, necessario incardinare nuovi indicatori prestazionali nelle metodologie di prova normate, al fine di definire uan reale risposta prestazionale rispetto questa tipologia di sistemi.

Fig. 5.15. Nella pagina accanto: Scheda tipo della matrice sperimentale. Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Come detto precedentemente, si vuole sottolineare la mancanza di una procedura di prova standard che misuri le prestazioni a lungo termine delle facciate continue; ciò risulta necessario in ragione delle variabili climatiche che provocano effetti di cambiamento climatico influenzando negativamente le prestazioni delle facciate continue (Cfr. Cap. 3).
Difatti, i test sui mock-up forniscono un'indicazione delle prestazioni della facciata continua solo nel momento in cui è nuova e non tengono conto delle condizioni di servizio [Kaskel, et al., 1998], in cui raramente i giunti si presentano sigillati e svolgono la loro funzione di tenuta (a causa dell'invecchiamento), determinando un deficit associato ad una possibile infiltrazione d'acqua e/o ad una perdita d'aria.

Per queste ragioni, l'obiettivo della ricerca si spinge verso lo sviluppo di un nuovo protocollo di prova, in linea con la procedura della normativa americana, che tenga conto di specifiche sollecitazioni di cambiamento climatico della Regione del Mediterraneo.
Nello specifico, per la fase sperimentale, condotta su una facciata continua (a cui viene dedicato il capitolo successivo), le sollecitazioni derivanti dagli impatti di cambiamento climatico rappresentano nuovi indicatori prestazionali a lungo termine, in grado di misurare la reale risposta prestazionale della facciata continua presa in esame. Il protocollo vuole essere inteso come strumento capace di rispondere alla difficoltà di leggere dinamicamente le interazioni tra involucro edilizio e cambiamento climatico.
Il concetto 'Building envelope *versus* Climate change' (indagato nel Cap. 3) si configura come un nuovo requisito associato alla durabilità delle facciate continue rispetto a condizioni climatiche estreme, individuando i limiti o i deficit prestazionali. Sebbene la norma di prodotto EN 13830:2015+A1:2020 (a cui si fa riferimento nel primo paragrafo) specifica i requisiti delle facciate continue, nell'ambito delle attività di testing, i requisiti prestazionali devono essere stabiliti caso per caso, in quanto dipendono dalla tipologia e dalle dimensioni della facciata continua e dal contesto di riferimento, che spesso non coincide con le condizioni ambientali del contesto in cui è collocato il laboratorio di prova.
In questo senso, si vuole mettere in evidenza la necessità di affiancare o implementare alle procedure standard delle prove aggiuntive e delle modifiche rispetto alle soglie prestazionali garantite da normative, al fine di verificare e validare un alto livello di qualità prestazionale nelle condizioni di esercizio della facciata continua in regime di cambiamento climatico.

Prima di addentrarci nella trattazione sulla costruzione e successiva validazione del protocollo di prova mediante l'attività di sperimentazione (che sarà ampiamente argomentata nel prossimo capitolo) che rappresenta il *corpus* fondante della presente ricerca, appare utile strutturare uno scenario sulla misurabilità delle prestazioni delle facciate continue, basato su procedure di prova standard.
Dalle attività di testing condotte su sistemi di facciata continua, delle tipologie *unitized* e *stick system*, si è costruito un repertorio critico per mettere in evidenza il comportamento funzionale dei sistemi su soglie prestazionali definite dalle normative americana ed europea. Questa attività di ricognizione dei nodi critici messi in evidenza dalle prove sulle facciate è orientata a definire una modalità di confronto delle risposte prestazionali riferite alle diverse tipologie di facciate. Ciò serve ad orientare la definizione di un'adeguata valutazione delle performance delle facciate continue. L'attività di testing e i relativi risultati - descritti nel prosieguo insieme ad un dettagliato percorso metodologico fondamentale per rafforzare l'obiettivo della ricerca - danno conto dell'effettiva necessità di modificare gli approcci alla progettazione attraverso la sperimentazione su facciate continue capaci di gestire in modo efficiente i diversi effetti del cambiamento climatico.
Dal quadro analitico, si espone il criterio con cui è stato scelto il caso studio di facciata continua, considerata sistema vulnerabile rispetto ad eventi climatici repentini e estremi,

su cui si orienteranno le attività di simulazione e testing al fine di costruire un protocollo metodologico di prove che possano leggere le risposte prestazionali della facciata continua analizzata associando l'evento estremo di cambiamento climatico della Regione del Mediterraneo.

Repertorio critico prestazionale su sistemi di facciata continua della tipologia Unitized e Stick System

Uno degli obiettivi della ricerca è fornire una revisione sistematica delle innovative soluzioni tecnologiche e delle caratteristiche prestazionali, con un focus sulle facciate continue della tipologia unitized e stick system (a cellula e montanti e traversi), in quanto queste risultano le più richieste nei trend del mercato (Cfr. 5.1.1).
A fronte di tale scenario, le attività di testing e sperimentazione su facciate continue di aziende leader nel settore mirano a comprendere le performance tecnologiche e i loro effetti ambientali ed individuare i possibili deficit (in riferimento al quadro di analisi descritto nel precedente paragrafo) che possono compromettere il funzionamento complessivo dell'involucro. Inoltre, questa articolata attività applicativa e operativa, nella messa a punto di procedure di prova normate, vuole essere una solida base su cui strutturare il protocollo metodologico per la fase sperimentale della ricerca, con l'obiettivo di sviluppare una nuova metodologia di prova che prenda in considerazione gli effetti degli eventi estremi di cambiamento climatico per la Regione del Mediterraneo.

Dai risultati delle prove condotte, si è costruito un repertorio critico inteso come strumento sistematico e modello informativo nella selezione di tecnologie innovative performanti rispetto a sollecitazioni ambientali imposte da procedure standard da normativa e che possa essere esteso e adottato in base a specifici criteri progettuali e ambientali.
Gli sforzi della ricerca tendono ad incrementare l'innovazione nel campo di sistemi, materiali ed elementi delle facciate continue che siano in grado di evitare importanti perdite in termini di proprietà - termiche, di permeabilità all'aria, di tenuta all'acqua - che in termini di sicurezza, rispetto a sollecitazioni ambientali esterne sempre più frequenti.
Si vuole mettere in evidenza che i casi studio di facciate continue (che costruiscono il repertorio critico) fanno riferimento alle attività di prova svolte in cantiere, durante il periodo di stage presso il laboratorio di certificazione per gli involucri edilizi IRCCOS srl - I*stituto di Ricerca e Certificazione delle Costruzioni Sostenibili* - a Cassano Magnago e alle attività di testing condotte presso la Sezione *TCLab* del Building Future Lab dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria. L'opportunità di poter condurre prove di testing avanzato sulle facciate continue costituisce un vero valore aggiunto alla ricerca, concretizzando azioni di sperimentazione applicata con risultati di alta affidabilità.
Questa attività, in funzione degli step rigorosi a livello metodologico, ha portato ad un'acquisizione delle competenze tecniche in merito allo svolgimento delle procedure di prova (sia in cantiere che in laboratorio) e, in particolare a conoscere in dettaglio le strumentazioni che sono necessarie all'effettuazione di tali test. L'aspetto strumentale non è secondario agli obiettivi della ricerca: i portati dell'innovazione tecnologica dei sistemi di facciata continua spesso non corrispondono all'innovazione delle strumentazioni e delle attrezzature che leggono e misurano le prestazioni. Ad esempio, il limite nella misurazione delle prestazioni degli involucri di tipo adattivo, caratterizzati da un'alta innovazione a livello materico (denunciata nel Cap. 4), richiede nuove procedure di prova e nuove strumentazioni che siano in grado di validare le reali prestazioni del funzionamento adattivo di questi sistemi, soprattutto se il loro *adattamento* è in funzione a sollecitazioni esterne di cambiamento climatico. In questo senso, si denuncia la difficoltà di un upgrade strumentale che possa facilitare la comprensione in termini di performarce dei sistemi di facciata che devono basare il loro comportamento sulla variabilità climatica in corso.

Entrando nello specifico, le attività di prova sono state eseguite in conformità alle normative Europee e Americane per testare i requisiti prestazionali di porzioni ritenute significative (mock-up in scala 1:1) delle diverse tipologie di facciate continue.
In questa sede, la trattazione non mira alla descrizione delle diverse prove secondo la procedura dettata da normative europea o americana, in quanto l'intento è individuare i possibili deficit prestazionali delle facciate continue analizzate che si evidenziano quando queste sono sottoposte a specifiche sollecitazioni riferiti a valori normati.

Prove svolte in cantiere (on-site)
Le attività di prova svolte in cantiere non sono obbligatorie ma permettono di correggere eventuali punti critici che risultano difficili da correggere in uno stato avanzato della costruzione. Le prove condotte hanno riguardato la verifica delle facciate continue rispetto le infiltrazioni d'acqua, una delle problematiche più ricorrenti per questo tipo di sistemi.

Le procedure di prova sono state svolte in conformità alle normative europee e americane, nello specifico:

- *Tenuta all'acqua*: EN 13051:2001 Curtain Walling - Watertightness - Site test, definisce il metodo da utilizzare per verificare eventuali punti di perdita d'acqua che possono verificarsi nelle facciate continue quando sono sottoposte a un film continuo di acqua sulla superficie esterna per un periodo di tempo stabilito di 30 minuti. Le eventuali infiltrazioni d'acqua vengono segnalate tramite ispezione vsiva, con la registrazione dei punti in cui si è verificata l'infiltrazione;

- *Tenuta all'acqua sotto pressione statica*: EN 13051:2001 Curtain Walling - Watertightness - Site test –Annex B, secondo il metodo di prova descritto dalla EN 12155:2000, definisce il metodo da utilizzare per verificare eventuali punti di perdita d'acqua che possono verificarsi nelle facciate continue quando sono sottoposte a un film continuo di acqua sulla superficie esterna, applicando incrementi delle pressioni statiche positive di prova agli intervalli di tempo stabiliti. Per i primi 15 minuti, la prova viene svolta in assenza di pressione, successivamente l'incremento è pari a 50 Pa Fino a 300 Pa e da 300 Pa con incrementi di 150 Pa, di durata pari a 5 minuti per ogni intervallo fino al raggiungimento della pressione massina di prova. I risultati della prova rilevano la registrazione di eventi infiltrazioni e le relative pressioni a cui sono verificate tali infiltrazioni.
In base al risultato ottenuto, ovvero a quale pressione di prova la facciata resiste a un flusso d'acqua costante, viene associata la relativa classe prestazionale, riportata nella tabella sottostante [Tab.2]:

Classe	Pressione Pa/Durata min degli intervalli di pressione
R4	0/15; 50/5; 100/5; 150/5
R5	0/15; 50/5; 100/5; 150/5; 150/5; 200/5; 300/5
R6	0/15; 50/5; 100/5; 150/5; 150/5; 200/5; 300/5; 450/05
R7	0/15; 50/5; 100/5; 150/5; 150/5; 200/5; 300/5; 450/05; 600/5
RExxx	0/15; 50/5; 100/5; 150/5; 150/5; 200/5; 300/5; 450/05; 600/5; oltre 600/5 a intervalli di 150 Pa di 5 minuti di durata

Tab. 2. Classificazione relativa alla tenuta all'acqua sotto pressione statica delle facciate continue

- *Tenuta all'acqua secondo Hose Test*: CWCT Standard Test methods for building envelope 2005, 'Standard Method for water penetration – Hose Test' e CWCT Technical Note n. 41 'Site Testing for Watertighness', ha lo scopo di determinare la resistenza alla penetrazione

dell'acqua solo di quei giunti nell'involucro dell'edificio che sono progettati per rimanere permanentemente chiusi e a tenuta stagna. Le eventuali infiltrazioni vengono registrate tramite ispezione visiva con indicazione dei punti in cui si è verificata la perdita d'acqua.

Prove svolte in laboratorio (off-site)
I test effettuati in laboratorio verificano che il progetto del sistema di facciata continua sia in grado, se assemblato in condizioni ideali in laboratorio, di soddisfare i criteri di progettazione rispetto a tenuta all'aria e all'acqua (in regime statico e dinamico) e carico del vento (prova aggiuntiva), al fine di indentificare e correggere eventuali fallimenti del sistema.
Per effettuare le prove, i provini vengono installati direttamente sulla camera di prova a tenuta d'aria. I test fanno riferimento alla sequenza di prove (specificata nel primo paragrafo) in conformità alle normative AAMA e ASTM. Nello specifico:

- *permeabilità all'aria* ASTM E283-04: 2012 (per la classificazione), consiste nella misurazione della permeabilità all'aria del campione, quando è sottoposto a pressioni differenziali positive e negative. Per quanto riguarda i requisiti prestazionali, per le parti fisse, la prova si considera superata quando le infiltrazioni risultano minori di 0,06 CFM (ft^3/min, cubic feet for minute) mentre per le parti apribili, le infiltrazioni devono essere minori di 0,10 CFM (ft^3/min, cubic feet for minute);

- *tenuta all'acqua sotto pressione statica* ASTM E331-00:2009 (per la classificazione), consiste nell'erogazione di una quantità d'acqua costante e uniforme sulla superficie esterna del campione e nella contemporanea applicazione di una pressione di prova, per un tempo definito di 15 min, durante il quale sono registrate eventuali infiltrazione d'acqua;

- *tenuta all'acqua sotto pressione dinamica* AAMA 501.1-05-00:2007 (per la classificazione, se richiesta), in cui l'aria proveniente da un grande generatore eolico, a pressione dinamica stabilita, viene diretta verso il campione contemporaneamente ad un getto d'acqua costante, per un tempo pari a 15 minuti, durante i quali vengono registrate eventuali perdite d'acqua;

- *resistenza al carico del vento* ASTM E330-02:2010 (carico di progetto, prova aggiuntiva), consiste nel pressurizzare la camera (sia positiva che negativa) per simulare le pressioni generate dal vento. Sotto tali pressioni, il campione deve presentare una deformazione ammissibile, conservando le sue proprietà e la sicurezza per gli utenti;

- ripetizione della permeabilità all'aria per confermare la classificazione di resistenza al carico del vento;
- ripetizione della tenuta all'acqua per confermare la classificazione di resistenza al carico del vento;
- resistenza al carico del vento (condizioni di sicurezza, carico di vento aumentato).

Si specifica che per le prove svolte in laboratorio, i test di resistenza strutturale al carico del vento è stato effettuato come prova aggiuntiva proprio al fine di evidenziare possibili deficit prestazionali, quando il sistema di facciata è sottoposto a carichi eccezionali.
Si noti altresì, una differenza sostanziale nei requisiti prestazionali della tenuta all'acqua in regime statico, in riferimento alla normativa: per quella europea i risultati sono garantiti attraverso una classificazione del mock-up che rispecchia la pressione di prova raggiunta prima dell'infiltrazione d'acqua, mentre per quella americana, non esiste una vera e propria classificazione ma l'esito positivo è dettato da un'ispezione visiva che garantisce l'assenza di infiltrazione d'acqua.

Specificate in sintesi, le prove in riferimento a procedure normate, di seguito vengono riportati i risultati dei test condotti in cantiere su porzioni di facciata continua:
- *Curtain wall 1*: Stick System;
- *Curtain wall 2*: Unitized System,
e i risultati delle prove condotte in laboratorio su porzioni di facciata continua:
- *Curtain wall 3*: Stick System;
- *Curtain wall 4*: Stick System,
con l'obiettivo di evidenziare le problematiche e i malfunzionamenti rispetto ai componenti delle facciate continue, attuando un confronto critico che possa guidare la scelta della tipologia di facciata continua su cui orientare le attività di sperimentazione del caso studio ai fini degli obiettivi della ricerca costruendo un protocollo metodologico di prove che intende legare le attività di testing con i nuovi requisiti dettati dagli eventi di cambiamento climatico.

Per ogni campione di facciata continua, viene indicata la prova cui è stato sottoposto, eventuali problematiche prestazionali rilevate e quindi, una sintesi dei risultati ottenuti.

Curtain wall 1: Stick System

Il campione sottoposto a prova è della tipologia a montanti e traversi in lega di alluminio EN AW 6060- T66, con lastra di triplo vetro separati da due intercapedini di gas argon e caratterizzata da doppia camera termica e guarnizioni in EPDM. Il campione presenta delle specchiature fisse e apribili [Fig. 5.16].



Fig. 5.16. Vista esterna e interna del campione sottoposto a prova

Sul campione è stata condotta la prova di *Tenuta all'acqua nel rispetto della norma EN 13051:2001 Curtain Walling - Watertightness - Site test.*
I parametri ambientali del sito di prova sono: temperatura dell'aria 26.5°C, umidità relativa pari a 57.4% e pressione atmosferica di 101,2 kPa.
La prova sulla porzione di facciata prevede l'erogazione di un flusso d'acqua costante (32 l/min) spruzzata da una barra posta a 250 mm dalla superficie esterna del provino, per un tempo pari a 30 minuti, durante il quale si controlla il verificarsi di eventuali infiltrazioni d'acqua.
Al fine di ottenere un valido risultato sulle prestazioni della facciata è stato individuato come punto critico il giunto superiore di facciata del secondo piano; in corrispondenza di

quel giunto è stata infatti posizionata la barra per l'erogazione dell'acqua attraverso degli ugelli posizionati ad un interasse di 400 mm. Il test ha evidenziato infiltrazioni nella porzione di facciata sottoposta a prova al secondo piano e al primo piano [Fig. 5.17], riscontrate dopo circa 22 minuti di erogazione dell'acqua. Le infiltrazioni si sono manifestate con gocciolamenti nella giunzione tra traverso e montante su una specchiatura al piano secondo [Fig. 5.18] e una specchiatura al piano primo [Fig. 5.19].



Da sinistra a destra:

Fig. 5.17.Individuazioni delle infiltrazioni

Fig. 5.18. Infiltrazioni al piano secondo

Fig. 5.19. Infiltrazioni al piano primo

Sebbene questa prova abbia dato esito negativo, si vuole sottolineare che le ispezioni e i controlli eseguiti hanno individuato la probabile causa dell'infiltrazione che non dipende dal sistema di facciata continua ma al posizionamento non corretto delle copertine dei pressori al piano secondo. Per risolvere la problematica, le copertine rimosse sono state riposizionate, in quanto ostruivano il corretto scarico delle pipette [Fig. 5.20] del sistema di drenaggio che può aver causato un accumulo di acqua che a sua volta ha comportato l'infiltrazione nelle parti interne durante il test.



Fig. 5.20. Pipetta di scarico, causa dell'infiltrazione

Dopo aver effettuato le azioni correttive, è stata ripetuta la prova durante la quale non è stata riscontrata alcuna infiltrazione d'acqua durante i 30 minuti di erogazione dell'acqua né al secondo piano né ai piani sottostanti.

Sintesi Curtain wall 1: Stick System
Test: Tenuta all'acqua EN 13051:2001 Curtain Walling - Watertightness - Site test
Problematiche: Infiltrazioni riscontrate al minuto 22 in diverse zone della facciata continua
Cause: non dipendenti dal sistema ma ad un'ostruzione del sistema di drenaggio
Interventi: ripristino e verifica del corretto funzionamento del sistema di drenaggio
Ripetizione test: nessuna infiltrazione

Curtain wall 2: Unitized System

I tre campioni sottoposti a prova fanno riferimento ad un complesso edilizio costituito da due edifici (indicati per semplicità A e B per il primo edificio, C per il secondo edificio), aventi le stesse caratteristiche tipologie di facciata. Difatti, i campioni sono porzioni di facciata a cellula composte da specchiature fisse alternate con zone opache con finitura esterna in materiale composito. I profili della cornice che ingloba la cellula sono in lega di alluminio EN AW 6060- T66 e le guarnizioni interne e quelle per il vetro sono in EPDM.
Il campione dell'edificio A viene sottoposto al test di tenuta all'acqua secondo 'Hose Test', mentre per i campioni B e C viene eseguita la procedura di prova di tenuta all'acqua sotto pressione statica.

Campione A

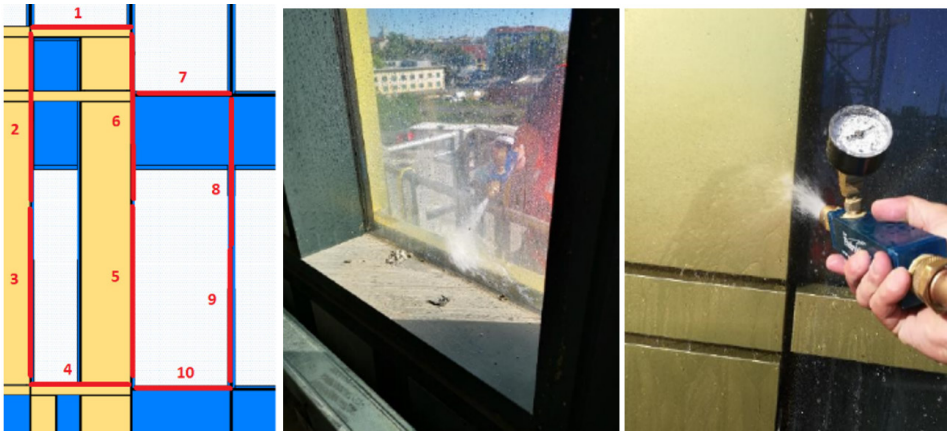
Sul campione [Fig. 5.21] è stata condotta la prova di Tenuta all'acqua in conformità a CWCT Standard Test methods for building envelope 2005, '*Standard Method for water penetration – Hose Test*'. I parametri ambientali del sito di prova sono: temperatura dell'aria 26.6°C, umidità relativa pari a 50.3% e pressione atmosferica di 99,1 kPa.



Fig. 5.21. Campione A sottoposto a prova

La prova consiste nel determinare eventuali infiltrazioni d'acqua in corrispondenza dei giunti fissi eterni, orizzontali e verticali della porzione di facciata continua identificata.
L'erogazione dell'acqua mediante lancia con ugello viene effettuata ad una distanza di circa 30 cm dalla superficie esterna del campione. Durante l'erogazione dell'acqua, i dieci giunti [Fig. 5.22], orizzontali e verticali, hanno dimostrato una buona resistenza di tenuta all'acqua e non si è verificata alcuna infiltrazione [Figg. 5.23-5.24].
Sebbene la procedura di prova non lo consente, nè lo richiede, sarebbe utile ripetere questa prova ad intervalli di tempo stabiliti e con diverse pressioni di porva, al fine di determinare la prestazione reale del sistema, soprattutto dopo un assestamento del sistema.

Sintesi Campione A - Curtain wall 2: Unitized System
Test: Tenuta all'acqua Standard Method for water penetration – Hose Test
Risultato test: nessuna infiltrazione



Da sinistra verso destra:

Fig. 5.22. Indicazione dei giunti sottoposti a prova

Fig. 5.23. Dettaglio interno del giunto testato

Fig. 5.24 Dettaglio esterno del giunto testato

Campione B

Sul campione [Fig. 5.25] è stata condotta la prova di *Tenuta all'acqua sotto pressione statica: EN 13051:2001 Curtain Walling - Watertightness - Site test –Annex B*, secondo il metodo di prova descritto dalla EN 12155:2000.
I parametri ambientali del sito di prova sono: temperatura dell'aria 27.9°C, umidità relativa pari a 49.2% e una temperatura dell'acqua di 25.0°C.

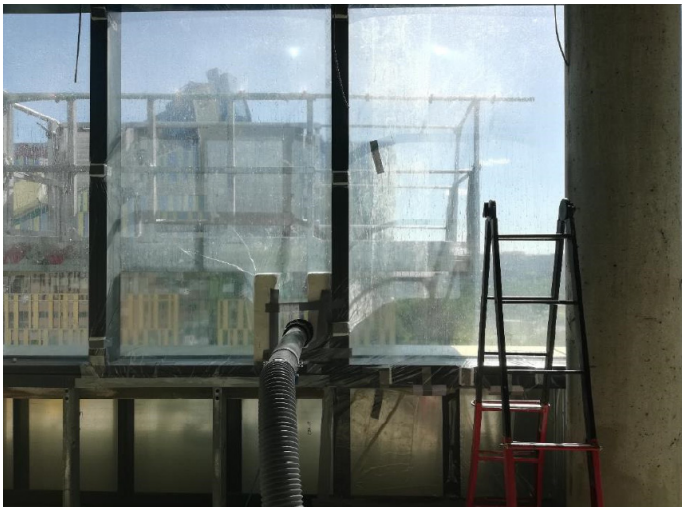


Fig. 5.25. Campione B sottoposto a prova

Sulla porzione di facciata a cellula viene erogato un flusso d'acqua, attraverso una barra posizionata ad una distanza di 250 mm dalla facciata esterna, prima in assenza di pressione per 15 minuti e successivamente gli incrementi di pressione sono pari a 50 Pa fino a 300 Pa e da 300 Pa con incrementi di 150 Pa di durata di 5 minuti per ogni intervallo fino al raggiungimento della pressione di prova stabilita.
Durante la prova, il campione ha mostrato un'ottima resistenza alla tenuta d'acqua e non ha registrato alcuna infiltrazione. Ai fini della classificazione, al campione viene assegnata la classe R7, ciò significa che ha raggiunto con esito positivo il valore della pressione di prova max di 600 Pa senza alcuna infiltrazione e per un tempo pari a 5 min.

Sintesi Campione B - Curtain wall 2: Unitized System
Test: Tenuta all'acqua sotto pressione statica, secondo il metodo di prova EN 12155:2000
Risultato test: nessuna infiltrazione
Classificazione: R7

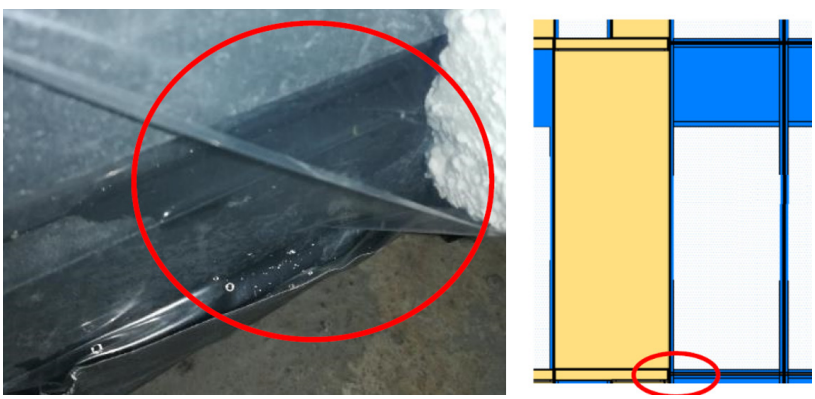
Campione C

Sul campione [Fig. 5.26] è stata condotta la prova di *Tenuta all'acqua sotto pressione statica: EN 13051:2001 Curtain Walling - Watertightness - Site test –Annex B*, secondo il metodo di prova descritto dalla EN 12155:2000.



Fig. 26. Campione C sottoposto a prova

I parametri ambientali del sito di prova sono: temperatura dell'aria 27.5°C, umidità relativa pari a 57.1% e una temperatura dell'acqua di 25.0°C.
Sulla porzione di facciata a cellula viene erogato un flusso d'acqua, attraverso una barra posizionata ad una distanza di 250 mm dalla facciata esterna, prima in assenza di pressione per 15 minuti e successivamente gli incrementi di pressione sono pari a 50 Pa fino a 300 Pa e da 300 Pa con incrementi di 150 Pa di durata di 5 minuti per ogni intervallo fino al raggiungimento della pressione di prova stabilita.
Durante la prova, alla pressione di 300 Pa al secondo minuto di erogazione dell'acqua, viene registrata un'infiltrazione in corrispondenza del giunto inferiore della cellula [Figg. 5.27-5.28] e non dipende dalle condizioni tecnologiche del sistema. Ai fini della classificazione, la cellula ha raggiunto la classe R4 rispetto la prestazione di tenuta all'acqua sotto pressione statica, in quanto conferma la prestazione testata in laboratorio.



Figg. 5.27-5.28. Infiltrazione d'acqua in corrispondenza del giunto inferiore della cellula

Sintesi Campione C- Curtain wall 2: Unitized System
Test: Tenuta all'acqua sotto pressione statica, secondo il metodo di prova EN 12155:2000
Risultato test: infiltrazione d'acqua alla pressione di prova di 300 Pa al minuto 2
Classificazione: R4

Attraverso i risultati di queste ultime prove, nello specifico per i campioni B e C, si vuole mettere in evidenza che spesso i fallimenti delle facciate continue, non dipendono dal sistema tecnologico stesso che costituisce la facciata continua ma sono correlate alla fase di assemblaggio o di posa in opera dei diversi componenti del sistema.
La qualità in termini di raggiungimento delle prestazioni di un prodotto, garantita da questo tipo di verifiche e unita ad un puntuale controllo del processo di fabbricazione del serramento, non deve essere compromessa dalla delicata e centrale fase di posa in opera. Le problematiche più ricorrenti si individuano nei giunti di tenuta all'acqua, dove è richiesto un dimensionamento tale da minimizzare questi tipi di deficit e l'applicazione di idonee sigillature che sono in grado di garantire una buona durabilità.
Da queste prime attività di test condotte in cantiere, si deduce che la questione della valutazione delle prestazioni a lungo termine delle facciate dovrebbe essere garantire da una specifica sequenze di prova, per poter attestare il comportamento positivo a sollecitazioni prolungate per un lungo periodo. Questo aspetto è il rilevante se si considerano pressioni medio-basse per testare i vari campioni (come quella di 300 Pa che ha causato un'infiltrazione) che sono condotte nel momento in cui il campione è nuovo.
Da qui risulta la necessità di sviluppare la metodologia di prova più idonea nel sollecitare ripetutamente i campioni di facciata continua al fine di dare una concreta lettura di prestazioni a lungo termine, nell'ambito dei cambiamenti climatici in atto.

Curtain wall 3: Stick System
Il mock-up della facciata continua [Fig. 29] è costituito da un telaio di montanti e traversi in alluminio caratterizzato da n. 2 apribili (superiore a sporgere, inferiore ad anta-ribalta). I profili sono in lega di alluminio EN AW 6060-T66 e le guarnizioni interne e quelle per il vetro sono in EPDM. La superficie trasparente è un sistema isolante Insulated glass units (IGU) composto da due lastre di vetro separate tra loro da un distanziatore ed ermeticamente sigillate al perimetro la cui cavità è riempita con aria.

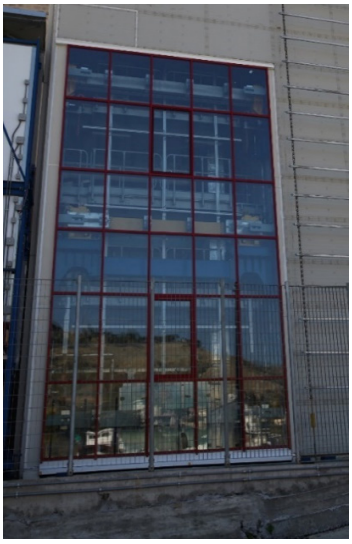


Fig. 5.29. Mock-up sottoposto a prova

Come precedentemente spiegato, per la valutazione delle prestazioni della facciata continua, è stata eseguita la sequenza di prove, secondo normativa:
- permeabilità all'aria ASTM E283-04;
- tenuta all'acqua sotto pressione statica ASTM E331-00;
- tenuta all'acqua sotto pressione dinamica AAMA 501.1-05;
- resistenza al carico del vento ASTM E330-02 (carico di progetto, prova aggiuntiva);
- ripetizione della permeabilità all'aria;
- ripetizione della tenuta all'acqua p;
- resistenza al carico del vento (condizioni di sicurezza).

La prova rispetto alla quale si è verificato un deficit prestazionale è la *tenuta all'acqua sotto pressione statica*. I parametri ambientali del laboratorio durante questa prova sono: temperatura 11.8°C, umidità relativa 30.7% e pressione atmosferica 99.8 kPa.
La prova consiste nell'erogazione di una quantità d'acqua costante e uniforme sulla superficie esterna del mock-up e nella contemporanea applicazione di una pressione positiva di prova. L'erogazione dell'acqua avviene mediante un impianto sprinkler, ovvero un dispositivo di innaffiamento costituito da una rete a maglia quadra di ugelli posizionati su piano orizzontale parallelo al piano del provino.
Sebbene il mock-up ha risposto positivamente fino ad una pressione di 12psf, 575 Pa, quando il provino è stato sottoposto ulteriormente ad un aumento della pressione (su richiesta del committente e non da specifiche procedurali) per individuare se il sistema fosse in grado di rispondere ad un incremento di pressione fino ad arrivare a 25,06 psf, 1200Pa, si sono evidenziate in alcuni punti delle infiltrazioni d'acqua che potrebbero compromettere la funzionalità dell'intero sistema [Fig. 5.30].



Fig. 5.30. Infiltrazione d'acqua a 25 psf

La causa che ha provocato questa infiltrazione è data da una guarnizione del telaio del traverso non posizionata correttamente; in questo caso, è stato effettuato il ripristino della guarnizione e il controllo del suo posizionamento al fine di poter procedere con la sequenza delle prove.
La prova di *tenuta all'acqua condotta applicando sul mock-up una pressione dinamica* di 1508 Pa per un tempo di 15 minuti non ha evidenziato alcuna infiltrazione, sottolineando un comportamento di risposta positiva del sistema.
I parametri ambientali del laboratorio durante questa prova sono: temperatura 12,1°C, umidità relativa 30,8% e pressione atmosferica 99,8 kPa.
Esito positivo si riscontra nelle prove di resistenza al carico del vento sia quando viene applicata una pressione positiva e negativa pari al 50% e al 100% del carico di vento di progetto di 2400 Pa e per la resistenza del carico da vento in condizioni di sicurezza dove la

pressione raggiunta è di 3600 Pa. Il mock-up ha presentato una deformazione ammissibile e ha conservato le sue proprietà meccaniche e strutturali per la sicurezza degli utenti.
Le prove relative alle ripetizioni di permeabilità all'aria e tenuta all'acqua confermano le prestazioni raggiunte per il carico da vento (condizioni di progetto).

Sintesi - Curtain wall 3: Stick System
Test: Sequenza di prova (permeabilità all'aria, tenuta all'acqua in regime statico e dinamico, carico da vento-prova aggiuntiva)
Focus su test: Tenuta all'acqua sotto pressione statica - metodo di prova ASTM E331-00
Risultato test: nessuna infiltrazione alla pressione di prova di 12 psf-575 Pa
Incremento Pa: Ripetizione del test con incremento pressione di prova a 25psf-1200 Pa (su richiesta)
Problematica: infiltrazione d'acqua sul traverso
Causa: guarnizione del telaio non correttamente posizionata
Interventi: ripristino guarnizione e controllo funzionamento per procedere con le ripetizioni
Ripetizione: nessuna infiltrazione
Sequenza di prova: la facciate alle pressioni e ai carichi di progetto e servizi indicati ha risposto positivamente

Curtain wall 4: Stick System
Il mock-up della facciata continua [Fig. 5.31] è costituito da un telaio di montanti e traversi in alluminio caratterizzato da n. 1 apribile verso l'esterno. I profili sono in lega di alluminio EN AW 6063 e le guarnizioni interne e quelle per il vetro sono in EPDM. A differenza del precedente mock-up, dove l'intelaiatura dei montanti e traversi è ben visibile dall'esterno, in questo mock-up sembra che le lastre di vetro siano collegate tra loro mediante silicone strutturale mentre la struttura che le sostiene è nella parte interna. La superficie trasparente è un sistema isolante Insulated glass units (IGU) composto da due lastre di vetro temperato a bassa emissività con funzione di controllo solare, separate tra loro da un distanziatore ed ermeticamente sigillate al perimetro la cui cavità è riempita con aria.



Fig. 5.31. Mock-up sottoposto a prova

La sequenza delle prove condotte è analoga al caso studio precedente:
- permeabilità all'aria ASTM E283-04;
- tenuta all'acqua sotto pressione statica ASTM E331-00;
- tenuta all'acqua sotto pressione dinamica AAMA 501.1-05;
- resistenza al carico del vento ASTM E330-02 (carico di progetto, prova aggiuntiva);
- ripetizione della permeabilità all'aria;
- ripetizione della tenuta all'acqua;
- resistenza al carico del vento (condizioni di sicurezza).

La prova di permeabilità all'aria consiste nel determinare le perdite del sistema e per il mock-up analizzato il differenziale di pressione negativa e positiva è di 6.24 psf, 300 Pa.
Il test è stato superato in quanto le perdite del sistema, in pressione negativa e positiva, sono risultate entro i limiti stabiliti dalla normativa, anche rispetto all'apribile presente nel sistema.
Per il test di tenuta all'acqua a pressione statica, la pressione di prova viene stabilita a 10 psf, equivalenti a 480 Pa, con un'erogazione costante di una quantità d'acqua per 15 minuti. La prova si è dovuta concludere ad una pressione di 300 Pa, poichè si è verificata un'infiltrazione in corrispondenza della zona inferiore del telaio dell'infisso apribile.
Per identificare la causa dell'infiltrazione e quindi procedere con l'ispezione, sono state avviate le operazioni di smontaggio della parte apribile, operazione complessa in quanto ha richiesto lo smontaggio dei traversi. Attraverso l'ispezione si è identificata la causa dell'infiltrazione [Fig. 5.32]; anche in questo caso, la problematica si riscontra nella guarnizione che non garantiva la tenuta all'acqua e all'aria in corrispondenza dell'angolo.



Fig. 5.32. Infiltrazione d'acqua a 300 Pa

Dopo le operazioni tecniche di ripristino della guarnizione, viene ripetuta la prova di tenuta all'acqua a pressione statica di 480 Pa e il mock-up non subisce alcuna infiltrazione; stesso comportamento positivo si riscontra nella prova di tenuta all'acqua in condizioni dinamiche effettuata alla medesima pressione di prova del precedente test, ovvero 480 Pa.
Per il test strutturale che verifica le prestazioni della facciata al carico del vento, sono stabilite pressioni di prova positive e negative (carico di progetto) al 50% a 651.5 Pa e al 100% fino a 1303 Pa. Per la ripetizione della prova strutturale in condizioni di sicurezza, il carico da vento corrisponde al 75% a 977.25 Pa e al 150% arriva fino a 1954,50 Pa.
A queste pressioni, il mock-up ha reagito positivamente, mostrando un comportamento flessibile alle deformazioni indotte da carichi strutturali. Le prove relative alle ripetizioni di permeabilità all'aria e tenuta all'acqua confermano le prestazioni raggiunte per il carico da vento (condizioni di progetto).

Sintesi - Curtain wall 4: Stick System
Test: Sequenza di prova (permeabilità all'aria, tenuta all'acqua in regime statico e dinamico, carico da vento-prova aggiuntiva)
Focus su Test: Tenuta all'acqua sotto pressione statica - metodo di prova ASTM E331-00
Problematica: infiltrazione alla pressione di 300 Pa nella zona inferiore della parte apribile
Causa: guarnizione di tenuta non funzionante in corrispondenza dell'angolo
Interventi: ripristino guarnizione e controllo funzionamento per procedere con le ripetizioni
Ripetizione: nessuna infiltrazione alla pressione di prova di 480 Pa
Sequenza di prova: la facciate alle pressioni e ai carichi di progetto e servizi indicati ha risposto positivamente

Discussione
La verifica mediante attività di testing in cantiere e in laboratorio risulta una componente fondamentale per la valutazione di sistemi non ancora collaudati e per contribuire alla successiva progettazione definitiva, che può essere caratterizzata da interventi migliorativi che siano in grado di implementare le performance complessive del sistema.
I risultati delle attività di prova su sistemi di facciate continue della tipologia unitized e stick system, sistematizzati sinteticamente in un repertorio critico, mettono in evidenza come la maggior parte dei fallimenti prestazionali si risconta nelle infiltrazioni d'acqua.
Questa problematica spesso è dovuta ad un'installazione non adeguata e al mancato controllo di qualità che richiede la garanzia del funzionamento delle diverse componenti che costituiscono il sistema. Pertanto, la qualità dell'installazione e la posa in opera giocano un ruolo cruciale per asseverare una serie di requisiti prestazionali imposti dalla normativa vigente. Se si prendono in considerazione le prestazioni di tenuta all'acqua sotto pressione statica del curtain wall 3 e 4, si può notare come la stessa tipologia di sistema, stick system, reagisce in modo diverso alle pressioni imposte. Il curtain wall 3 ad una pressione di 575 Pa non subisce alcuna infiltrazione, mentre una pressione più bassa di 300 Pa comporta per il curtain wall 4 una infiltrazione d'acqua che, se non risolta potrebbe amplificare il danno, causando guasti che potrebbero compromettere le prestazioni dell'intero sistema.
In questo caso, l'origine di questo deficit si riscontra nella guarnizione non aderente al telaio di tenuta del vetro, probabilmente non correttamente posizionata.
Per quanto riguarda i campioni B e C della tipologia a cellula (stesse caratteristiche prestazionali ma installati in due edifici diversi), durante la prova di tenuta all'acqua sotto pressione statica, il campione C ad una pressione di 300 Pa subisce un'infiltrazione al giunto inferiore della cellula, non dipendente dalle condizioni tecnologiche del sistema di facciata continua.
Un altro aspetto da tenere in considerazione riguarda la difficoltà di stabilire degli standard prestazionali univoci per le tipologie di facciate continue analizzate che deriva dalla complessità di mettere a sistema parametri prestazionali, definiti dalle caratteristiche stesse delle facciate continue e i parametri ambientali che dipendono dal contesto di riferimento in cui viene costruito l'edificio.
Le attività di testing condotte in linea con le procedure della normativa europea e americana non fanno riferimento ad un contesto climatico preciso e ai diversi effetti di cambiamento climatico, i cui impatti possono amplificare i danni sulle superfici esterne delle facciate continue. Comprendere i meccanismi di danneggiamento e le sfide associate alla struttura per i sistemi di facciate continue con diverse condizioni al contorno è fondamentale nella loro valutazione e selezione delle prestazioni durante la fase di progettazione e per le condizioni di servizio e sicurezza di un edificio, in particolare se vulnerabile agli effetti del cambiamento climatico.
Sebbene l'innovazione tecnologica ha guidato l'implementazione delle caratteristiche prestazionali delle facciate continue, al contempo, sono aumentati i rischi di degradi (a cui si

fa riferimento nel precedente paragrafo) o fallimenti che possono metterle in discussione, rischi accresciuti dalla complessità tecnologica e dalla richiesta di nuovi requisiti da parte dell'utenza nonché dagli scenari climatici estremi.

Prove di prestazione di facciata obbligatorie, come permeabilità all'aria, tenuta all'acqua in regime statico e dinamico, che vengono applicati ai modelli in scala 1:1 di facciate continue, possono aiutare a ottenere informazioni preliminari sulle prestazioni del sistema prima del processo di assemblaggio. Tuttavia queste prove da sole, non inquadrano le prestazioni a lungo termine delle facciate in quanto non tengono per esempio della resistenza al carico da vento o alle sollecitazioni estreme di temperatura. Se a pressioni di prova contenute di 300 Pa, il curtain wall 4 ha subito un'infiltrazione, la questione risulta problematica infatti quando si applicano carichi estremi che possono comportare un cedimento in elementi e componenti compromettendo il livello prestazionale complessivo del sistema.
Questo aspetto risulta di primaria importanza se alle prestazioni delle facciate continue si legano carichi dovuti agli impatti da cambiamento climatico.

Inoltre, il superamento di questi test non assicura che le prestazioni di durata del sistema siano le stesse dei risultati del test, in quanto le prove vengono effettuate su porzioni di facciata continua in cantiere o su mock-up in laboratorio che sono stati costruiti per essere testati e non necessariamente installati. Quantificare la resistenza delle facciate continue ai possibili deficit prestazionali è una sfida che coinvolge diversi settori, dal settore produttivo al settore delle costruzioni, soprattutto se si prendono in considerazione i diversi effetti dovuti agli impatti del cambiamento climatico.
Riprendendo la declinazione 'Building envelope *versus* Climate change' (concetto ampiamente indagato nel Cap. 3) - in cui le cui superfici esterne delle facciate continue sono maggiormente esposte alle sollecitazioni climatiche esterne e in grado di amplificare gli impatti che si generano in uno specifico contesto - lo studio della relazione che si instaura tra la facciata continua e il suo contesto di appartenenza porta quindi ad una revisione sistematica sulle modalità di misurazione e conseguente valutazione critica dei dati, spostando le questioni delle performance lontane dalle tradizionali proprietà fisiche e statiche delle facciate continue ad un discorso più ampio nella definizione di come queste realmente si comportano in regime di cambiamento climatico.
Gli sforzi della ricerca si spingono verso l'introduzione e l'applicazione di indicatori di performance innovati per la verifica prestazionale delle facciate continue, attraverso un controllo misurabile delle loro caratteristiche prestazionali, per promuovere un'innovazione metodologica procedurale che leghi requisiti tecnologici delle facciate continue e condizioni climatiche mutevoli del contesto di riferimento. Questo approccio propone come scopo l'adozione delle soluzioni tecnologiche studiate e validate per condizioni ambientali specifiche e non esportabili da un contesto all'altro senza un'analisi adeguata al comportamento funzionale e prestazionale.
L'indagine condotta su facciate continue unitized e styck system pone le basi alle attività successive della ricerca, cioè quelle di affiancare o implementare alle procedure standard delle prove aggiuntive e delle modifiche rispetto alle soglie prestazionali garantite da normative, al fine di verificare e validare un alto livello di qualità prestazionale nelle condizioni di esercizio delle facciate continue in regime di cambiamento climatico, nello specifico per temperature estreme, precipitazioni intense e intensificazione del carico da vento.
Ai fini degli obiettivi della ricerca l'analisi di verifica sperimentale su un caso studio di facciata continua intende indirizzare la strutturazione di un protocollo metodologico che possa guidare la verifica prestazionale delle facciate continue, sviluppando una metodologia di prove *ad hoc* per misurare la resistenza della facciata continue agli effetti derivanti dal cambiamento climatico per la Regione del Mediterraneo.

5.4 Criterio di scelta del caso studio

"The Unitized curtain wall is the most airtight
and weather resistant cladding and exterior wall system available.
Most of the system components are assembled in a plant under controlled working conditions.
This promotes quality assembly and allows for fabrication lead-time and rapid closure of the building."[47]
[Wong Wan Sie, 2007, p. 25]

I risultati ottenuti dalle analisi sui fallimenti e sulle caratteristiche prestazionali delle facciate continue (unitized e stick system), attraverso attività di testing, conducono ad affrontare la questione prestazionale rispetto a specifiche sollecitazioni di cambiamento climatico della Regione del Mediterraneo su uno specifico caso studio di facciata continua.
Come si evince dalla tabella [Tab. 3], sebbene le facciate continue della tipologia a cellula abbiano registrato un comportamento positivo nella prova di tenuta all'acqua rispetto ai mock-up di facciata continua a montanti e traversi, si mette in evidenza che un fallimento nelle facciate a cellule, a pressioni di prova contenute (in questo caso 300 Pa) può essere associato ai giunti di dilatazione verticali e orizzontali in corrispondenza delle connessioni delle diverse cellule che può provocare una deformazione tale da portare a rottura il vetro. Difatti, rispetto alla tipologia stick system, i sistemi unitized sono intesi come elementi più vulnerabili alle sollecitazioni esterne.

	Prove condotte in cantiere (on-site)		Prove condotte in laboratorio (off-site)	
Test eseguiti	Curtain wall 1: Stick System	Curtain wall 2: Unitized System	Curtain wall 3: Stick System	Curtain wall 4: Stick System
Permeabilità all'aria			ASTM E283-04 (2012) Pressione di prova: 300 Pa	ASTM E283-04 (2012) Pressione di prova: 300 Pa
Tenuta all'acqua Pressione statica	EN 13051:2001 Infiltrazioni riscontrate al minuto 22 in diverse zone della facciata continua	*Campione A*: Hose Test, nessuna infiltrazione *Campione B*: EN 12155:2000, nessuna infiltrazione *Campione C*: EN 12155:2000, infiltrazione a 300 Pa	ASTM E331-00 (2009) Nessuna infiltrazione alla pressione di 575 Pa; Incremento pressione (su richiesta): infiltrazione a 1200 Pa	ASTM E331-00 (2009) Infiltrazione alla pressione di 300 Pa; Ripristino guarnizione: nessuna infiltrazione a 480 Pa
Tenuta all'acqua Pressione dinamica			AAMA 501.1-05-00 (2007) Pressione di prova: 1508 Pa	AAMA 501.1-05-00 (2007) Pressione di prova: 480 Pa
Resistenza al carico da vento (condizioni di progetto)			ASTM E330-02 (2010) - 100%: 2400 Pa	ASTM E330-02 (2010) - 100%: 1303 Pa
Ripetizioni			ASTM E283-04 (2012) ASTM E331-00 (2009)	ASTM E283-04 (2012) ASTM E331-00 (2009)
Resistenza al carico da vento (condizioni di sicurezza)			ASTM E330-02 (2010) - 150%: 3600 Pa	ASTM E330-02 (2010) - 150%: 1954,50 Pa

Tab. 3. Riepiologo risultati delle attività di testing condotte sui casi studio

Pertanto, il *criterio* che indirizza la scelta della tipologia della facciata continua da analizzare a livello sperimentale per verificare il comportamento prestazionale in regime di cambiamento climatico per la Regione del Mediterraneo, si basa sull'effettiva capacità della facciata di reagire in modo positivo a continue sollecitazioni esterne, facendo riferimento alle infiltrazioni subite dalla tipologia unitized system a pressioni di prova contenute.
Questa deformazione, può mettere in crisi le prestazioni complessive dell'edificio, metten-

do in evidenza la necessità di studiare il comportamento della facciata continua in modo tale da resistere agli agenti atmosferici, che per gli obiettivi della ricerca, sono riferiti ad un'amplificazione degli effetti dovuti a temperature estreme, precipitazioni intense e intensificazione del carico da vento.
La scelta quindi ricade sulla tipologia *unitized system* [Fig. 5.33], che a differenza della facciata continua a montanti e traversi, una prima fase del controllo di qualità nel suo assemblaggio avviene in condizioni controllate di fabbrica. La sua facilità di installazione è un altro fattore da mettere in conto, soprattutto per le attività di sperimentazione in laboratorio, in quanto se si verifica una problematica prestazionale (ad esempio un'infiltrazione in una cellula), si riducono i tempi di ripristino e riposizionamento dell'elemento guasto.
Tuttavia, come precedentemente analizzato, il comportamento della facciata dipende dalla sua posa in opera e risulta necessario studiarla rispetto a procedure normate ma con l'adozione di specifici parametri che tengano contro della risposta prestazionale della facciata a cellula agli eventi estremi di cambiamento climatico.
La III parte della tesi dottorale descrive l'attività di sperimentazione condotta sul mock-up di facciata a cellula, il cui dimensionamento è risultato del processo di progettazione realizzato con l'azienda Cianciolo Group s.r.l., azienda Partner del TCLab che ha costruito il mock-up ai fini della verifica delle caratteristiche prestazionali a livello sperimentale.

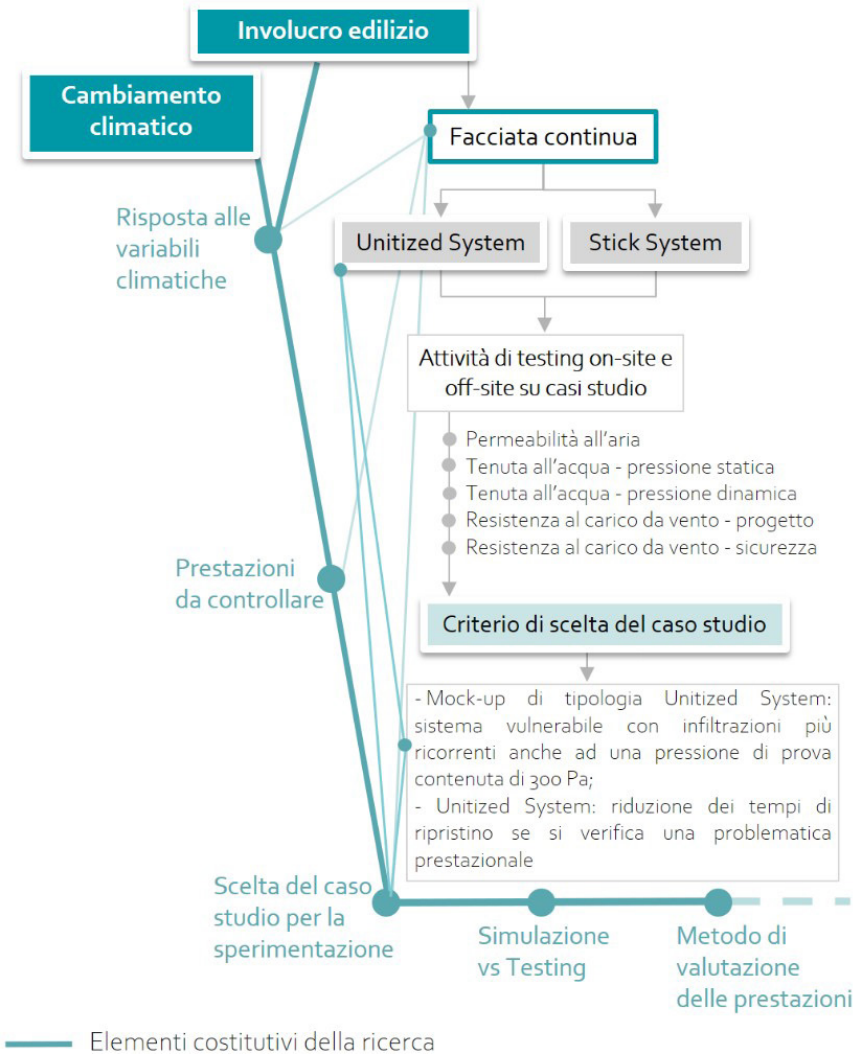


Fig. 5.33. Flow chart: La scelta della tipologia di facciata continua come caso studio per la sperimentazione. Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Conclusioni

L'analisi avviata in questo capitolo, sulle prestazioni delle facciate continue, ha portato all'identificazione dei principali deficit e fallimenti che questi sistemi possono subire a causa di una sollecitazione esterna che può compromettere le performance complessive del sistema. I deficit più ricorrenti si rilevano nelle perdite d'aria, nelle infiltrazioni d'acqua causate spesso dal degrado dei componenti che costituiscono il sistema di tenuta delle facciate continue, quali giunti, sigillanti e guarnizioni. Per quanto riguarda le guarnizioni, il cui materiale più utilizzato è l'EPDM, bisogna considerare due aspetti: il primo fa riferimento alla deformazione degli elementi dell'intelaiatura che può mettere in crisi la tenuta all'acqua del sistema e il secondo riguarda l'acqua da precipitazione che, concentrandosi in prossimità dei giunti, può provocare l'infiltrazione nella parte interna del sistema con il rischio di provocare danni alla superficie trasparente del vetro.
Questa attività ha condotto alla strutturazione di schede sui degradi prestazionali delle facciate continue, identificando criteri di deficit prestazionali: C.1_ Infiltrazioni d'acqua, C.2_ Perdite d'aria, C.3_ Degrado dei sigillanti e delle guarnizioni e C.4_ Degrado dei giunti di dilatazione [Allegato 1].
La classificazione, che può essere implementabile con altre tipologie di degrado (corrosione, delaminazione e rottura del vetro, stress termico) viene intesa come uno strumento utile al processo sistemico di analisi sulle possibili cause e azioni di riparazioni correttive per affrontare correttamente la causa principale dei diversi fallimenti prestazionali delle facciate continue. I progettisti, i produttori e gli installatori possono avere a disposizione questa schedatura nelle fasi di installazione e di manutenzione al fine di verificare le problematiche che comportano l'amplificazione di danni più estesi in questi tipi di sistemi.
Tuttavia, dallo scenario dei deficit, emerge la necessità di un controllo misurabile in grado di valutare quantitativamente la risposta prestazionale delle facciate continue in funzione di nuovi quadri di performance legati a sollecitazioni ambientali esterne.
Proprio per le caratteristiche complesse derivanti da una forte innovazione che investe i trend del mercato per lo sviluppo delle facciate continue, le attività di testing in regime simulato assumono particolare rilevanza, in quanto processo che permette di verificare e simulare 'dal vero' condizioni di esercizio di un involucro edilizio in conformità alle procedure di prova dettate da normative europee e americane.
Le attività di testing svolte in cantiere e presso la sezione del laboratorio TCLab, hanno riguardato 4 mock-up di facciata continua della tipologia a montanti e traversi e a cellula. I risultati delle prove sintetizzati in un repertorio critico, hanno messo in evidenza come la maggior parte dei fallimenti prestazionali delle facciate continue si risconta nelle infiltrazioni d'acqua. Questa problematica spesso è dovuta ad un'installazione non adeguata delle guarnizioni di tenuta all'acqua e al mancato controllo di qualità che richiede la garanzia del funzionamento delle diverse componenti che costituiscono il sistema.
Un aspetto da tenere in considerazione ai fini degli obiettivi della ricerca, riguarda le attività di testing che, sebbene siano condotte in linea con le procedure della normativa europea e americana, queste non fanno riferimento ad un contesto climatico preciso e ai diversi effetti di cambiamento climatico, i cui impatti possono amplificare i danni sulle superfici esterne e in termini strutturali delle facciate continue.
L'input dato dalle attività di testing sui diversi mock-up di facciata continua pone le basi alle attività successive della ricerca, cioè quelle di affiancare e implementare alle procedure standard delle prove aggiuntive e delle modifiche rispetto alle soglie prestazionali garantite da normative, al fine di verificare e validare un alto livello di qualità prestazionale nelle condizioni di esercizio delle facciate continue in regime di cambiamento climatico, nello specifico per temperature estreme, precipitazioni intense e intensificazione del carico da vento.

La ricerca in oggetto si pone quindi l'obiettivo di sviluppare un protocollo metodologico che possa guidare la verifica prestazionale delle facciate continue, sviluppando una metodologia di prove ad hoc e calibrata per misurare la resistenza di questi sistemi agli effetti derivanti dal cambiamento climatico per la Regione del Mediterraneo.
Al fine di intraprendere l'attività sperimentale che comporta lo studio delle prestazioni di una facciata continua rispetto sollecitazioni esterne derivanti dagli impatti di cambiamento climatico, il criterio che indirizza la scelta della tipologia della facciata continua da analizzare, viene definito in base ai risultati delle prove condotte sui mock-up di facciata continua e si riscontra nella capacità del sistema di rispondere alle infiltrazioni d'acqua, identificato come uno dei criteri di deficit prestazionali più ricorrenti delle facciate continue.
Sebbene i risultati confermano un comportamento positivo alla tenuta d'acqua delle facciate a cellula rispetto quelle a montanti e traversi, si mette in evidenza come una sollecitazione estrema (ad esempio le precipitazioni intense) possono provocare dei danni ai giunti di tenuta delle diverse cellule, compromettendo le condizioni di sicurezza del sistema. Questo aspetto viene messo in evidenza dal curtain wall 2, della tipologia di facciata a cellula, che ad una pressione di prova di 300 Pa, ha subito un'infiltrazione d'acqua, facendo emergere la necessità di studiare il suo comportamento a sollecitazioni repentine e intense. Analizzati quindi gli eventi estremi e i deficit che questi potrebbero comportare sulle prestazioni delle facciate continue, la scelta ricade sulla tipologia a cellula.
Il processo di design del mock-up strutturato con l'azienda Cianciolo Group s.r.l. e lo sviluppo di una metodologia di prova che possa leggere le prestazioni del mock-up rispetto ad eventi estremi di cambiamento climatico rappresentano il corpus della fase applicativa e sperimentale della ricerca.

Inquadramento della II Parte della Ricerca all'interno del Technology Readness Levels TRLs

Inquadrare il IV e il V capitolo, costitutivi della seconda parte della tesi di dottorato, all'interno del Technology Readness Levels TRLs significa monitorare le fasi operative e applicative della ricerca in riferimento ad una struttura metodologica e agli obiettivi che si intendono raggiungere. Prima di definire il livello di maturazione tecnologica, sembra utile riportare, in sintesi, alcuni concetti-chiave rispetto ai capitoli IV e V.

Il *IV capitolo* propone una revisione critica sul ruolo strategico dell'involucro edilizio, capace di gestire le interazioni che si creano tra edificio e il suo contesto, ai fini dell'ottenimento del comfort termico e del miglioramento delle prestazioni complessive dell'edificio.
Difatti, l'involucro edilizio, o meglio dire la facciata dell'edificio, diventa driver di innovazione per lo sviluppo di tecnologie e materiali che siano capaci di rispondere alle sollecitazioni esterne. Per gli obiettivi della ricerca rispetto al modo in cui l'involucro consente una risposta prestazionale agli effetti di cambiamento climatico, l'attenzione si concentra sull'aspetto adattivo che le facciate possono ottenere attraverso l'incorporazione di materiali e tecnologie avanzate.
Da una analisi della letteratura, si evince che le facciate adattive possono cambiare configurazione geometrica mediante l'utilizzo di sistemi meccanizzati come gli attuatori o attraverso le proprietà intrinseche del materiale di cui sono costituiti.
L'analisi si concentra sulla seconda categoria, che comprende gli *smart system*, materiali attivi e avanzati che non hanno bisogno di complessi sistemi elettromeccanici o fornitura di energia, per cambiare la loro configurazione e adattarsi alle sollecitazioni esterne. Dalla letteratura di settore, i casi studio riferiti agli smart materials, vengono messi a sistema con la loro capacità di un controllo del flusso termico, luminoso, del flusso d'aria e d'acqua.
Il quadro di sintesi costruito sull'identificazione dei materiali che potrebbero contribuire

ad una risposta adattiva degli involucri edilizi vuole essere inteso come base per possibili soluzioni tecnologiche adattive e come strumento di riferimento per l'acquisizione delle conoscenze in merito all'innovazione e all'applicazione degli smart materials sulle facciate in un clima in continuo mutamento.
Sebbene il IV capitolo basa la sua articolazione su una revisione critica sull'involucro edilizio di tipo adattivo, si restringe il campo di indagine sugli smart materials, come materiali tecnologicamente avanzati in grado di garantire una risposta positiva agli stress indotti dal cambiamento climatico.
Pertanto, il quarto capitolo può essere letto nel livello *TRL 1 Basic Research* (Principi di base osservati) [Fig. 5.33], in quanto attraverso la conoscenza di base sugli involucri edilizi adattivi, si mette in evidenza una traiettoria da perseguire, ovvero l'adozione di smart materials, per garantire il raggiungimento delle prestazioni degli involucri edilizi rispetto agli eventi estremi di cambiamento climatico.

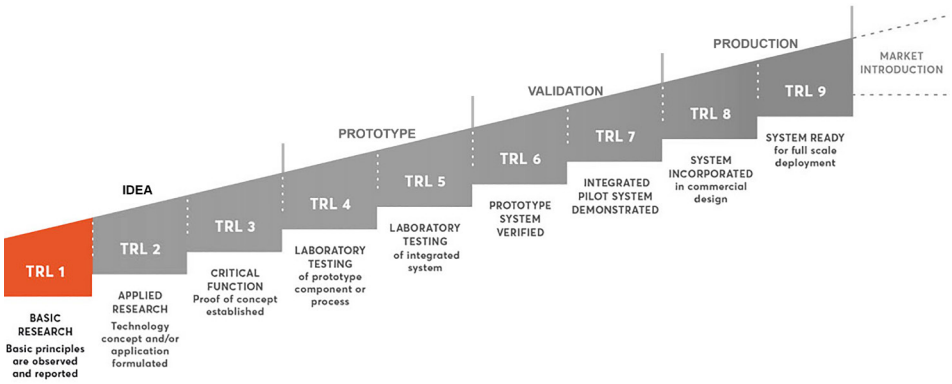


Fig. 5.33. TRL 1 Basic Research

Al contempo, si sono delineati i limiti che caratterizzano l'applicazione dei sistemi di tipo adattivo, dovuti principalmente a due fattori correlati tra loro: il primo fa riferimento alla difficoltà di misurare in termini reali, le prestazioni adattive di nuovi materiali e di nuove tecnologie rispetto ad eventi estremi di cambiamento climatico, in quanto non esistono attualmente degli indicatori di performance e dei criteri che stabiliscono delle soglie minime prestazionali definite da una normativa di settore vigente.
Il secondo fattore (strettamente legato al primo) è legato alla strumentazione da utilizzare per offrire agli stakeholder del settore, la valutazione prestazionale in termini adattivi di questi sistemi per spingerne l'adozione nel mercato.

Dall'impostazione metodologica, il *V capitolo* si concentra sulle prestazioni delle facciate continue, che rappresentano l'oggetto della presente ricerca.
La scelta di analizzare i sistemi di facciata continua deriva dal fatto che queste sono altamente vulnerabili agli effetti derivanti da eventi estremi del cambiamento climatico, come l'aumento della temperatura, delle precipitazioni e del vento. Questi fattori investono la facciata continua e sono la causa di un possibile decadimento prestazionale.
Dalla letteratura di settore, i deficit più ricorrenti si rilevano nelle perdite d'aria, nelle infiltrazioni d'acqua causate spesso dal degrado dei componenti che costituiscono il sistema di tenuta delle facciate continue, quali giunti, sigillanti e guarnizioni.
L'individuazione di questi fallimenti ha portato alla costruzione di *matrice sperimentale*, ovvero una classificazione dei degradi delle facciate continue, con lo scopo di aiutare i pro-

gettisti e gli operatori per la manutenzione ad identificare la causa del danno e i relativi interventi per il ripristino. La classificazione permette di identificare i seguenti criteri di deficit prestazionali: C.1_ Infiltrazioni d'acqua, C.2_ Perdite d'aria, C.3_ Degrado dei sigillanti e delle guarnizioni e C.4_ Degrado dei giunti di dilatazione.
Da questa analisi emerge che in letteratura vi sono pochi e limitati studi sulle prestazioni 'a lungo termine' delle facciate continue, rappresentando un ambito di forte interesse e un tema cruciale per gli attori coinvolti nel processo di progettazione e di produzione, soprattutto se le prestazioni delle facciate devono rispondere, in modo adattivo, agli eventi estremi di cambiamento climatico, problematica per la Ragione del Mediterraneo messa in evidenza nella fase analitica e critica della ricerca.

Al fine di strutturare uno scenario sulla misurabilità delle prestazioni delle facciate continue, prove di testing condotte in cantiere e in laboratorio, secondo normative europee e americane su sistemi di facciata continua, delle tipologie unitized e stick system ha portato alla costruzione di un repertorio critico sulle prestazioni delle facciate continue.
I risultati delle prove hanno messo in evidenza come la maggior parte dei fallimenti prestazionali delle facciate continue si risconta nelle infiltrazioni d'acqua.
Un aspetto da tenere in considerazione ai fini degli obiettivi della ricerca, riguarda le attività di testing che, sebbene siano condotte in linea con le procedure della normativa europea e americana, queste non fanno riferimento ad un contesto climatico preciso e ai diversi effetti di cambiamento climatico, i cui impatti possono amplificare i danni sulle superfici esterne delle facciate continue.
Pertanto, la ricerca specifica la necessità di implementare alle procedure standard delle prove aggiuntive, al fine di verificare le prestazioni nelle condizioni di esercizio delle facciate continue in regime di cambiamento climatico, nello specifico per temperature estreme, precipitazioni intense e intensificazione del carico da vento.
Questo intento comporta lo studio di una facciata continua rispetto alle sollecitazioni esterne derivanti dagli impatti di cambiamento climatico, misurando in regime simulato, il suo funzionamento adattivo. Per questi motivi, viene avviato un processo di design che conduce alla realizzazione di un mock-up di facciata continua a cellula che sarà sottoposto all'attività sperimentale.
Il rafforzamento dell'obiettivo della ricerca, ovvero quello di analizzare le caratteristiche prestazionali delle facciate continue (della tipologia a cellula) sottoposte a sollecitazioni derivanti dagli eventi estremi di cambiamento climatico per la Regione del Mediterraneo, inquadra il V capitolo all'interno del livello *TRL 2 Technology concept and/or application formulated* (Formulazione del concept tecnologico) [Fig. 5.34].

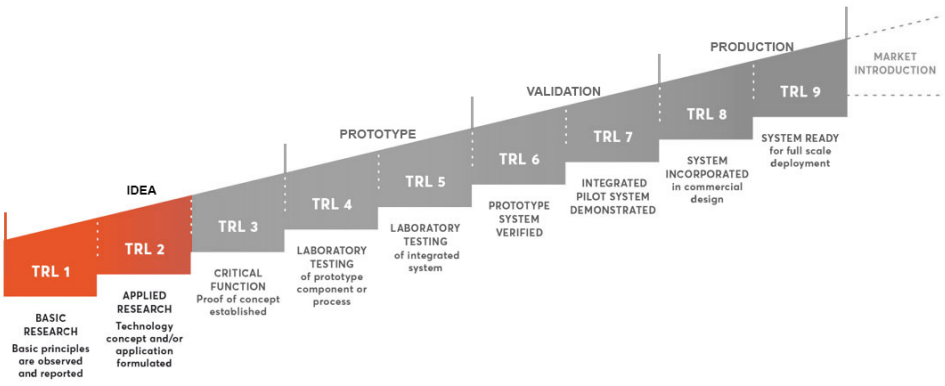


Fig. 5.34. TRL 2 Technology concept and/or application formulated

Ciò è dovuto principalmente a due aspetti: il primo si rintraccia nella strutturazione della classificazione dei possibili deficit delle facciate continue che può essere inteso come output della ricerca, in quanto strumento replicabile e implementabile da supporto ai progettisti e ai produttori sull'identificazione delle cause che provocano un decadimento prestazionale delle facciate continue e per cui si individuano possibili interventi di ripristino.
Il secondo aspetto è legato alla scelta della tipologia della facciata continua, ovvero tipologia a cellula (unitized system) che sarà sottoposta ad attività sperimentale per verificare le sue prestazioni rispetto agli effetti del cambiamento climatico per l'area Mediterraneo.

Note per l'introduzione alla III Parte della tesi

La III Parte della tesi dottorale, che costituisce la fase conclusiva del percorso di ricerca, la si può intendere come il *corpus* centrale di definizione degli obiettivi prefissati della ricerca. Questa parte delinea le attività a livello operativo e appplicativo che definiscono la fase di sperimentazione e verifica condotta su un mock-up di facciata continua della tipologia a cellula. Quindi, in linea con gli step metodologici, si passa alla descrizione del processo di design che ha condotto lo sviluppo del mock-up, attraverso un lavoro di interazione con l'azienda Cianciolo Group s.r.l., ponendo l'attenzione su alcuni elementi e componenti, come telaio, giunti, guarnizioni che, dall'analisi critica dei fallimenti delle facciate continue, rappresentano dei punti deboli del sistema a fronte degli eventi estremi di cambiamento climatico. In particolare, ci si riferisce agli eventi di temperature estreme, precipitazioni intense e intensificazione del carico da vento, analizzati per la Regione del Mediterraneo, i cui impatti potrebbero influenzare il funzionamento e la risposta prestazionale del mock-up.
La verifica delle prestazioni del mock-up avviene in due step.
Il primo step è relativo alle attività di simulazione attraverso il software parametrico di Grasshopper, al fine di verificare il comportamento termico del mock-up, sottoposto diverse temperature, ipotizzando due scenari climatici, Spagna e Italia.
Il secondo step fa riferimento alle attività di testing condotte presso la Sezione TCLab del Building Future Lab, dotata di specifiche attrezzature e macchinari in grado di riprodurre, in regime simulato e controllato, sollecitazioni climatiche estreme. I limiti messi in evidenza sulla difficoltà, in termini di procedure di testing, nel misurare le prestazioni delle facciate continue rispetto a stress esterni vuole essere qui superata attraverso lo sviluppo di una nuova procedura di prova che tenga in considerazione non solo i test di resistenza alla permeabilità all'aria e alla tenuta all'acqua (obbligatori) ma che ingloba le prove di resistenza al carico da vento e agli stress termici (prove aggiuntive).
Il *protocollo metodologico e sperimentale*, contenente la proposta della sequenza di prove da svolgere sul mock-up, vuole rappresentare uno strumento utile per la valutazione del funzionamento adattivo delle facciate continue se sottoposte ad impatti estremi di cambiamento climatico. La descrizione delle attività di testing e i relativi risultati raggiunti, in termini prestazionali del mock-up, costituiscono quindi l'ultima fase della ricerca e gettano le basi per indirizzi e prospettive future su possibili aggiornamenti della normativa tecnica in materia di certificazione delle facciate continue e sulla loro innovazione tecnologica-funzionale.

Note

1. "Da un punto di vista tecnico, le facciate sono una delle parti più complesse dell'edificio. Deve resistere all'impatto ambientale, mentre la separazione dei climi interni ed esterni crea numerosi problemi fisici dell'edificio. Ma la facciata è importante anche dal punto di vista architettonico. [...]. Allo stesso tempo determina il rapporto tra interno ed esterno". Klein, T. (2013). I*ntegral Facade Construction: Towards a new product architecture for curtain walls*. TU Delft. ISBN 9789461861610 (cit. pp. 24-25)

2. "Oggi, il successo della progettazione di un sistema di facciate continue richiede un'ampia conoscenza dei materiali e dei dettagli appropriati; un'accurata valutazione delle condizioni ambientali previste per l'edificio (sia all'interno che all'esterno); una comprensione completa delle prestazioni richieste e una chiara strategia per il rapporto tra le facciate continue e la struttura dell'edificio". Murray, S. (2009). *Contemporary curtain wall architecture*. Princeton Architectural Press. ISBN-10 1568987978 (p. 67)

3. A partire dagli anni ottanta gli involucri massivi sono composti da strati funzionali progettati per rispondere alle esigenze interne ed esterne, presentando spesso in posizione baricentrica uno spazio camera (vuoto o riempito di materiale isolante) necessario a garantirne le prestazioni di controllo, di protezione climatica e di leggerezza. In modo analogo, anche la parete vetrata subisce un processo di smaterializzazione che tuttavia ne incrementa la capacità di resistenza statica e le funzioni di controllo degli scambi termici. Romano, R. (2011). *Smart Skin Envelope: Integrazione architettonica di tecnologie dinamiche e innovative per il risparmio energetico* (p. 330). Firenze University Press.

4. I primi esperimenti di facciate continue sono stati presentati in America alla fine del XIX secolo. Dopo l'invenzione della struttura a scheletro, che è un sistema costruttivo di colonne e travi in calcestruzzo, acciaio o ferro, ha obbligato gli architetti a ripensare la facciata di questo tipo di edificio. Prima, l'involucro dell'edificio era formato da elementi in muratura che erano di supporto. Ora, la struttura a telaio permetteva di progettare più liberamente la struttura della facciata dell'edificio, che poteva diventare a parte della struttura principale. Altunkeyik, E. (2019). *Curtain wall. Analysis of European office buildings with design and retrofitting strategies of the curtain wall.* Master Thesis A. A. 2018/2019, Politecninco di Milano. Supervisor: A. Zanelli.

5. La presente norma Europea EN 13830:2015+A1:2020: *Curtain walling-Product standard* specifica i requisiti del kit per facciate continue destinato ad essere utilizzato come involucro edilizio per fornire resistenza agli agenti atmosferici, sicurezza nell'uso, risparmio energetico e ritenzione del calore e fornisce metodi di prova/valutazione/calcolo e criteri di conformità delle relative prestazioni. La presente norma europea non include: kit per "vetrature brevettate" (tetti inclinati vetrati); Costruzioni vetrate per tetti; Facciate realizzate con pannelli prefabbricati in calcestruzzo come parte della parete.

6. CEN *European Committee for Standardization* (Comitato Europeo di Normazione) è un'associazione che riunisce gli Organismi Nazionali di Normazione di 34 paesi europei. Il CEN fornisce una piattaforma per lo sviluppo di norme europee e altri documenti tecnici in relazione a vari tipi di prodotti, materiali, servizi e processi. Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://www.cencenelec.eu/about-cen/

7. La presente norma Europea EN 13119:2016: Curtain walling – Terminology, descrive la terminologia utilizzata in documenti, disegni, specifiche, ecc., quando si fa riferimento agli elementi dettagliati delle facciate continue e fornisce un elenco completo. Non si propone di ripetere quelle definizioni fisiche correttamente incluse nei singoli standard di facciate continue relative ai requisiti di prestazione e ai metodi di prova associati.

8. La facciata si trasforma in un elemento di contenimento dell'interno, in un limite costruttivo della funzionalità che sviluppa internamente l'edificio; per questo motivo, si attribuisce alla facciata il concetto di pelle architettonica. La pelle esterna, svincolata dalla funzione portante, funge da puro involucro dell'edificio, proteggendo gli interni da forze quali: pioggia, sole, flusso di calore, vento e fuoco. Baixas, J. (2012). Envolventes: la piel de los edificios. *ARQ* (Santiago), (82), pp. 98-101. DOI: 10.4067/S0717-69962012000300016

9. La marcatura CE è una patente indispensabile per i prodotti nell'intera Area Economica Europea (EEA). Essa copre tutti i requisiti tecnici legali trattati dalla specifica tecnica armonizzata pertinente, vigente in tutti gli Stati Membri dell'Unione Europea. La marcatura CE definisce un campo d'azione comune fornendo ai fabbricanti metodi di prova, procedimenti e criteri di valutazione condivisi da tutti gli stati europei. L'apposizione della marcatura CE presuppone l'idoneità all'uso previsto dei prodotti da costruzione, ovvero tutti i prodotti che sono fabbricati per essere incorporati in maniera permanente in opere edili, comprendendo le facciate continue, i serramenti, le chiusure oscuranti, le tende esterne, i cancelli, le porte industriali, commerciali e da garage e gli evacuatori di fumo e calore. La marcatura CE conferma che il prodotto finito è in grado di fornire determinate prestazioni per i requisiti regolamentati in relazione agli impieghi previsti.
La conformità di un manufatto serramentistico ai requisiti della norma tecnica europea armonizzata di riferimento (norma di prodotto) deve essere dimostrata tramite:
- prove iniziali di tipo (ITT) che, a seconda dei requisiti, richiedono l'esecuzione di calcoli teorici su uno o più modelli campione rappresentativi della gamma di prodotti in conformità ai requisiti della norma europea di prodotto di riferimento.
- Controllo di Produzione di Fabbrica (FPC) sotto la responsabilità del Costruttore.
- Documentazione idonea: dichiarazione di prestazione, documentazione di accompagnamento (etichetta CE), manuale d'uso e manutenzione.
Spetta al Costruttore, o al suo rappresentante, con sede nella EEA [Area Economica Europea] la responsabilità di apporre la marcatura CE sul prodotto, su un'etichetta applicata al prodotto, sul suo imballaggio o sui documenti commerciali di accompagnamento.
Per ulteriori informazioni, consultare il sito: http://www.unicmi.it/approfondimenti/marcatura_ce/marcatura-ce.html

10. UNI EN 12153 *Curtain walling - Air permeability - Test method*: La presente norma definisce il metodo da utilizzare per determinare la permeabilità all'aria delle facciate continue, sia nelle sue parti fisse che in quelle apribili. Descrive come il campione deve essere testato sotto pressione d'aria positiva e negativa.

11. UNI EN 12155 *Curtain walling – Watertighness - Laboratory test under static pressure*: Questa norma de-

finisce il metodo per determinare la tenuta all'acqua delle facciate continue, sia nelle parti fisse che apribili. Descrive come la faccia esterna del provino dovrebbe essere sottoposta a un film continuo di acqua con una pressione d'aria statica positiva.

12. UNI EN 12179 *Curtain walling- Resistence to wind load – Test Method:* Questa norma definisce il metodo per determinare la resistenza al carico del vento delle facciate continue, sia nelle sue parti fisse che in quelle apribili, in pressione d'aria statica positiva e negativa.

13. UNI EN 13050 *Curtain Walling - Watertightness - Laboratory test under dynamic condition*: La presente norma europea definisce un metodo di prova aggiuntivo che può essere utilizzato per valutare la tenuta all'acqua delle facciate continue, sia nelle sue parti fisse che in quelle apribili. È un test supplementare, non richiesto ai fini della classificazione, e dovrebbe essere utilizzato solo quando il committente ne ha determinato la necessità.
La presente norma europea descrive come la faccia esterna di un provino di facciata continua debba essere sottoposta a uno spruzzo continuo di acqua e un flusso d'aria turbolento, con impulsi continui di pressione positiva dell'aria all'esterno del provino generato dall'interno della camera. La presente norma europea si applica a qualsiasi prodotto per facciate continue come definito nella EN 13830.

14. UNI EN 13051 *Curtain Walling - Watertightness - Site test*: Questa norma definisce il metodo da utilizzare per verificare eventuali punti di perdita d'acqua che possono verificarsi nelle facciate continue quando installate su un edificio. Si tratta di una prova integrativa non richiesta ai fini della classificazione. È destinato all'uso principalmente dove si sono già verificate perdite d'acqua. Può essere utilizzato anche su nuove installazioni, quando specificato. Descrive in che modo un'area di facciata continua installata su un edificio deve essere sottoposta a un velo d'acqua continuo sulla sua faccia esterna. Le finestre e le porte incorporate nella facciata continua possono essere testate in modo simile.
Questa norma si applica a qualsiasi prodotto per facciate continue come definito nel prEN 13830.

15. UNI EN 14019 *Curtain Walling - Impact resistance - Performance requirements*: La presente norma europea definisce i requisiti prestazionali delle facciate continue (escluso il "vetro negli edifici" che è classificato nella EN 12600) in base ai criteri di carico da impatto del corpo molle qui specificati e testati in conformità alla EN 13049. I suoi criteri sono mirati alla sicurezza nell'uso e all'integrità della facciata continua in caso di improvvise forze d'urto sulle superfici della facciata continua. La conformità con il requisito di prestazione è determinata dal test di laboratorio. Questo standard non avrà alcuna attinenza con eventuali regolamenti nazionali in materia di edilizia / salute e sicurezza che possono esistere e il cui i requisiti si applicano separatamente e parallelamente a questi requisiti di prestazione di prova.

16. AAMA *American Architectural Manufacturers Association*: istituita negli USA nel 1936 è una delle più prestigiose associazioni che operano nel mondo industriale dei serramenti e componenti per serramenti.

17. ASTM *American Society for Testing and Materials International*: è un organismo di normalizzazione statunitense, leader nella definizione dei materiali e dei metodi di prova in quasi tutte le industrie. ASTM è tra i maggiori contributori tecnici dell'ISO, e mantiene una solida leadership nella definizione dei materiali e dei metodi di prova in quasi tutte le industrie, con un quasi monopolio nell'industria petrolifera e petrolchimica.

18. ASTM E283-04 (2012): *Standard Test Method for Determining Rate of Air Leakage Through Exterior Windows, Curtain Walls, and Doors Under Specified Pressure Differences Across the Specimen*. Questo metodo di prova è una procedura standard per determinare le caratteristiche di perdita d'aria in presenza di specifiche differenze di pressione dell'aria in condizioni ambientali.

19. ASTM E331 (2016): *Standard Test Method for Water Penetration of Exterior Windows, Skylights, Doors, and Curtain Walls by Uniform Static Air Pressure Difference.* Questo metodo di prova è una procedura standard per determinare la resistenza alla penetrazione dell'acqua in presenza di differenze di pressione statica uniforme dell'aria. Le differenze di pressione dell'aria che agiscono attraverso un involucro edilizio variano notevolmente. Questi fattori devono essere considerati pienamente prima di specificare la differenza di pressione di prova da utilizzare.

20. AAMA 501.1-05 *Water Penetration of Windows, Curtain Walls and Doors Using Dynamic Pressure.* Questo test viene utilizzato per fornire garanzia di qualità per valutare l'adeguatezza strutturale dei sistemi di pareti esterne e la loro capacità di resistere alla penetrazione dell'acqua e alle perdite d'aria.

21. ASTM E330 *Standard Test Method for Structural Performance of Exterior Windows, Doors, Skylights and Curtain Walls by Uniform Static Air Pressure Difference*. Questo metodo di prova descrive la determinazione delle prestazioni strutturali di finestre esterne, porte, lucernari e facciate continue in presenza di differenze di pressione statica uniforme dell'aria, utilizzando una camera di prova. Questo metodo di prova è applicabile agli assiemi di facciate continue inclusi, ma non limitati a, componenti in metallo, vetro, muratura e pietra.

22. AAMA 501-6 *Recommended dynamic test method for determining the seismic drift causing glass fallout from a wall system*: La finalità del test è determinare il drift di piano (spostamento relativo tra i due livelli dell'edificio a cui è vincolata la facciata) per cui si verifica la caduta di frammenti di facciata. Per ottenere tale spostamento critico, viene applicata alla porzione di facciata, tramite le travi sismiche, una storia temporale di spostamenti. È il crescendo test che è caratterizzato da una serie concatenata di cicli sinusoidali ad ampiezza gradualmente crescente fino a 150 mm, con frequenza variabile da 0,8 Hz (per spostamenti fino a 75 mm) a 0,4 Hz (per spostamenti superiori a 75 mm). Esso deve essere condotto senza interruzione fino a che non si verifica una delle condizioni critiche indicate nella norma AAMA, la più importante delle quali è la caduta di frammenti di vetro.

23. La norma descrive un metodo per il calcolo della trasmittanza termica delle facciate continue costituite da vetrate e/o pannelli opachi inseriti o collegati a telai. Il calcolo include: - diversi tipi di vetrate, per esempio di vetro o plastica, vetrate singole o multiple, con o senza rivestimento basso emissivo, con intercapedini riempite di aria o altri gas, - telai, di qualsiasi materiale, con o senza taglio termico, - diversi tipi di pannelli opachi rivestiti con metallo, vetro, ceramiche o qualsiasi altra combinazione di materiale.

24. UNI EN ISO 10077-1:2017 *Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Part 1: General (ISO 10077-1:2017)*. La norma specifica i metodi per il calcolo della trasmittanza termica di finestre e porte pedonali costituite

da pannelli vetrati e/o opachi inseriti in un telaio, con e senza scuri.

25. "Le facciate continue in vetro sono costituite da due componenti fondamentali: il vetro e la cornice. Come vengono assemblati questi due elementi manipolato, inclusa la proporzione, le proprietà e ancoraggio di ciascuno, costituisce la distinzione essenziale tra i singoli sistemi di facciate continue". Sanders, R. M., & Craig, A. (2012). Preventing and Treating Failure in Glazed Curtain Wall Systems. *Journal of architectural technology ISSUE* 2/2012, Vol. 29, pp. 1-8 (cit. p. 2). Hoffmann Architects, Inc.

26. *CWM-19 Curtain wall manual.* Il manuale sostituisce AAMA MCWM1-89, il "Metal Curtain Wall Manual" e fornisce i principi di base e requisiti essenziali di una buona progettazione di facciate continue, tenendo conto del fatto che i materiali utilizzati reagiscono in modo molto diverso rispetto ad altri materiali per pareti. I nuovi contenuti includono tolleranze dettagliate di fabbricazione e installazione, nonché linee guida per l'interfaccia della barriera d'aria. Sono stati apportati aggiornamenti significativi ai documenti di riferimento, alle proprietà ingegneristiche dei materiali, al linguaggio delle specifiche, alle informazioni generali sui test di laboratorio e ai requisiti di resistenza agli agenti atmosferici.

27. Il Prof. Carmine Garzia, responsabile scientifico dell'Ufficio studi UNICMI, durante il discorso sulla presentazione del 'Rapporto sul mercato dell'involucro edilizio', afferma che nel 2021 la redditività delle vendite subisce un calo significativo sia per le aziende dell'alluminio sia per quelle del PVC, causato principalmente dall'aumento del costo delle materie prime. Le aziende del legno hanno risentito della forte competitività degli altri materiali e continuano ad avere performance sensibilmente inferiori sia per quanto riguarda la redditività delle vendite sia per quella del capitale investito.

28. Il Rapporto '*Global Glass Curtain Wall Market – Industry Trends and Forecast to 2029*' è prodotto Data Bridge Market Research, che analizza i trend sul mercato delle facciate continue in vetro. Per ulteriori informazioni consultare il sito: https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-glass-curtain-wall-market

29. Il Rapporto '*Aluminum Curtain Wall Market Size, Share & Trends Analysis Report*' analizza il mercato delle facciate continue in alluminio e si prevede che la domanda aumenterà nel periodo di previsione, grazie a vantaggi quali la prevenzione della penetrazione dell'acqua, l'efficienza energetica, l'impermeabilità all'aria, la filtrazione della luce naturale, la leggerezza, l'economicità e la facilità di montaggio. Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/aluminum-curtain-wall-market

30. Il Rapporto '*Glass Curtain Wall Market Size, Share & Covid-19 Impact Analysis*' fornisce approfondimenti sia qualitativi che quantitativi sul mercato delle facciate continue. Gli approfondimenti includono il dimensionamento del mercato globale in termini di valore in ogni regione profilata nell'ambito dello studio. Gli approfondimenti di tipo qualitativo coprono un'analisi elaborata dei driver di mercato, delle restrizioni, delle opportunità di crescita e delle tendenze chiave relative al mercato. Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://www.fortunebusinessinsights.com/glass-curtain-wall-market-103912

31. I principali attori chiave sono: Nippon Sheet Glass Co., Ltd., (Giappone), AGC Inc., (Giappone), Central Glass Co. Ltd., (Giappone), Xinyi Glass Holdings Limited., (Cina), Cardinal Glass Industries, Inc., (USA), CEVITAL (Algeria), China Glass Holdings Limited (Cina), GUARDIAN INDUSTRIES (USA), Fuyao Glass Industry Group Co., Ltd., (Cina), Saint-Gobain (Francia), SCHOTT AG (Germania), Sisecam (Turchia), Taiwan Glass Ind. Corp. (Taiwan), Beijing Northglass Technologies Co. Ltd., (Cina), arcon Flach- und Sicherheitsglas GmbH & Co. KG (Germania), Dellner Romag Ltd., (Regno Unito), Qingdao Tsing Glass Co. Limited (Cina) e Guangzhou Topo Glass Co., Ltd., (Cina), Vitro (Messico).

32. Il '*Rapporto sul mercato dell'involucro edilizio*', elaborato da UNICMI, contiene le previsioni di chiusura 2021 e le proiezioni 2022 relative al mercato italiano dei serramenti e delle facciate continue. Il mercato delle facciate continue, che nel 2020 non avevano particolarmente risentito della crisi, crescerà in linea con il mercato non residenziale nel 2021 (3,9%) e dell'1% nel 2022, questo ultimo dato è determinato dalla conclusione di importanti iniziative immobiliari attualmente in corso di realizzazione e dalle forti tensioni sui prezzi, che determineranno un effetto negativo sul valore del mercato. Per ulteriori informazioni, consultare il sito: http://www.unicmi.it/in_evidenza/in_evidenza/rapporto-unicmi-2022.html

33. Il Centro Studi UNICMI acronimo *Unione Nazionale delle Industrie delle Costruzioni Metalliche dell'Involucro e dei serramenti*, attivo dal 2000, ha implementato una serie di strumenti per l'analisi del settore dell'involucro edilizio e delle performance delle imprese in competizione. La direzione scientifica è affidata al Prof. Carmine Garzia. Il Centro Studi UNICMI pubblica con cadenza annuale delle Presentazioni Tematiche, che si focalizzano su alcuni dei comparti in cui si articola il settore (Analisi del comparto delle costruzioni metalliche; Analisi del comparto delle chiusure tecniche e dei sistemi oscuranti). Si tratta di documenti operativi che si focalizzano su informazioni di mercato di tipo quantitativo utili a manager, imprenditori ed analisti. Per ulteriori informazioni, consultare il sito: http://www.unicmi.it/index.php

34. Tra i produttori per sistemi di facciate continue, si citano alcune aziende italiane: Aluk Group, Cianciolo Group, Gualini, Metra, Permasteelisa, Pichler, Ponzio, Schuco, Glasbilt, riconosciute a livello internazionale e nel mercato della progettazione e della costruzione di facciate, serramenti e componenti per l'involucro edilizio.

35. "Le facciate continue sono gli elementi edilizi più maltrattati, in quanto sottoposti a vento, eventi estremi, movimenti dell'edificio, improvvisi sbalzi di temperatura, pioggia battente, inquinamento atmosferico e corrosione". Hunton, D. A., & Martin, O. (1987, January). Curtain Wall Engineering. In F*irst National Structural Engineering Conference 1987*: Preprints of Papers: Preprints of Papers, pp. 88-92, (cit. p. 88). Barton, ACT: Institution of Engineers, Australia.

36. La *corrosione galvanica* è un processo di corrosione a umido che si origina da qualsiasi coppia di metalli diversi, sufficientemente lontani nella serie elettrochimica, posti a diretto contatto tra loro. Normalmente la corrosione galvanica è il risultato: di una progettazione difettosa dello strumento o del macchinario, di un'errata scelta e/o combinazione di materiali o della parziale o completa dissoluzione di un metallo più nobile utilizzato per rivestirne uno meno nobile (come il ferro).

37. La f*essurazione termica* del vetro è una delle proble-

matiche che gli ingegneri e i produttori dovrebbero considerare durante la progettazione di una facciata continua. Grandi differenze di temperatura nel vetro causano elevate sollecitazioni all'interno del vetro, costringendo il vetro a rompersi. Le crepe termiche sono facili da rilevare perché sono perpendicolari al telaio e di solito espandono l'intera sezione della finestra, è più probabile che si verifichino guasti quando sul vetro viene applicato un rivestimento assorbente. Questi rivestimenti vengono messi in atto per ridurre il carico di raffreddamento dell'edificio, ma possono avere un costo per l'integrità del vetro perché assorbono la radiazione solare e la mantengono immagazzinata nel vetro.

38. I *sigillanti* per facciate continue sono progettati solo per durare da 10 a 15 anni; pertanto, la manutenzione regolare e la manutenzione dei sigillanti è un must per prevenire danni.

39. La *delaminazione* di una lastra di vetro stratificato o laminato è il fenomeno che si verifica ai bordi esposti della lastra e che consiste nella perdita di adesione tra le lastre di vetro e la pellicola di intercalare plastico (in genere PVB ma non solo) che le tiene normalmente unite. Tra le principali cause del fenomeno si sottolineano: un'atmosfera eccessivamente calda e umida (il PVB è igroscopico), problemi di compatibilità tra intercalare plastico e il silicone strutturale (se utilizzato), errata gestione del processo di laminazione, condizioni di installazione (presenza di sostanze che possono aggredire l'intercalare e la sua adesione ai vetri).

40. Il polivinilbutirrale (PVB) è una pellicola trasparente di materiale plastico che si interpone tra le due lastre di vetro stratificato e agisce come adesivo e separatore tra le lastre di vetro, modificandone le prestazioni meccaniche, termiche ed acustiche.

41. La combinazione dell'acqua con elementi derivati dall'inquinamento, in particolare il biossido di zolfo, è responsabile di molti tipi di degrado, in quanto produce soluzioni corrosive e può formare dei depositi. Gli effetti di questi elementi dipendono inoltre da fattori come il tempo di esposizione agli agenti atmosferici (che può essere continuo o ciclico) e la temperatura. L'inizio della corrosione avviene in genere per punti, in corrispondenza di zone di evaporazione di gocce d'acqua o di micro-difetti della superfice.

42. Le inclusioni di *solfuro di nichel* sono una delle potenziali cause di rottura del vetro. Il solfuro di nichel, a seconda della temperatura, assume una determinata dimensione. Quando si tempra il vetro, portandolo alla temperatura di 600 gradi e subito dopo viene raffreddato, il solfuro di nichel non riesce a cambiare dimensione repentinamente e rimane piccolo all'interno della lastra. Con il tempo, però, il solfuro di nichel cercherà di ritornare alla sua grandezza naturale e, pian piano, aumenta di dimensione fino a causare la rottura del vetro temprato. La frattura si propaga sempre con andamento radiale a partire da una coppia di frammenti speculari nella forma con un aspetto caratteristico (come le ali di una farfalla), generati in corrispondenza della inclusione. Vista l'impossibilità di prevedere la rottura del vetro, l'Heat Soak Test HST, è un test obbligatorio che prevede che le lastre vengano sottoposte a temperature in media attorno ai 290° per alcune ore. Le lastre contenenti i di solfuro vengono perciò individuate perché si distruggono spontaneamente.

43. Il documento tecnico *'X60 Guida alla posa in opera delle Facciate Continue'* specifica che la posa in opera dei serramenti deve essere effettuata in modo tale da soddisfare un complesso di requisiti tecnologici che devono essere intesi applicati al sistema costituito dal serramento e dalla chiusura verticale. Principalmente la posa in opera deve essere effettuata in modo tale da garantire il rispetto dei seguenti principali requisisti tecnologici per i quali i rispettivi livelli di prestazione sono già stati individuati in sede di progetto: – resistenza al carico di vento; – resistenza ai carichi permanenti; – tenuta all'acqua; – permeabilità all'aria; – isolamento acustico; – isolamento termico; – ventilazione; – durabilità. La guida si propone anche come aiuto ai progettisti che possono apprendere appieno le problematiche della posa in opera delle facciate continue e valutarle attentamente sin dalle prime fasi di progetto.
Per ulteriori informazioni, consultare il sito: http://www.unicmi.it/strumenti/prodotti_editoriali/ux60_posa_facciate.html

44. "La verifica delle prestazioni di un campione di facciata continua prima della produzione può essere uno strumento utile per identificare i punti deboli della fabbricazione o della progettazione prima che siano incorporati nella parete del cantiere e siano difficili da correggere". CMHC (2004). *Glass and metal curtain walls* (Best practice guide, building technology). Canada Mortgage and Housing Corporation (CMHC), Canada. (cap. 5, p. 1). ISBN 0-660-19394-9

45. I mock-up possono essere costruiti in diverse dimensioni e, se vengono testati in laboratorio, possono essere limitati alle dimensioni o alla capacità della camera di prova del laboratorio. Esistono due tipologie di mock-up:
- Il *visual mock-up* viene spesso utilizzato come punto di riferimento per la qualità prevista dei materiali e la coerenza dell'installazione e consente all'appaltatore/subappaltatore di dimostrare ai proprietari e al team di progettazione che il lavoro sarà eseguito correttamente secondo gli standard del settore;
- Il *performance mock-up* può essere sottoposto a una sequenza di test, tra cui il carico laterale (ad esempio, il carico del vento) per la risposta strutturale, il racking sismico, l'infiltrazione dell'acqua (statica e dinamica), l'infiltrazione dell'aria, le prestazioni termiche e la trasmissione del suono.
Committee on Curtain Wall Systems. (2013). *Curtain wall systems: a primer*. American Society of Civil Engineers. ISBN 978-0-7844-7768-7

46. In genere, il campione di prova viene selezionato dal consulente o dall'architetto della facciata continua per garantire che incorpori tutti i componenti critici della facciata continua, inclusi i giunti delle pile, gli angoli interni ed esterni, le prese d'aria utilizzabili, le dimensioni massime del vetro e le campate dei montanti. Il consulente o l'architetto svilupperà anche una procedura di prova, che include quasi sempre prove di infiltrazione d'aria, prove di resistenza alla penetrazione dell'acqua (utilizzando pressioni sia statiche che dinamiche) e prove di carico strutturale.

References

CMHC (2004). Glass and metal curtain walls (Best practice guide, building technology). Canada Mortgage and Housing Corporation (CMHC), Canada. ISBN 0-660-19394-9 Cit. cap. 5, pag. 1.

Hunton, D. A., & Martin, O. (1987, January). Curtain Wall Engineering. In First National Structural Engineering Conference 1987: Preprints of Papers: Preprints of Papers, pp. 88-92. Barton, ACT: Institution of Engineers, Australia. Cit. pag. 88.

Klein, T. (2013). *Integral Facade Construction: Towards a new product architecture for curtain walls*. TU Delft. ISBN 9789461861610 Cit. pp. 24-25.

Murray, S. (2009). *Contemporary curtain wall architecture. Princeton Architectural Press*. ISBN-10 1568987978 Cit. pag. 67.

Sanders, R. M., & Craig, A. (2012). Preventing and Treating Failure in Glazed Curtain Wall Systems. *Journal of architectural technology* ISSUE 2/2012, Vol. 29, pp. 1-8. Hoffmann Architects, Inc. Cit. pag. 2.

Allegato3

L'allegato 3 presenta la *matrice sperimentale,* sottoforma di schede, ovvero il risultato delle analisi sui principali fallimenti dei sistemi di facciata continua.
Le schede vanno intese come uno strumento utile e implementabile al processo sistemico di analisi sulle possibili cause e azioni di riparazioni correttive per affrontare correttamente la causa principale dei diversi fallimenti prestazionali delle facciate continue.

Nello specifico, le schede qui di seguito riportate, fanno riferimento ai seguenti criteri di deficit prestazionali:
- C.1_ *Infiltrazioni d'acqua*;
-C.2_ *Perdite d'aria*;
- C.3_ *Degrado dei sigillanti e delle guarnizion*i;
- C.4_ *Degrado dei giunti di dilatazione*.

Criterio C.1_ Infiltrazione d'acqua

Tipologia di facciata continua: Unitized system/Stick system **Tipologia di vetro:** Basso-emissivo/selettivo/termocromico/	**Numero apribili:** XXX **Anno di costruzione:** XXXX	**C.1**

Tipologia di edificio: ☐ Edificio per uffici ☐ Edificio residenziale ☐ Edificio scolastico ☐ Edificio commerciale ☐ Edificio turistico-ricettivo

NORMATIVA EUROPEA/AMERICANA

UNI EN 12155: Curtain walling – Watertighness - Laboratory

ASTM E331 (2016): Standard Test Method for Water Penetration of Exterior Windows, Skylights, Doors, and Curtain Walls by Uniform Static Air Pressure Difference

CLASSIFICAZIONE

Classe di prestazione raggiunta rispetto la normativa di riferimento





Descrizione: quantità d'acqua all'interno del sistema, nel montante, nel telaio, ….

Cause: guarnizioni e/o sigillanti degradati, sistema di drenaggio malfunzionante, guasti (fori) nei giunti di dilatazione …

INDICATORE DI PRESTAZIONE

Livello del danno: quantità d'acqua sulla superficie del sistema di facciata continua (analisi strumentale e visiva)

SCALA DI AMPLIFICAZIONE DEL DANNO

☐ ***Basso***: l'infiltrazione non provoca danni al sistema strutturale della facciata continua
☐ ***Medio***: l'infiltrazione aumenta la possibilità di danni strutturali (corrosione dei profili, delaminazione del vetro)
☐ ***Alto***: l'infiltrazione causa danni strutturali (condizioni estreme: rottura intelaiatura, telaio vetro, …)

Possibili interventi:

- Ripristino dei sigillanti di tenuta, dove necessario, mediante incollaggio delle guarnizioni in gomma con particolare attenzione agli angoli di tenuta (operai specializzati);
- Sostituzione delle guarnizioni degradate e pulizia delle scanalature e dei fori di drenaggio (operai specializzati);
- In condizioni estreme, sostituzione profili in alluminio e/o lastre di vetro (operai specializzati).

Criterio C.2_ Perdite d'aria

Tipologia di facciata continua: Unitized system/Stick system

Tipologia di vetro: Basso-emissivo/selettivo/termocromico/

Numero apribili: XXX

Anno di costruzione: XXXX

C.2

Tipologia di edificio: ☐ Edificio per uffici ☐ Edificio residenziale ☐ Edificio scolastico ☐ Edificio commerciale ☐ Edificio turistico-ricettivo

NORMATIVA EUROPEA/AMERICANA

UNI EN 12153: Curtain walling - Air permeability - Test method

ASTM E283-04 (2012): Standard Test Method for Determining Rate of Air Leakage Through Exterior Windows, Curtain Walls, and Doors Under Specified Pressure Differences Across the Specimen

CLASSIFICAZIONE

Classe di prestazione raggiunta rispetto la normativa di riferimento





Descrizione: perdita d'aria all'interno del sistema, nel montante, nel telaio, elementi di tenuta....

Cause: guarnizioni e/o sigillanti degradati, guasti (fori) nei giunti di dilatazione, errori nell'installazione degli elementi di tenuta o non dimensionati correttamente, ...

INDICATORE DI PRESTAZIONE

Livello del danno: perdite d'aria sulla superficie del sistema di facciata continua (analisi strumentale e visiva)

SCALA DI AMPLIFICAZIONE DEL DANNO

☐ ***Basso***: la perdita non provoca danni al sistema strutturale della facciata continua
☐ ***Medio***: la perdita aumenta la possibilità di danni strutturali (connessione telaio-lastra, giunti di tenuta)
☐ ***Alto***: la perdita causa danni strutturali (condizioni estreme: rottura intelaiatura, telaio vetro, ...)

Possibili interventi:

- Ripristino dei sigillanti di tenuta, dove necessario, mediante incollaggio delle guarnizioni in gomma con particolare attenzione agli angoli di tenuta (operai specializzati);
- Sostituzione delle guarnizioni degradate rispetto alle aderenze tra telai e le lastre di vetro (operai specializzati);
- Ripristino dei giunti mediante il rifacimento delle sigillature (operai specializzati);
- In condizioni estreme, sostituzione profili in alluminio e/o lastre di vetro (operai specializzati).

Criterio C.3_ Degrado dei sigillanti e delle guarnizioni

Tipologia di facciata continua: Unitized system/Stick system **Tipologia di vetro:** Basso-emissivo/selettivo/termocromico/	**Numero apribili:** XXX **Anno di costruzione:** XXXX	**C.3**

Tipologia di edificio: ☐ Edificio per uffici ☐ Edificio residenziale ☐ Edificio scolastico ☐ Edificio commerciale ☐ Edificio turistico-ricettivo

INFORMAZIONI TECNICHE DEL PRODOTTO

- Base chimica del prodotto: monocomponente, acrilico, elastico poliuretanico, ...
- Temperatura di servizio: –40 °C min. / +80 °C max
- Allungamento a rottura: ~800 % (ISO 37)
- Modulo di elasticità secante~0.6 N/mm2 al 100 % allungamento (+23 °C)(ISO 8339)

CERTIFICAZIONE DEL PRODOTTO

Marcatura CE e dichiarazione di prestazione secondo Normativa





Descrizione: distacchi delle guarnizioni, perdita di elasticità e loro fessurazione

Cause: esposizione prolungata ai raggi UV, guasti (fori) nei sigillanti e/o guarnizioni, errori nell'installazione degli elementi di tenuta o non dimensionati correttamente, ...

INDICATORE DI PRESTAZIONE

Livello del danno: restringimento, usura degli elementi di tenuta soprattutto agli angoli (analisi visiva)

SCALA DI AMPLIFICAZIONE DEL DANNO

☐ ***Basso***: il degrado non provoca danni al sistema strutturale della facciata continua
☐ ***Medio***: il degrado aumenta la possibilità di danni strutturali (cedimento del sistema di tenuta e infiltrazioni)
☐ ***Alto***: il degrado causa danni strutturali (condizioni estreme: rottura del vetro)

Possibili interventi:

- Ripristino dei sigillanti di tenuta, dove necessario, mediante incollaggio delle guarnizioni in gomma con particolare attenzione agli angoli di tenuta (operai specializzati);
- Sostituzione delle guarnizioni degradate e conseguente controllo dell'adesione delle guarnizioni ai profili di contatto dei telai del vetro (operai specializzati);
- In condizioni estreme, sostituzione profili in alluminio e/o lastre di vetro (operai specializzati).

Criterio C.4_ Degrado dei giunti di dilatazione

Tipologia di facciata continua: Unitized system/Stick system **Tipologia di vetro:** Basso-emissivo/selettivo/termocromico/	**Numero apribili:** XXX **Anno di costruzione:** XXXX	**C.4**

Tipologia di edificio: ☐ Edificio per uffici ☐ Edificio residenziale ☐ Edificio scolastico ☐ Edificio commerciale ☐ Edificio turistico-ricettivo

INFORMAZIONI TECNICHE DEL PRODOTTO

- Base chimica del prodotto: monocomponente, acrilico, elastico poliuretanico, ...
- Temperatura di servizio: −40 °C min. / +80 °C max
- Allungamento a rottura: ~800 % (ISO 37)
- Modulo di elasticità secante~0.6 N/mm2 al 100 % allungamento (+23 °C)(ISO 8339)

CERTIFICAZIONE DEL PRODOTTO

Marcatura CE e dichiarazione di prestazione secondo Normativa





Descrizione: distacchi dei giunti, variazione geometrica e perdita di elasticità e loro fessurazione

Cause: esposizione prolungata ai raggi UV, movimenti termici e strutturali della facciata continua, progettazione non corretta dei giunti di dilatazione (all'interno o all'esterno del sistema)

INDICATORE DI PRESTAZIONE

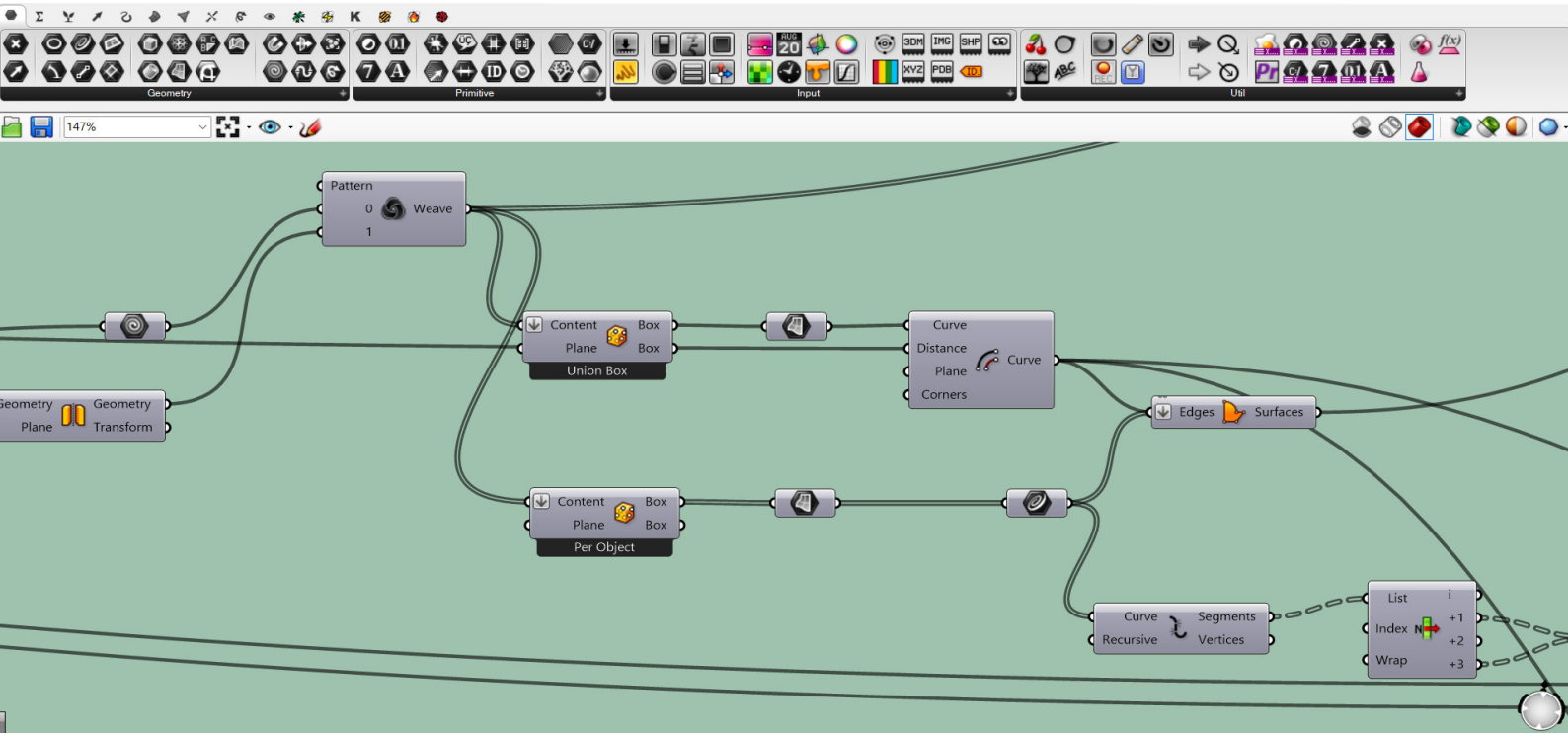
Livello del danno: restringimento, usura dei giunti di dilatazione soprattutto agli angoli (analisi visiva)

SCALA DI AMPLIFICAZIONE DEL DANNO

☐ ***Basso***: il degrado non provoca danni al sistema strutturale della facciata continua
☐ ***Medio***: il degrado aumenta la possibilità di danni strutturali (cedimento del sistema di tenuta e infiltrazioni)
☐ ***Alto***: il degrado causa danni strutturali (condizioni estreme: rottura del vetro)

Possibili interventi:

- Ripristino dei sigillanti di tenuta, dove necessario, mediante incollaggio delle guarnizioni in gomma con particolare attenzione agli angoli di tenuta, attenzionando il dimensionamento per il corretto 'accomodamento' delle sollecitazioni termiche e strutturali che possono provocare il cedimento (operai specializzati);
- In condizioni estreme, sostituzione profili in alluminio e/o lastre di vetro (operai specializzati).



PARTE TERZA:
L'attività sperimentale

La valutazione prestazionale del mock-up in regime di cambiamento climatico

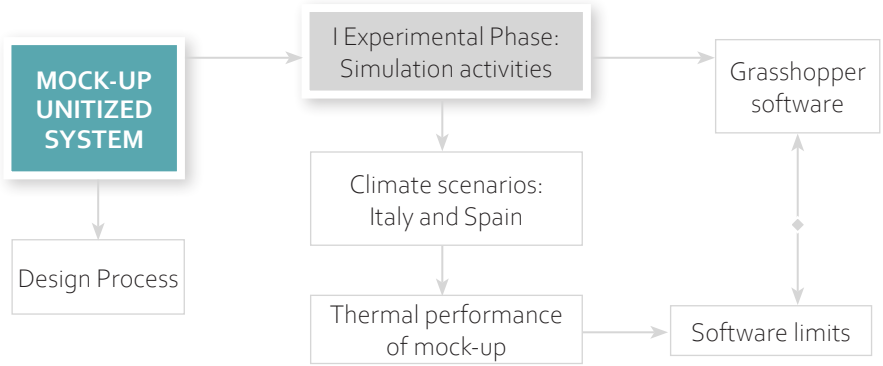
Capitolo 6

Analisi Simulativa
Dal design del mock-up alla modellazione su software parametrico

Abstract

The sixth chapter constitutes the start of the experimental phase of the research, characterised by two main phases: the simulation and testing activities conducted on the mock-up in order to verify its adaptive functioning to extreme climate change phenomena for the Mediterranean Region.
Firstly, in this chapter, the mock-up design process is described to define in technical and dimensional terms the geometric configuration of the mock-up. Specifically, the mock-up consists of six units that are placed on two levels. The mock-up dimensions are 4850 mm (width) x 9430 mm (height), designed according to market trends that require increasingly complex and high-performance curtain wall shapes and sizes.
The simulation activities, the subject of this chapter, are initiated through the use of the parametric software Grasshopper. Thanks to the software's ability to set the climatic data of a specific environmental context, two climatic scenarios of the Mediterranean Region are studied, thus simulating two temperature stresses on the mock-up for Italy and Spain respectively.
For the objectives of the software simulation phase, the outputs chosen to define the performance of the mock-up are the internal and external surface temperature of the mock-up and the energy flow that the mock-up allows to pass between the external and internal environment.

Key-words
design process, mock-up, parametric workflow tools, simulation, temperature control



Capitolo 6: Thematic Flow-Chart - Fase Sperimentale

Introduzione

"Performance-based parametric design explorations depend on formulating custom-designed workflows that require reading, writing, interpreting and manipulating databases, as part of the design process."[1]
[Ercan, & Elias-Ozkan, 2015, p. 33]

Con questo capitolo, si dà l'avvio alla trattazione sul momento cardine della ricerca, rappresentato dalla fase sperimentale, suddivisa in due step principali: il primo è relativo alle *attività di simulazione* mentre il secondo si riferisce alle *attività di testing* condotte sul mock-up.
Da diversi anni ormai, l'attenzione sul confronto diretto tra la validità dei risultati messi a disposizione dagli strumenti di simulazione con quelli di testing, porta a prediligere quest'ultimi come i soli strumenti in grado di misurare le *reali* prestazioni degli involucri edilizi e gli effetti che questi subiscono a seguito di una sollecitazione esterna.
Quest'affermazione è dettata dalla difficoltà per gli strumenti di simulazione di garantire la riproduzione *esatta/reale* della molteplicità di variabili che caratterizzano un determinato fenomeno che, per gli obiettivi della presente ricerca, sono da ricondurre agli eventi estremi di cambiamento climatico per la Regione del Mediterraneo.
D'altro canto, gli strumenti di simulazione nel momento in cui riproducono in modo coerente le attività di testing, potrebbero concorre a snellire i processi di progettazione e valutazione anche in termini di risorse economiche e di tempo e quindi, ricorrere ai test quando la simulazione non può controllare tutte le variabili da misurare.
Tuttavia, non si vuole decretare *a priori* il ruolo decisivo delle attività di testing ma, per la ricerca, queste costituiscono uno step fondamentale e strategico in quanto sono in grado di condurre la sperimentazione verso risultati robusti e affidabili e, al tempo stesso, chiarire e comprendere quali possano essere i limiti del software utilizzato per la sperimentazione, per futuri up-grade e/o regolazioni delle sue funzionalità.
Sebbene in apparente antitesi tra di loro, gli strumenti di simulazione affiancano le attività di testing per lo sviluppo di processi volti all'innovazione tecnologica e alla valutazione prestazionale degli involucri edilizi.
Per gli obiettivi della ricerca, queste considerazioni tracciano la strada per lo sviluppo del processo di sperimentazione caratterizzato dall'utilizzo di un software di simulazione e dalle necessarie attività di testing [Fig. 6.1].

Prima di addentrarci sulla descrizione delle attività di simulazione, oggetto del presente capitolo, viene descritto il processo di design del mock-up, avviato in sinergia diretta con l'azienda Cianciolo Group s.r.l., che ha portato alla definizione della geometria complessiva del mock-up e all'individuazione di variabili progettuali da cui dipendono le prestazioni del mock-up. Le variabili progettuali rappresentano la caratterizzazione tecnologica del mock-up e fanno riferimento a elementi e componenti quali: *intelaiatura, giunti, sistema di drenaggio, stratificazione, cavità e ritenzione del vetro*.
Entrando nello specifico della caratterizzazione geometrica, il mock-up di facciata continua è caratterizzato da una configurazione semplice ed è stato concepito come un insieme di elementi quali, le cellule di numero pari a 6, assemblate a secco e costituite da una superficie trasparente e una opaca.
Le dimensioni totali del mock-up sono 4850 mm (larghezza) x 9430 mm (altezza), *pensate* in base ai trend del mercato che richiedono forme e dimensioni delle facciate continue sempre più complesse e performanti. Le sei cellule che compongono il mock-up sono disposte su due livelli, quindi tre per livello e hanno un'altezza tra i 4544 e i 4862 mm e una larghezza che va da una dimensione minima di 1500 mm ad una massima di 1700 mm.
Le superfici opache che rappresentano gli elementi di carattere estetico del mock, sono costituite in pannelli in GFRC, materiale innovativo composto da una matrice cementizia, acqua e inerti, nel quale vengono aggiunte fibre di vetro con funzione di rinforzo.

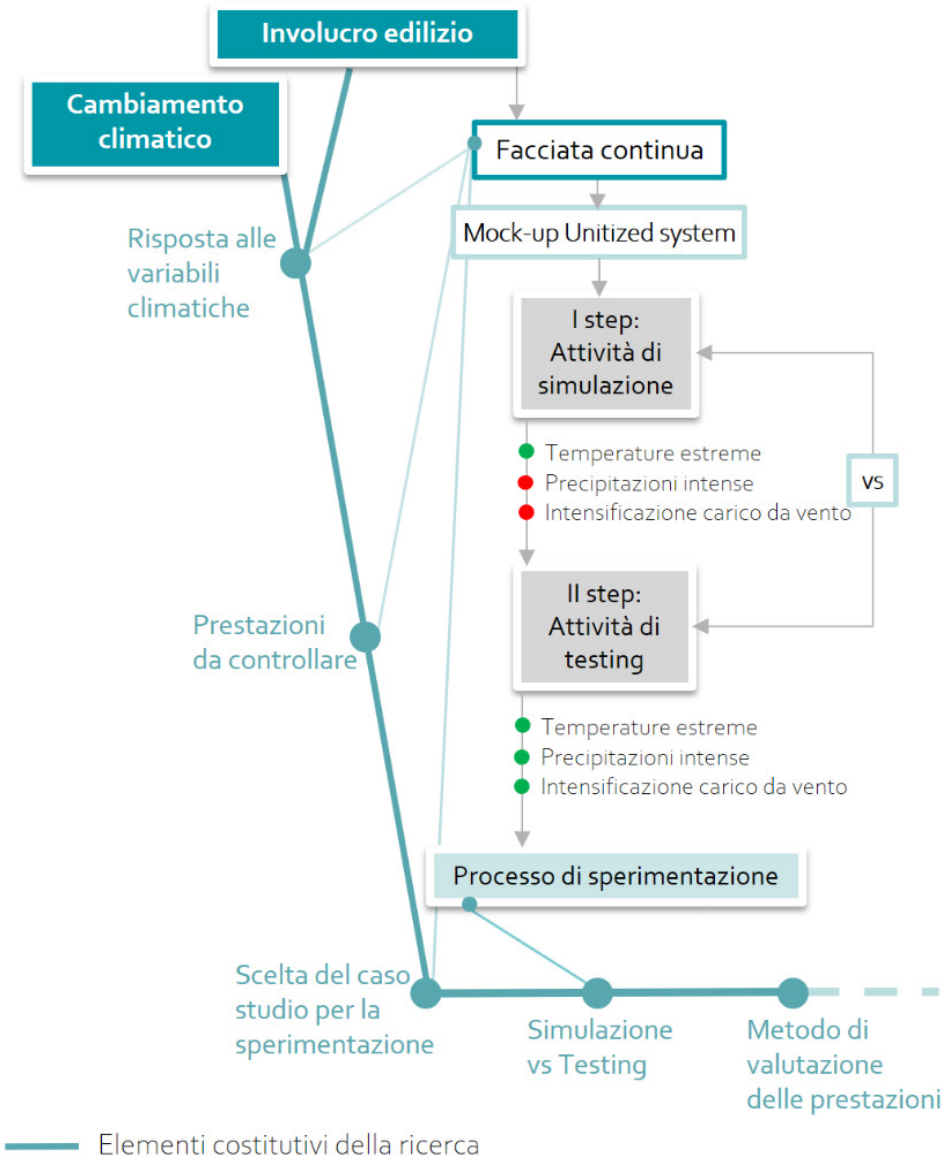


Fig. 6.1. Flow-chart: Dagli strumenti di simulazione alle attività di testing per il processo di sperimentazione. Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

La definizione degli elementi principali costitutivi delle cellule, attraverso disegni tecnici con livelli di dettaglio dimensionali è in stretta relazione con la modellazione della geometria da realizzare sul software parametrico utilizzato per l'attività di simulazione.
Il software utilizzato per simulare il comportamento termico del mock-up è il plug-in *Grasshopper* di Rhino. All'interno del piano di lavoro del software è stato riprodotto il mock-up, con le stesse caratteristiche dimensionali di quello realizzato in scala 1:1, al fine di ottenere dei dati sperimentali affidabili.
L'obiettivo delle attività di simulazione, è analizzare il comportamento a livello termico del mock-up, quando viene sottoposto a sollecitazioni estreme. Questa attività risulta necessaria per gli step della fase sperimentale della ricerca per avere un primo quadro, seppur digitale e visivo, sulla risposta prestazionale del mock-up.
In linea con le analisi degli eventi estremi della Regione del Mediterraneo (Cfr. Cap. 3), la

sola variabile climatica che viene presa in considerazione in questo contesto di simulazione è la temperatura per via dei limiti del software nel riprodurre precipitazioni intense e carico da vento. Nello specifico, grazie alla possibilità del software di impostare i dati climatici di un contesto ambientale specifico, sono stati studiati due scenari climatici della Regione del Mediterraneo, simulando così due sollecitazioni della temperatura sul mock-up, rispettivamente per Italia e Spagna. Ai fini degli obiettivi della fase di simulazione tramite software, gli output scelti per la definizione delle prestazioni del mock-up, sono la *temperatura superficiale interna ed esterna* del mock-up e il *flusso di energia* che il mock-up lascia passare tra ambiente esterno ed interno.
La trattazione che segue, oltre ad esplicitare il processo di design del mock-up, descrive la metodologia utilizzata nella costruzione delle attività di simulazione tramite Grasshopper e i risultati ottenuti.
Si vuole sottolineare che, i primi due paragrafi di questo capitolo, sono da intendersi funzionali alla comprensione dell'iter progettuale e di installazione del mock-up nella camera di prova del laboratorio, e, quindi, strettamente interconnessi con le attività di testing che saranno ampiamente specificate nel prossimo capitolo.

6.1 Il processo di design per il mock-up

> "Standards and procedures are established by the project specification and architectural drawings. The development of the specification is therefore a critical step in a quality assurance programme. In all the steps that follow including shop drawing production and review, mock-up and field testing, fabrication and assembly and curtain wall installation, there are elements of quality control and quality assurance".[2]
> [CMHC, 2004, Cap. 7, p.1]

In linea con la struttura metodologica della ricerca, la necessità di rispondere alle problematiche messe in evidenza dagli effetti del cambiamento climatico della Regione del Mediterraneo, conduce ad indagare le caratteristiche dei sistemi di facciata continua attraverso lo sviluppo di un sistema modulare, quindi della tipologia a cellula, capace di garantire adeguate prestazioni in relazione alle sollecitazioni esterne.
Prima di addentrarci nella trattazione delle attività di simulazione e testing che consentono di valutare i deficit e i livelli prestazionali delle facciate continue, appare utile evidenziare alcuni aspetti che hanno condotto allo sviluppo del mock-up che, come enunciato nel capitolo precedente i mock-up sono prototipi che rappresentano e replicano sezioni o porzioni del sistema di facciate continue o dell'involucro edilizio. Al fine di dichiarare la tipologia del mock-up che viene progettato per gli obiettivi della ricerca, è fondamentale affermare che esistono due tipi di mock-up: il *Visual mock-up* VMP e il *Performance Mock-Up* PMU.

Con riferimento al report sui sistemi di facciate continue pubblicato dall'*American Society of Civil Engineers* ASCE[3] [McFarquhar, 2013, pp. 34-35], il Visual mock-up viene spesso utilizzato come punto di riferimento per la qualità prevista dei materiali e la coerenza dell'installazione (in loco) e consente all'appaltatore/subappaltatore di dimostrare ai proprietari e al team di progettazione che il lavoro sarà eseguito correttamente secondo gli standard del settore.
Il Performance Mock-Up è più sofisticato della prima tipologia e le prestazioni vengono create e testate in camere di prova presso un produttore o un laboratorio indipendente. Il PMU può essere sottoposto a una sequenza di test, tra cui il carico laterale (ad esempio, il carico del vento) per la risposta strutturale, il racking sismico, l'infiltrazione dell'acqua (statica e dinamica), l'infiltrazione dell'aria, le prestazioni termiche e la trasmissione del suono.

Da queste definizioni, nella presente ricerca, si fa riferimento al Performance mock-up, in quanto il mock-up progettato come rappresentazione univoca del modello in scala 1:1 di facciata continua, è soggetto a simulazione su software ma, in particolare, a procedure di

prova mediante test condotti in laboratorio al fine di verificare la validità della sua prestazione.
Il *processo di design* del mock-up viene avviato in sinergia diretta con l'azienda Cianciolo Group s.rl., che ha guidato la preparazione dei disegni tecnici e di assemblaggio, permettendo un avanzamento della conoscenza delle specifiche tecniche sulla progettazione di questi sistemi, fino alla realizzazione del mock-up stesso.
Per completezza, si riportano i *criteri* che hanno orientato la definizione del mock-up, messi in evidenza dal quadro teorico e critico della ricerca, rispetto ai deficit ricorrenti delle facciate continue:
- integrazione di materiali che soddisfano il requisito di durabilità, per evitare una diminuzione delle prestazioni, al di sotto dei livelli previsti nelle condizioni di servizio;
- adozione di sistemi di connessione e di tenuta, come sigillanti e guarnizioni, che garantiscano un adeguato controllo e limitano le infiltrazioni d'acqua e le perdite d'aria;
- individuazione delle caratteristiche tecniche delle superfici trasparenti (lastre di vetro) in grado di garantire un controllo della temperatura esterna, per evitare flussi di calore indesiderati nello spazio interno;
- definizione di un sistema modulare che consenta, ove possibile, l'ispezionabilità delle parti strutturali e un'adeguata manutenzione rivolta a garantire che il deterioramento del sistema o dei materiali che la compongono non ne causi il collasso o non amplifichi il danno.

La valenza di questi criteri si sviluppa in sincronia su due linee trasversali al processo di progettazione del mock-up:
1. i criteri rispecchiano la scelta della tipologia di facciata continua (a cui si fa riferimento nel capitolo precedente) da valutare sperimentalmente attraverso attività di simulazione e mediante le procedure di prova che caratterizzano le attività di testing. Difatti, progettare e costruire un mock-up di facciata continua a cellula, in accordo con l'azienda, consente di ridurre le tempistiche di installazione in quanto questa tipologia prevede la costruzione delle singole cellule in fabbrica e, la posa in opera in cantiere avviene attraverso il semplice assemblaggio dei diversi moduli che costituiscono il mock-up. In questo caso, l'installazione si riferisce al montaggio delle cellule nella camera di prova del laboratorio, attraverso cui è possibile la misurazione delle caratteristiche prestazionali (Cfr. Cap. 7);

2. i criteri portano alla definizione dei requisiti prestazionali che il mock-up dovrà asseverare, che vengono distinti in:
- *carichi strutturali*: si intende la resistenza alla pressione del vento, in quanto la velocità di impatto del vento sulla porzione di facciata aumenta con l'altezza e la resistenza alle dilatazioni termiche attraverso l'utilizzo di materiali che si adattano agli stress che possono essere causati da un differenziale di temperatura;
- *agenti atmosferici*: si intende la capacità del mock-up a controllare le perdite d'aria e le infiltrazioni d'acqua, identificati come i fallimenti più ricorrenti delle facciate continue;
- *agenti fisici*: si intende la trasmittanza termica (valore U, la cui unità di misura è W/m2K, definita nel cap. 5) che rappresenta il parametro per calcolare le dispersioni termiche e rispetto alla quale si associa una riduzione del consumo energetico in condizioni di servizio degli edifici.

La verifica delle prestazioni del mock-up avviene mediante simulazione su software parametrico e azioni di testing, considerati come meccanismi e strumenti fondamentali attraverso i quali è possibile prevedere il grado di adempimento delle funzioni del mock-up per il soddisfacimento dei requisiti individuati.
Le procedure di prove che definiscono l'attività sperimentale derivano dalla necessità di misurare le prestazioni del mock-up proposto rispetto agli effetti degli eventi estremi di

cambiamento climatico della Regione del Mediterraneo quali, temperature estreme, precipitazioni intense e intensificazione del carico da vento.
Per una chiara identificazione degli aspetti che hanno contraddistinto il processo di design del mock-up, si mette in rilievo come i criteri sopra enunciati hanno influenzato direttamente i parametri di progetto del modello di facciata continua a cellula, portando alla definizione di variabili progettuali da cui dipendono le prestazioni del mock-up.

Basandoci sulla revisione critica dei componenti delle facciate continue proposta nel capitolo precedente (Cfr Cap. 5), i parametri di progetto intesi come variabili prestazionali identificano un controllo rispetto a:
- *intelaiatura*: larghezza e spessore dell'intelaiatura dei profili in alluminio:
- *giunti*: dimensione del giunto di dilatazione tra i moduli del sistema;
- *sistema di drenaggio*: posizionamento del sistema di drenaggio dei moduli per evitare infiltrazioni d'acqua;
- *stratificazione del vetro*: proprietà termiche delle lastre di vetro per il controllo del flusso termico tra interno ed esterno;
- *cavità del vetro*: larghezza della cavità d'aria o di gas all'interno della lastra di vetro, per evitare l'innesco di moti convettivi che causano la perdita di prestazioni a livello termico (strettamente correlata alla variabile precedente);
- *ritenzione del vetro*: mediante guarnizioni in EPDM.

Da sottolineare che il termine *variabile* si riferisce alla possibilità di modifiche dimensionali, materiche e tecnologiche rispetto ai componenti del sistema; modifiche che vanno controllate in quanto una sola variazione in uno dei componenti del sistema potrebbe comportare un diverso funzionamento prestazionale. Nei software di simulazione, le modifiche possono essere apportate con facilità nella fase di preparazione degli input della simulazione.
Al contrario, le variabili progettuali si caratterizzano da alcuni vincoli che si collegano ai processi di installazione degli elementi che costituiscono il mock-up.
Trattandosi della progettazione di una facciata continua della tipologia a cellula, un aspetto da tenere in considerazione è l'allineamento tra i diversi moduli che potrebbe creare delle sporgenze e dei disallineamenti causando un malfunzionamento del mock-up rispetto al requisito di sicurezza strutturale, oltre ai principali deficit quali infiltrazioni d'acqua e perdita d'aria.
Questo vincolo che potrebbe rappresentare una problematica rilevante per la garanzia delle prestazioni che viene risolto mediante il fissaggio di una clip di allineamento strutturale che viene fatta scorrere attraverso le teste ad incastro dei moduli adiacenti per mantenere l'allineamento orizzontale. In fase di design del mock-up, la dimensione della clip deve essere presa in esame per mantenere le adeguate tolleranze, che permettono il movimento di soglia accettabile tra i vari moduli. Questi aspetti vengono qui accennati, ma saranno ripresi nel prossimo Capitolo (Cfr. Cap. 7) in quanto fanno riferimento all'installazione del mock-up nella camera di prova per la verifica prestazionale mediante attività di testing.

Da questo sintetico quadro, emerge come l'interrelazione di requisiti e variabili prestazionali conduce alla strutturazione del processo di design del mock-up [Fig. 6.2] che, per la presente ricerca, rappresenta un approccio metodologico iterativo basato sull'identificazione di parametri progettuali e vincoli di installazione da tenere in considerazione fino alla realizzazione del modello in scala 1:1 - attraverso la selezione di materiali adeguati alle problematiche individuate – da simulare e testare ed eventualmente aggiustare il design, finché il mock-up non costituisce un prodotto efficace.

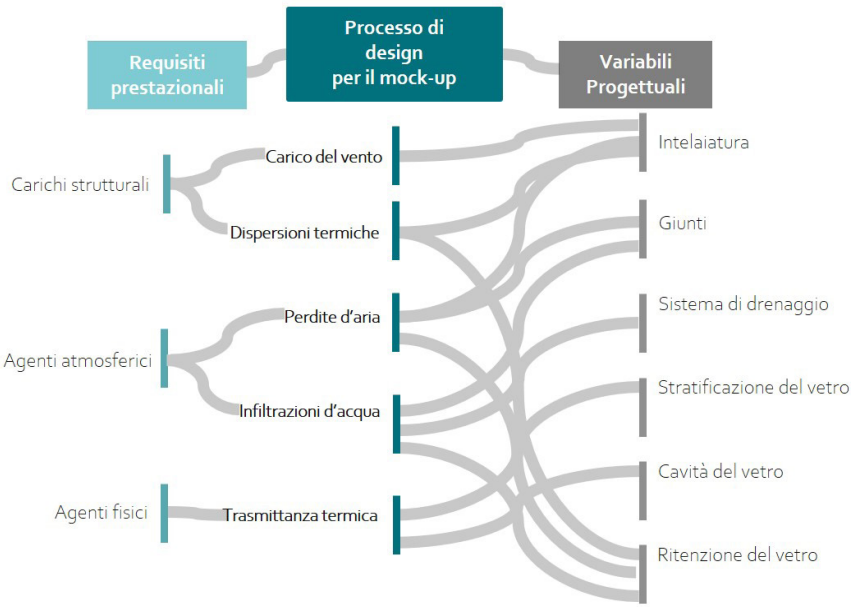


Fig. 6.2. Processo di design per il mock-up. Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Dopo tale premessa, basata sul riconoscimento degli aspetti tecnici che hanno contribuito a definire l'approccio metodologico per il processo di design del mock-up della fase sperimentale, il prossimo paragrafo è impostato sulla definizione delle caratteristiche tecnologiche dei principali elementi costitutivi delle cellule e sulla configurazione della geometria del mock-up.
Quest'ultima è in stretta relazione con la modellazione della geometria da realizzare sul software parametrico per l'attività di simulazione e con le dimensioni della camera di prova del laboratorio, su cui viene alloggiato il mock-up per testarne le sue prestazioni.
Per questi motivi risulta utile dare delle specifiche tecniche su dimensioni e materiali che costituiscono il mock-da sottoporre a sperimentazione tramite simulazione e testing.

6.2 La caratterizzazione tecnologica del mock-up

"Today, higher demand exists for high-performance buildings
in general and for curtain wall systems in particular. [...].
The curtain wall system is now considered one of the most important components in buildings
that can help save heating, cooling, and lighting energy and, in some cases, even generate electricity".[4]
[Memary, 2013, p.194]

Le attività per la strutturazione del processo di design del mock-up, costituiscono la base per la descrizione delle caratteristiche tecnologiche relative agli elementi che costituiscono il sistema di facciata continua a cellula. La volontà di riportare un approfondimento descrittivo risiede nel provare a fornire un manuale d'uso del mock-up in relazione alle prestazioni che si intendono raggiungere a seguito degli effetti dovuti agli eventi estremi nel contesto Mediterraneo.
Definite le variabili prestazionali, si passa al dimensionamento degli elementi costitutivi del mock-up; questa fase è stata avviata con gli ingegneri dell'ufficio tecnico, in cui i dimensionamenti delle sottostrutture metalliche, delle staffe di sostegno e ritenuta delle lastre e di tutti gli altri componenti del sistema di ancoraggio sono stati calcolati in funzione del carico verticale e delle spinte orizzontali, ossia delle forze di compressione/depressione del vento.
Il dimensionamento delle staffe di ancoraggio del mock-up alla camera di prova è invece

obbligato dalle dimensioni delle travi sismiche interne alla camera sulle quali viene ancorato il mock-up (Cfr. Cap. 7). Si vuole mettere in evidenza che ai fini degli obiettivi della ricerca, il calcolo strutturale non viene trattato in quanto il dimensionamento di questi elementi deve essere calcolato ogni volta sia necessario mettere in opera il sistema poiché risulta dipendente da parametri relativi all'ubicazione ed all'altezza dell'edificio, nonché agli elementi della struttura primaria di supporto (che per la presente ricerca risulta essere la camera di prova, nello specifico le travi sismiche).
Per questi motivi, la trattazione si limita a descrivere le specifiche tecnologiche delle variabili prestazionali individuate come elementi costitutivi del mock-up.

Il mock-up di facciata continua è caratterizzato da una configurazione geometrica semplice ed è stato concepito come un insieme di elementi quali, le cellule di numero pari a 6, assemblate a secco e costituite da una superficie trasparente e una opaca.
Le dimensioni totali del mock-up sono 4850 mm (larghezza) x 9430 mm (altezza) e queste sono rese possibili grazie alle dimensioni e alla tipologia della camera di prova che può accogliere provini jumbo-size (Cfr. Cap. 5) poiché è stata costruita in base ai trend del mercato che richiedono forme e dimensioni delle facciate continue sempre più complesse e performanti. Le sei cellule che compongono il mock-up sono disposte su due livelli, quindi tre per livello e hanno un'altezza tra i 4544 e i 4862 mm e una larghezza che va da una dimensione minima di 1500 mm ad una massima di 1700 mm.

La figura [Fig. 6.3] presenta la configurazione della geometria del mock-up e definisce il posizionamento delle diverse cellule nei due livelli. La scelta di progettare le cellule con diverse dimensioni è dovuta al fatto di voler misurare le prestazioni di uno stesso sistema a livello tipo-tecnologico ma con diverse caratteristiche dimensionali e verificare un eventuale diverso funzionamento delle cellule che può determinare un problema all'intero mock-up.
Per maggiori dettagli si rimanda all'Allegato 4.

Per maggiore chiarezza, in tabella [Tab. 1] vengono riportate le dimensioni relative alle sei cellule, caratterizzate da una superficie trasparente e una opaca, di cui si specificherà più avanti.

Cellula	Altezza H (mm)	Larghezza L (mm)	Sup. trasparente (m^2)	Sup. opaca (m^2)
1	4862	1525	4,932	2,27
2	4862	1772	4,932	3,51
3	4862	1502	2,41	4,72
4	4543	1502	2,41	4,22
5	4543	1772	4,932	2,99
6	4543	1525	4,932	1,80

Tab. 1. Informazioni relative alle dimensione delle 6 cellule che compongono il mock-up

Rispetto a tali precisazioni sull'assetto geometrico del mock-up - oggetto di feedback continui per determinare quale sia la configurazione più adatta per limitare possibili malfunzionamenti (spesso in corrispondenza dei giunti tra le cellule) – si riscontra dai disegni tecnici un controllo della fattibilità tale da rispondere ai requisiti prestazionali individuati.
Rispetto a questi ultimi, come detto precedentemente, la garanzia delle prestazioni viene demandata alle variabili progettuali che vengono qui di seguito approfondite.

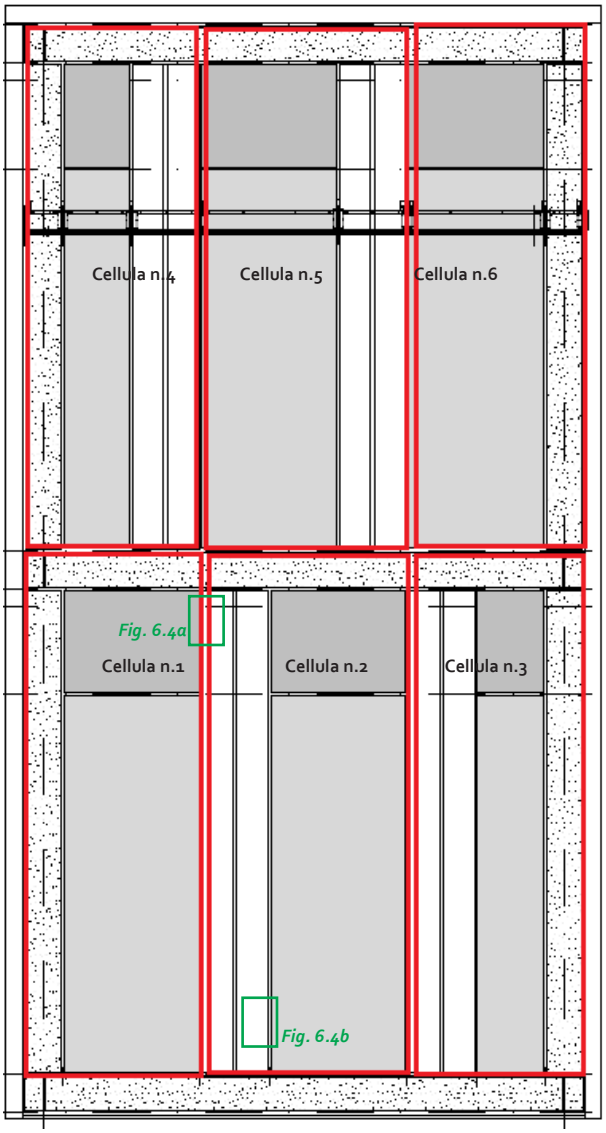


Fig. 6.3. Mock-up di facciata continua della tipologia a cellula da sottoporre ad attività sperimentale

Intelaiatura

Il primo elemento da prendere in esame è l'intelaiatura della cellula, in quanto essa assume la funzione di struttura portante del pannello in vetro. Il telaio è costituito in profili di alluminio estruso [Allegato 3] quali, montanti e traversi, in lega EN AW 6063 T6 (le cui caratteristiche sono messe in evidenza nel Cap. 5). Per limitare le dispersioni termiche e garantire una buona tenuta agli agenti atmosferici, i profili sono dotati di un sistema ad incastro maschio-femmina, la cui profondità è di 175 mm per ambedue le tipologie di profili, mentre la dimensione dello spessore del profilo maschio è 53 mm e del profilo femmina è 58 mm. La profondità è una delle dimensioni più importanti da considerare, non solo ai fini delle prestazioni della cellula rispetto al carico da vento come evidenziato nel processo di design del mock-up, ma determina la dimensione della zona di alloggiamento della lastra di vetro, compresa tra la linea esterna della facciata e il bordo interno; quest'ultimo caratterizzato dalla presenza della staffa di ancoraggio alla trave della camera.

La tabella [Tab. 2] riporta le dimensioni relative alla profondità, allo spessore e al peso dei profili in alluminio che costituiscono il telaio della cellula.
Come si può notare, il montante intermedio di supporto tra due cellule, è stato dimensionato con uno spessore più grande per una distribuzione ottimale del peso delle cellule.

Profili	Profondità (mm)	Spessore (mm)	Peso (g/m)	Lega
Montante femmina	175	58	3159	EN AW 6063 T6
Montante maschio	175	53	3080	EN AW 6063 T6
Montante intermedio	174,5	90	4224	EN AW 6063 T6
Traverso superiore	175	70	4177	EN AW 6063 T6
Traverso inferiore	175	108	4990	EN AW 6063 T6

Tab. 2. Dimensioni dei profili in alluminio

Giunti
I giunti sono fondamentali per il progetto delle facciate continue, in quanto svolgono un ruolo primario nel sigillare le superficie dell'involucro alle sollecitazioni esterne.
Una questione problematica deriva dal dimensionamento dei giunti di dilatazione tra le varie cellule, la cui dimensione è dettata dallo spazio richiesto dai singoli pannelli ad accomodare un movimento elastico e a resistere sotto estreme condizioni climatiche.
Come specificato nella sezione relativa ai fallimenti dei giunti (Cfr Cap. 5), un'espansione termica può determinare un movimento che potrebbe provocare slittamenti lungo la linea dei giunti (orizzontali e verticali) rispetto alle cellule del livello superiore e inferiore.
Per garantire delle prestazioni rispetto ai carichi che si andranno ad applicare nelle procedure di prove, in particolare per l'infiltrazione d'acqua e il carico da vento, con gli ingegneri si è optata una dimensione dei giunti che va dai 7 mm tra le cellule ai 13 mm nei giunti perimetrali del mock-up, i quali coincidono con il bordo perimetrale della camera di prova (per l'alloggiamento del mock-up) per assicurare il corretto movimento tra mock-up e camera di prova, nonché garantire una buona tenuta.

I giunti di tenuta [Fig. 6.4 (a, b)] e i supporti dell'intelaiatura vengono sigillati con silicone resistente e con elevata capacità di movimento.

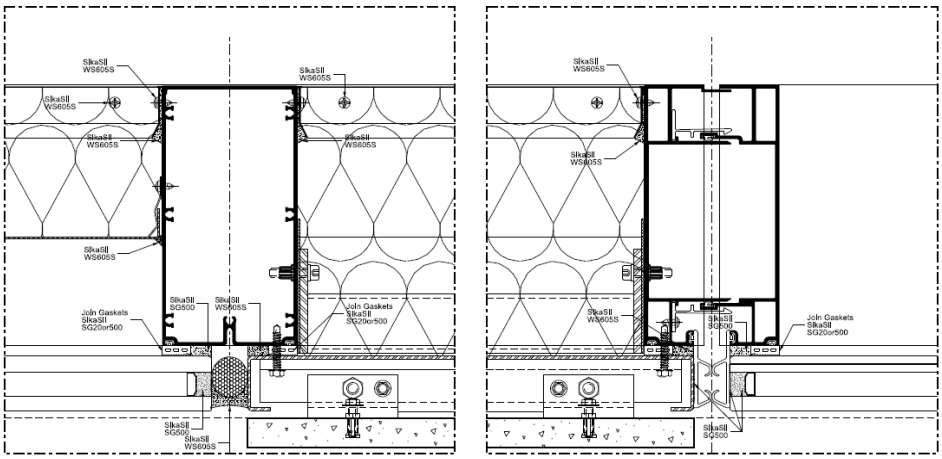


Fig. 6.4. Posizionamento dei giunti con sigillante siliconico:
a) dettaglio di connessione porzione trasparente e spandrel;
b) dettaglio di connessione spandrel e porzione trasparente.

Per evitare dei difetti durante l'applicazione del sigillante siliconico, è stata controllata la temperatura e l'umidità dell'aria, in quanto una temperatura al di sopra dei 50°C, provoca delle bolle che devono essere rimosse per il corretto funzionamento dei giunti.
Temperatura e umidità sono fattori che influenzano anche i tempi di asciugatura e presa dei sigillanti. Sebbene la dimensione dei giunti influenza l'aspetto esterno della facciata del mock-up, i consigli tecnici e le competenze scientifiche e pratiche acquisite, hanno orientato specifici livelli dimensionali (da 7 mm a 13 mm) rispetto alle esigenze di ottenere un alto grado prestazionale in relazione alle condizioni di eventi estremi per la Regione del Mediterraneo.
Un ulteriore aspetto da considerare durante l'applicazione del sigillante silicono (on-site) nei giunti è controllare la qualità della sigillatura, in particolare rispetto ai giunti di dimensione prossima ai 13 mm, in quanto più ampi sono i giunti, tanto più è il rischio di insorgenza di perdite d'aria e infiltrazioni d'acqua, richiedendo una costante verifica che accerti il corretto indurimento del materiale.
Il materiale scelto per le guarnizioni [Fig. 6.5] di tenuta agli agenti atmosferici è l'EPDM (caratteristiche denunciate nel Cap. 5) conforme alla norma ASTM C864-05(2019)5, in cui sono riportate indicazioni e specifiche relative alle guarnizioni e gli accessori preformati a compressione elastomerica densa per l'uso in applicazioni di sigillatura.

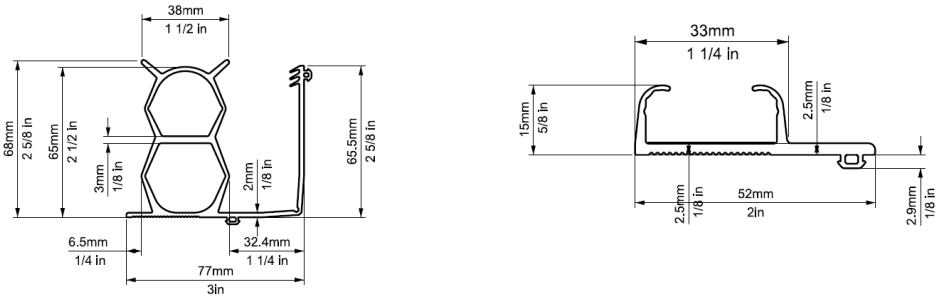


Fig. 6.5. Profili delle guarnizioni di tenuta in EPDM

Sistema di drenaggio
Il sistema di drenaggio ha il compito di allontanare l'acqua nelle parti interne della struttura e di farla quindi scivolare esternamente. La progettazione di un buon sistema di drenaggio incide infatti sulle prestazioni complessive del mock-up. In questo caso, il sistema è realizzato mediante sovrapposizione dei livelli di drenaggio per mezzo di sigillante siliconico di ricoprimento. Questa soluzione deve essere verificata mediante le attività di testing per assicurare il corretto funzionamento e lo scolo esterno dell'acqua [Fig. 6.6].

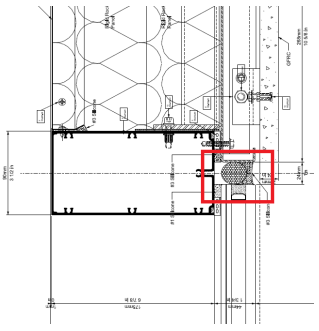


Fig. 6.6. Sistema di drenaggio del mock-up

Stratificazione e cavità del vetro

A causa dell'importanza delle superfici trasparenti (elemento cruciale e caratteristico del sistema di facciata continua) nel ridurre il fabbisogno di calore e il consumo energetico degli involucri edilizi [Cuce, et al., 2014 (a)], nella presente ricerca a carattere sperimentale viene prestata molta attenzione alla scelta del sistema che compone la lastra di vetro, al fine di progettare un mock-up che soddisfi le prestazioni rispetto gli eventi di cambiamento climatico messi in evidenza per la Regione del Mediterraneo.

Si fa riferimento alle temperature estreme e, per le superfici trasparenti, risulta necessario controllare sia il flusso termico e che quello luminoso al fine di evitare importanti perdite a livello termico ed esacerbare i fenomeni di ondata e isola di calore (in riferimento alle schede di controllo termico e luminoso dell'allegato 1 del Cap. 3).

Come evidenziato da Mempouo et al. [2010], la perdita di calore attraverso le superfici trasparenti rappresenta ancora circa il 47% della perdita totale di energia dall'involucro edilizio e questo può essere attribuito alle scarse caratteristiche di isolamento termico della superficie vetrata [Cuce, et al., 2014 (b)]. Sebbene l'intelaiatura in alluminio causa sensibili perdite attraverso le facciate continue a causa della loro elevata conduttività termica, l'impatto del telaio sulla determinazione delle perdite è incomparabile con l'impatto del vetro poiché l'area vetrata costituisce la percentuale maggiore della costruzione [Bae, et al., 2015; Cuce, et al., 2015].

Pertanto, i fattori che conducono alla scelta della tipologia della superficie vetrata sono la *trasmittanza termica* e il *coefficiente di guadagno solare*. Il primo fattore, valore U, W/m^2k (Cfr. Cap. 5) misura le caratteristiche di perdita di calore del sistema trasparente, mentre il secondo (solar heat gain coefficient SHGC) valore g, W/m^2k misura quanto efficiente sia la superficie vetrata a bloccare il calore causato dalla luce solare. Il valore g generalmente varia tra 0 e 1, (dove 1 è un'ombreggiatura bassa e zero è un'ombreggiatura alta), quindi più basso è il numero, minore è il guadagno di calore attraverso il sistema vetrato.

Per queste ragioni, il miglioramento delle prestazioni nel regolare e gestire il controllo del flusso termico e luminoso (specificati nell'allegato 1 del Cap. 3) rappresentano dei parametri essenziali nella scelta della tipologia di vetro da adottare, evitando perdite di calore indesiderate.

Prima di trattare le caratteristiche delle superfici trasparenti che costituiscono le sei cellule, risulta necessario precisare che, attraverso le interlocuzioni continue con gli ingegneri, si è optato di suddividere la superficie vetrata in due porzioni [Fig. 6.7].

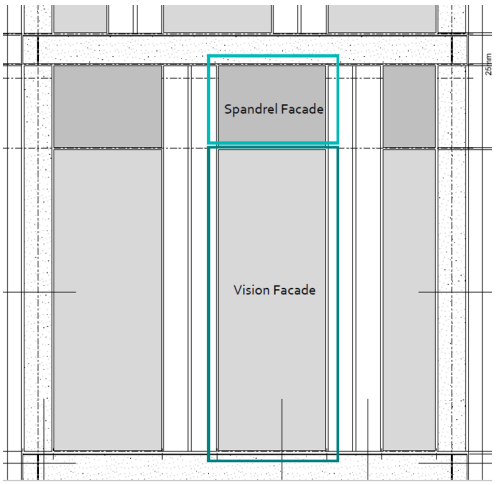


Fig. 6.7. Vision e Spandrel facade della cellula del mock-up

La prima porzione viene denominata *vision facade*, ovvero la superficie di vetro trasparente mentre la seconda, identificata con il nome di *spandrel facade*, è la porzione di vetro opaca che si è ritenuto necessario inserirla in quanto ha il compito di coprire gli elementi di connessione del mock-up alle travi della camera di prova.
Le due tipologie di vetratura, trasparente e opaca, presentano delle caratteristiche diverse dipendenti dalla stratificazione materica che vengono qui di seguito identificate.

Attraverso l'utilizzo di un *performance calculator* [Fig. 6.8], ovvero uno strumento di simulazione che consente di impostare le stratificazioni con conseguente calcolo dei parametri caratteristici delle superfici trasparenti e messo a disposizione dall'ufficio tecnico dell'azienda Cianciolo, sono stati caratterizzati i fattori della trasmittanza termica e il coefficiente di guadagno solare per le porzioni vision facade e spandrel facade.

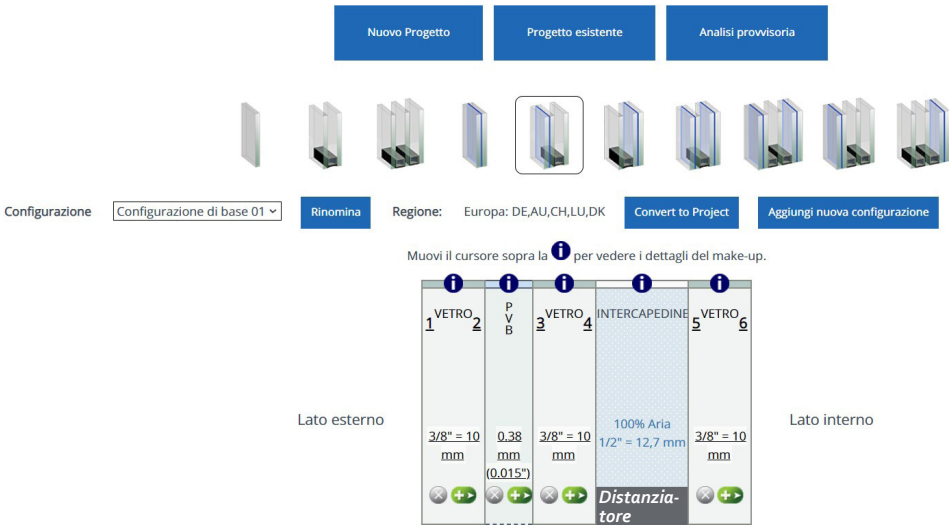


Fig. 6.8. Schermata di visualizzazione del performance calcultator

I calcoli vengono effettuati in conformità ai metodi di prova delle normative: EN 410:2011[6], EN 673:2011[7] e NFRC 2010[8]. Per definire la stratigrafia delle diverse porzioni, sono state effettuate varie simulazioni al fine di individuare le soluzioni più congruenti ad un contesto ambientale di tipo Mediterraneo, caratterizzato da un alto livello di irraggiamento e dove le temperature massime si aggirano intorno ai 40°C nella stagione estiva (Cfr. 3).
Lo scopo infatti è quello di utilizzare un vetro che riduca il trasferimento di calore, optando per la tipologia di vetrata isolante, conosciuta con la denominazione *Insulated Glass Unit* IGU[9], di solito costituite da due lastre di vetro separate da un'intercapedine che rallenta il trasferimento di calore.

Partendo dalla tipologia di vetrata a controllo solare, la porzione vision facade è costituita da una doppia vetratura, di cui quella interna è caratterizzata da un doppio pannello stratificato con interposizione di pellicola in PVB (polivinilbutirrale), materiale plastico, resistente allo strappo e che, in caso di rottura, tiene uniti i pezzi di vetro.
La dimensione del vetro isolante è di 10 mm, mentre per le due lastre di vetro che compongono il vetro stratificato sono di 5 mm, con PVB di 0,76 mm.
Le prestazioni a livello termico dipendono dal materiale interposto nell'intercapedine che si crea nella doppia vetratura, che può essere aria o altro gas come argon, Kripton; la di-

mensione della cavità riduce il trasferimento di calore e fa in modo che la superficie interna del vetro sia mantenuta a una temperatura più vicina a quella dell'aria ambiente, con conseguente miglioramento del comfort e riduzione del rischio di condensa superficiale (si fa riferimento ai fallimenti delle facciate continue del Cap. 5).
Nella stratigrafia proposta [Fig. 6.9], la cavità è di dimensioni pari a 15,9 mm e viene riempita con il 10% d'aria e il 90% di gas argon, quest'ultimo scelto perché funziona bene a livello termico ed è più economico rispetto al Kripton. La larghezza della cavità è determinata dal distanziatore (spacer) generalmente in alluminio o in materiale plastico resistente.
La tipologia del materiale del distanziatore acquisisce importanza, in quanto ha un impatto sul rendimento termico complessivo della vetrata.



Fig. 6.9. Stratigrafia vision facade

Si vuole mettere in evidenza un limite nel calcolo delle prestazioni della vetrata, in quanto il peformance calculator non prende in considerazione le caratteristiche del distanziatore (la Fig. 6.8 mostra in grigio la zona del distanziatore non calcolata). Per questa vetrata, il distanziatore è in alluminio ed è connesso mediante adesivo siliconico bicomponente a polimerizzazione neutra [Fig. 6.10], mentre il sigillante butilico viene utilizzato per evitare che il gas intrappolato fuoriesca dalla cavità.

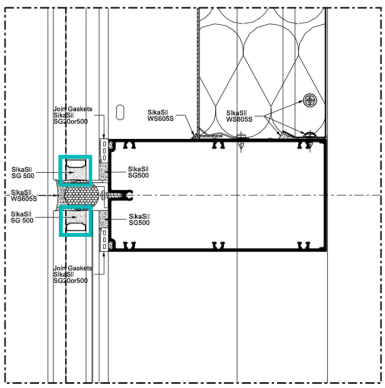


Fig. 6.10. Distanziatore della cavità della vetrata

Le seguenti tabelle [Tab. 3; Tab. 4] riportano i valori caratteristici della vetrata, calcolati attraverso il software, utilizzando sia lo standard di calcolo europeo che quello americano.

Luce visibile				Ultravioletti	Energia solare						Proprietà termiche
Trasmissione	Riflessione		Indice di resa cromatica generale (Ra)	Trans UV (τuv %)	Trasmissione	Riflessione		Assorbimento	Fattore solare (g%)	Coefficiente di ombreggiamento (sc) [g/0,87]	Fattore di scambio termico (q_i)	Valore U-Value W/m²K
Visibile (τv %)	pv % est.	pv % int.			Solar (τe %)	ρe % est.	ρe % int.	Solare (αe %)				
67,4	14,3	15,5	94,5	0,1	30,7	35,5	31,3	33,9	34,3	0,39	3,6	1,025

Tab. 3. Valori con standard di calcolo europeo

Luce visibile				Energia solare					Proprietà termiche			Indice di selettività spettrale (LSG)
Trasmissione	Riflessione		Indice di resa cromatica generale (Ra)	Trasmissione	Riflessione	Coefficiente di guadagno solare (SHGC)	Coefficiente di ombreggiamento (sc)	Guadagno di calore relativo (RHG)	Valore U		Valore R	
Visibile (τv %)	pv % est.	pv % int.		Solare (τe %)	ρe % est.				Notte invernale (Btu/hr·ft²·F)	Giornata estiva (Btu/hr·ft²·F)		
67	14	15	94,4	28	38	0,32	0,36	75	0,238	0,173	4,20	2,13

Tab. 4. Valori con standard di calcolo americano

Come si può notare, non vi sono sostanziali differenze tra i risultati ottenuti dai metodi di calcolo utilizzati, se non nelle diverse unità di misura che caratterizzano ad esempio la trasmittanza termica che per la normativa EN è W/m²k , mentre il valore U, nello standard NFRC 2010, è il British Thermal Unit (BTU) che misura la quantità di energia necessaria per produrre una certa quantità di calore.
Per la porzione vision facade, la trasmittanza risulta essere pari a 1 W/m²k e il coefficiente di guadagno solare di 0,32, ritenuti accettabili per gli scopi prefissati della presente ricerca ed in linea con i requisiti della normativa vigente.
Inoltre, è stato eseguito il calcolo della trasmittanza termica del nodo in accordo con la norma EN ISO 10077-2:2017 [Allegato 5].

Per quanto riguarda la stratigrafia della porzione spandrel facade [Fig. 6.11], si è optato per un doppio vetro a controllo solare. La dimensione dell'intercapedine di aria e argon è di 18 mm rispetto ai 15,9 mm della vision facade, vista la diversa tipologia di vetratura che indirizza uno spessore più grande per assicurare la riduzione del trasferimento di calore dall'esterno all'interno.

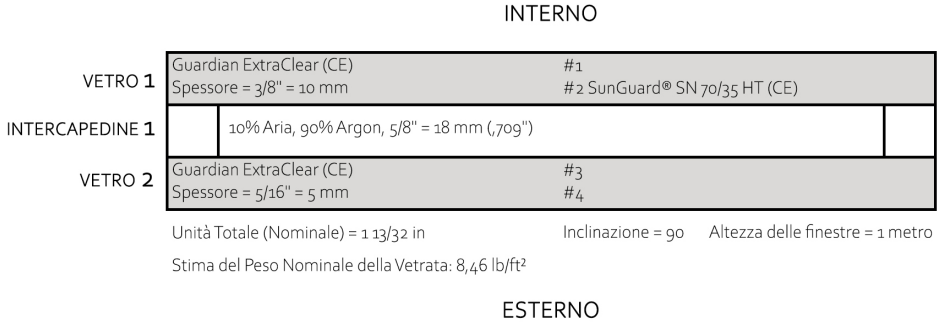


Fig. 6.11. Stratigrafia spandrel facade

Come per la vision facade, si riportano i risultati dei calcoli tramite software: la trasmittanza risulta essere pari a 1 W/m2k e il coefficiente di guadagno solare di 0,32 [Tab. 5; Tab. 6].

Luce visibile			Ultravioletti	Energia solare							Proprietà termiche
Trasmissione	Riflessione		Trans UV (τuv %)	Trasmissione	Riflessione		Assorbimento	Fattore solare (g%)	Coefficiente di ombreggiamento (sc) [g/0,87]	Fattore di scambio termico (q_i)	Valore U-Value W/m²K
Visibile (τv %)	pv % est.	pv % int.		Solare (τe %)	pe % est.	pe % int.	Solare (αe %)				
67,9	14,4	15,6	8,2	31,7	35,5	37,9	32,8	34,3	0,40	2,6	1,0

Tab. 5. Valori con standard di calcolo europeo

Luce visibile			Ultravioletti	Energia solare							Proprietà termiche		
Trasmissione	Riflessione		Trans UV (τuv %)	Trasmissione	Riflessione		Assorbimento	Coefficiente di guadagno solare (SHGC)	Coefficiente di ombreggiamento (sc)	Guadagno di calore relativo (RHG)	Valore U		Valore R
Visibile (τv %)	pv % est.	pv % int.		Solare (τe %)	pe % est.	pe % int.	Solare (αe %)				Notte invernale (Btu/hr·ft²·F)	Giornata estiva (Btu/hr·ft²·F)	
68	14	16	10	29	38	41	33	0,32	0,36	75	0,245	0,160	4,08

Tab. 6. Valori con standard di calcolo americano

Come anticipato precedentemente, le cellule sono caratterizzate dalla presenza di una superficie opaca [Fig. 6.12] in materiale GFRC[10] (Glass, Fiber, Reinforced, Concrete), pannello costituito da calcestruzzo e rinforzato con fibre di vetro.

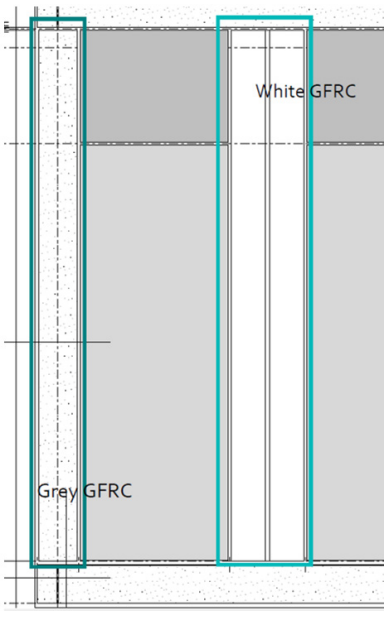


Fig. 6.12. Dettaglio pannelli in GFRC

I pannelli di GFRC dello spessore di 15 mm da fabbrica sono di colore grigio nelle zone perimetrali del mock-up e per segnare la divisione tra i due livelli e di colore bianco tra le diverse cellule. La connessione dei pannelli all'intelaiatura della cellula avviene mediante telai in alluminio che sono stati opportunatamente dimensionati per evitare un sovraccarico della struttura. La scelta di inserire questi elementi in GFRC, che sono aggettanti nelle parti perimetrali, è dato dall'obiettivo di prevenire fallimenti ai bordi perimetrali della cellula, in particolare se si considerano l'intensificarsi delle precipitazioni e dei carichi del vento. Inoltre, si vuole analizzare il comportamento termico mediante il software di simulazione per validare il loro funzionamento a temperature estreme della Regione del Mediterraneo. Mentre, le prestazioni di questi elementi rispetto alle infiltrazioni d'aria in regime statico e dinamico, saranno verificate attraverso le attività sperimentali di testing. Quest'ultime aiuteranno a capire il vero funzionamento degli elementi opachi (che non hanno alcuna funzione strutturale) e orienteranno le decisioni per correggere eventuali problematiche e, nel caso anche modificare la geometria, la dimensione dei componenti opachi. Le pannellature in GFRC bianche che sono pensate tra le cellule hanno la funzione di coprire il sistema di drenaggio e le parti strutturali dell'intelaiatura delle cellule e, quindi, si vuole determinare un'ulteriore funzione di protezione alle sollecitazioni climatiche esterne.

Ritenzione del vetro

La connessione tra le lastre di vetro e la cellula avviene mediante guarnizioni in EPDM [Fig. 6.13] con riferimento alla norma ASTM C86411, di 19 mm x 7 mm, dimensionate rispetto al peso delle lastre di vetro. Oltre a svolgere la funzione di fermavetro, la guarnizione ha lo scopo di assicurare la tenuta aria-acqua e di mantenere il vetro isolato dal telaio per impedire vibrazioni e passaggio di calore. Si intende mettere in evidenza che le prestazioni a livello termico non vengono incluse nel performance calculator, pertanto risulta necessario verificare il reale funzionamento della guarnizione in ragione di malfunzionamenti rispetto a infiltrazioni d'aria, perdite d'aria e dispersioni termiche.

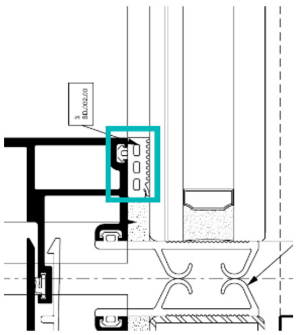


Fig. 6.13. Guarnizione di tenuta in EPDM

In conclusione, l'esplicitazione delle variabili progettuali che, per la presente ricerca, rappresentano i componenti principali costitutivi della cellula del mock-up ipotizzato, ha condotto la trattazione a porre l'accento su alcune questioni di tipo geometrico e materico per definire l'assetto tecnologico del mock-up. Definita quindi la messa a sistema del mock-up, gli step successivi sono indirizzati alla fase sperimentale della ricerca, caratterizzata dall'interconnessione delle attività di simulazione e testing, al fine di verificare il funzionamento prestazionale del mock-up rispetto ad eventi estremi della Regione del Mediterraneo.
I paragrafi che seguono delineano gli strumenti adottati per la modellazione del mock-up e le attività di analisi simulativa condotta per il mock-up su software parametrico.

6.3 I tools di supporto per le azioni di simulazione

"Parametric design methods, on the other hand,
allow designers to generate and explore geometries
of building elementsby manipulating certain parameters."[12]
[Aksamija, 2018, p.1]

Per la fase sperimentale della ricerca, ricorrere ai software di progettazione parametrica significa convalidare il processo di design, attraverso una prima attività di analisi delle performance del mock-up, soprattutto in considerazione degli eventi estremi di cambiamento climatico.
Prima di addentrarci nella trattazione sulle attività di simulazione condotte sul mock-up, sembra utile tracciare, in sintesi, l'integrazione degli strumenti digitali nel processo di progettazione che, negli ultimi anni, hanno contributo a dotare il progetto architettonico di informazioni alla scala predittiva nell'ambito di adattamento ai cambiamenti climatici. L'approccio operativo, basato su strumenti di modellazione e simulazione delle prestazioni, consente agli attori coinvolti nel processo di progettazione, di realizzare formulazioni di ipotesi di verifica e validazione delle scelte effettuate in relazione a prestazioni rispondenti a specifiche esigenze iniziali. La diffusione di strumenti digitali, che vengono qui intesi come strumenti di supporto al processo progettuale, è data dalla possibilità di ricreare le condizioni ambientali all'interno dell'ambiente virtuale, consentendo l'inserimento di dati climatici, ottenendo così dati significativi dalle analisi effettuate [Bassolino, 2014].
La figura [Fig. 6.14], riporta un confronto grafico tra l'approccio convenzionale e il progetto parametrico, che mette in evidenza la variabile temporale, come fattore decisivo nella complessità della progettazione parametrica e allo stesso tempo determinante nel gestire modifiche e correzioni in un tempo breve, poiché tutti gli elementi sono collegati parametricamente [Eltaweel, & Yuehong, 2017].

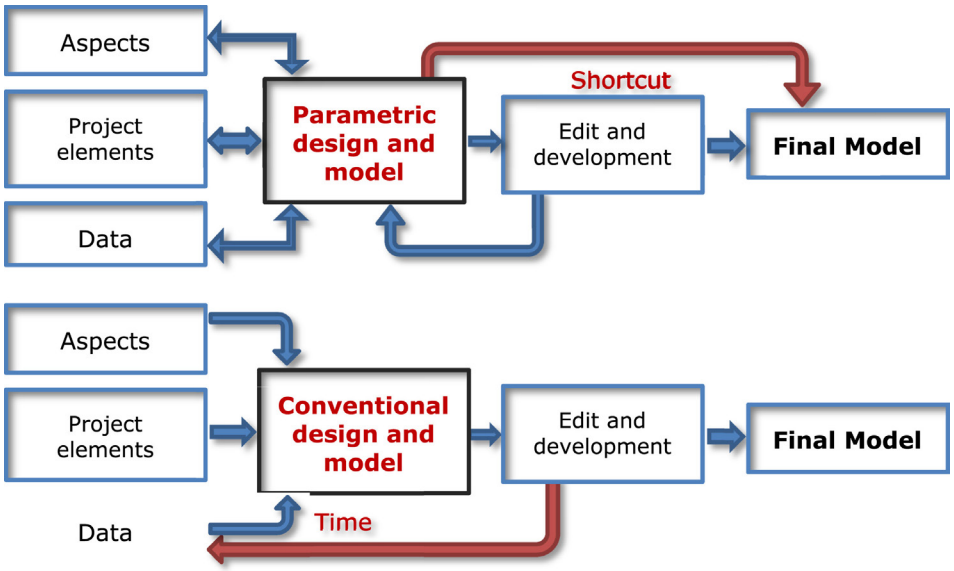


Fig. 6.14. Confronto tra progettazione convenzionale e progettazione parametrica

Entrando nello specifico delle caratteristiche di questi strumenti informativi, la *modellazione parametrica* è un tipo di modellazione tridimensionale che si differenzia dalla modellazione solida classica perché si basa sulla messa in relazione di varie componenti/parti del

modello tra di loro o con numeri o caratteristiche che vengono appunto definiti parametri. I metodi di progettazione parametrica rappresentano un processo basato su algoritmi matematici[13] che consentono l'espressione di parametri e regole che, nel loro insieme, definiscono e codificano la relazione che si instaura tra clima, comportamento delle facciate, comfort interno e utilizzo dell'energia [Ricci, et al., 2021].
La relazione, come risultato del processo parametrico, dovrebbe consentire l'ottimizzazione delle prestazioni in termini quantitativi e qualitativi e in modo ciclico-iterativo, affinché si possano validare i risultati dopo aver modificato i parametri inseriti.
Questo aspetto costituisce una modalità particolarmente interessante di strutturare e realizzare i modelli 3d virtuali, poiché permette di concatenare una serie di modifiche e di automatizzare dei processi ogni volta che si va ad agire su un determinato parametro per apportare una modifica. Una definizione (file) parametrica ben strutturata permette di apportare velocemente e in maniera esatta modifiche al progetto o di studiare in maniera relativamente semplice una serie di possibilità o alternative partendo da dei presupposti numerici (dimensionali, quantitativi) o formali assegnati.
Tuttavia, uno sguardo critico all'applicazione dei metodi parametrici nella pratica della progettazione rivela che il loro uso è ancora prevalentemente basato su criteri estetici, strutturali e di fabbricazione [Naboni, 2014].
D'altro canto, la loro importanza risiede nel collegamento tra software di progettazione parametrica, strumenti di simulazione energetica e algoritmi di ottimizzazione che consentono di personalizzare i singoli componenti dell'edificio o l'intera forma dell'edificio per ottenere performance elevate e ridurre di conseguenza il consumo energetico previsto [Glassman, & Reinhart, 2013] che rappresenta una delle cause del cambiamento climatico (Cfr. Cap. 1). I programmi parametrici possono studiare e analizzare cambiamenti del clima e ambientali come il movimento del sole, la data, la posizione, l'illuminazione, la radiazione, l'aumento di calore, le ombre e quindi, controllarli in modo parametrico.
La parametrizzazione consente di eseguire analisi complesse: multivariate, che coinvolgono un gran numero di parametri e ambienti (urbani) a scala ancora maggiore, consentendo l'incorporazione di procedure di ottimizzazione non lineare [Aguilar-Carrasco, et al., 2022].
Pertanto questi strumenti, consentono di risolvere vari problemi di progettazione nelle prime fasi della progettazione [Wagdy, & Fathy, 2015], e potrebbe anticipare le soluzioni ottimali per la progettazione di un edificio o qualsiasi componente di esso, in particolare attraverso l'utilizzo di parametri ambientali.
Per la fase sperimentale della ricerca, questa opportunità strumentale è rilevante per poter studiare le performance del mock-up, a livello termico, tenendo in considerazione che la temperatura è una delle variabili di cambiamento climatico, che detta soluzioni e strategie al fine di prevenire problematiche prestazionali a livello complessivo del mock-up e, allo stesso tempo, evitare effetti di calore indesiderato nello spazio ambientale interno.

Uno dei software più utilizzati per simulare dinamicamente le condizioni ambientali esterne è *Envi-MET*[14], strumento utilizzato in modo interdisciplinare per studiare il microclima a livello urbano, la cui prima uscita ufficiale del modello risale al 1998 [Tsoka, et al., 2018].
Sebbene ENVI-met sia uno dei modelli avanzati esistenti che consente un'analisi dettagliata della fisica e le interazioni ambientali esterne e interne, l'accuratezza del modello è un importante motivo di preoccupazione e gli studi di verifica e convalida sono necessari per validare i risultati ottenuti [Blocken, 2015].
Tuttavia, per le azioni di simulazione, ci si avvale del software di progettazione parametrica denominato *Grasshopper*[15], un editor grafico di algoritmi integrato con gli strumenti di modellazione 3D di *Rhinoceros*[16], che viene utilizzato per generare e controllare attraverso parametri, forme tridimensionali complesse.
La scelta sull'utilizzo del software Grasshopper si basa sulla *natura* stessa dello strumen-

to, essendo un motore modulare scalabile, basato sulla programmazione visuale e plug-in open-source. A differenza di Envi-MET, Grasshopper risulta essere più appropriato alla scala locale, mostrando soluzioni meno dettagliate ma garantendo domini spaziali più ampi. Al contrario, Envi-MET mostra limitazioni per essere ridimensionato verso domini su scala urbana a causa dell'elevato sforzo computazionale e viene inteso come uno strumento software all-in-one, dove l'interconnessione con strumenti esterni è poco esplorata [Pacifici, &Nieto-Tolosa, 2021]. Questa afferazione per gli obiettivi della ricerca rapppresenta un fattore problematico che limita l'interazione di parametri ambientali di uno specifico luogo (in questo caso della temperatura) con la geometrie e le caratteristiche materiche dell'oggetto da simulare (in questo contesto un mock-up di facciata continua). In aggiunta, rispetto ad Envi-MET, un vantaggio nell'utilizzo di Grasshopper è la facilità di modellazione 3D.

Pertanto, l'utilizzo del software Grasshopper risiede nella funzionalità dello stesso di essere inteso come strumento flessibile. Attraveso i suoi plug-in, dà la possibilità di modellare il sistema di facciata, in particolare il mock-up, secondo le specifiche dei vari componenti/elementi/materiali che lo compongono, in un sistema "aperto", ovvero dando la possibilità di modificare più volte l'intero sistema attraverso la parametrizzazione dei dati.
Grasshopper è scritto in termini di "componenti" con funzionalità predefinite e "collegamenti cablati" tra i componenti che fungono da conduttori di dati di input e output [Hsu, et al., 2015]. Difatti, ha un ambiente di lavoro particolare [Fig. 6.15] in cui si strutturano e connettono tra loro i cosiddetti nodi, ovvero i parametri che definiscono un modello 3D.

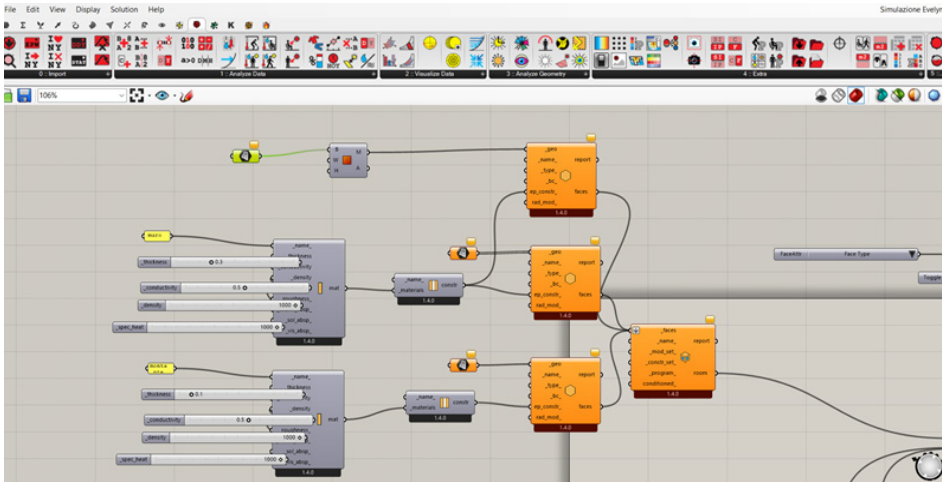


Fig. 6.15. Interfaccia di Grasshopper per la fase di analisi simulativa. Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

La modifica di questi parametri provoca contemporaneamente le modifiche a tutte le funzioni e geometrie, che possono essere osservate in anteprima nella finestra di Rhinoceros. Uno dei componenti più intuitivi ed evocativi dell'editor di Grasshopper si chiama "cursore". L'utente può usare il mouse per "scorrere" lungo una gamma di valori numerici e ottenere un feedback visivo istantaneo dell'effetto geometrico di un parametro che cambia. Il cursore è dotato di una funzione di animazione che consente all'utente di preimpostare un certo numero di iterazioni tra gli estremi personalizzati [Lagios, et al., 2010].
Uno dei plug-in più utilizzati per la simulazione all'interno di Grasshopper è *Ladybug* che, aiuta a creare informazioni complete sullo stato ambientale per qualsiasi posizione specifica importando lo standard EnergyPlusfile meteo (.epw) che può essere ottenuto online

da *https://energyplus.net/weather*. Inoltre, queste informazioni ambientali possono essere collegate parametricamente ai dati di progetto per comprendere l'influenza del tempo e della posizione sul progetto studiato.
Altri plug-in di Grasshopper sono *Honeybee* che collega Grasshopper3D a motori di simulazione convalidati, tra cui *EnergyPlus/OpenStudio* (per l'energia degli edifici, il dimensionamento HVAC, il comfort termico, ecc.) e *Radiance* (per la simulazione dell'illuminazione diurna e dell'abbagliamento). Inoltre, *Dragonfly* consente la creazione e la manipolazione di modelli EnergyPlus e Radiance su larga scala, sfruttando una rappresentazione 2D astratta della geometria dell'edificio, in cui tutti gli ambienti vengono assunti come estrusioni di piastre di pavimento. Tutti questi plugin possono essere collegati simultaneamente e interagire tra loro e, di conseguenza, è possibile ottenere risultati più accurati e ottimali.
Sebbene lo scopo della trattazione non è la descrizione singola dei diversi plug-in all'interno di Grasshopper e Rhinoceros [Fig. 6.16], questa sintetica analisi degli strumenti di progettazione parametrica vuole mettere in evidenza il loro ampio impiego per affrontare la complessità progettuale degli edifici moderni, per perfezionare simultaneamente i parametri di progettazione con quelli ambientali.

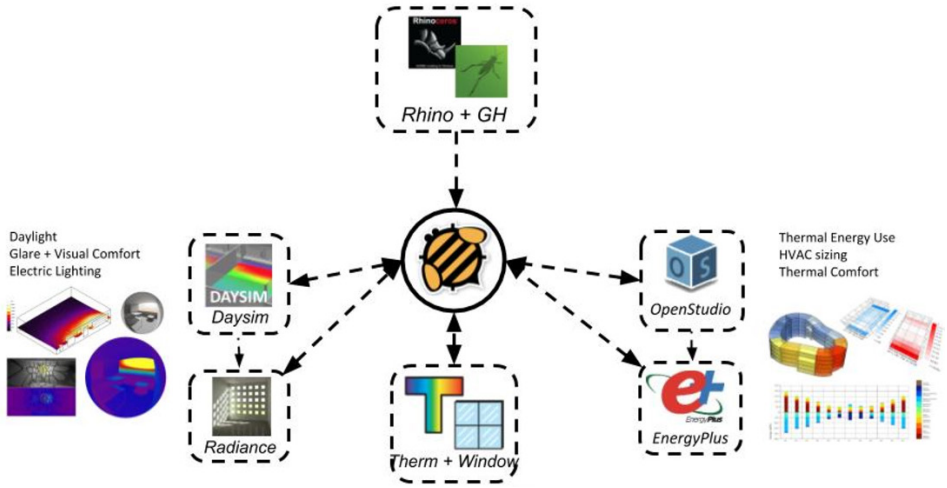


Fig. 6.16. Plug-in di Rhinoceros e Grasshopper

E' su questa esigenza che la prima parte della fase sperimentale - che utilizza il software parametrico di Grasshopper - basa il suo approccio di simulazione, al fine di verificare il comportamento termico del mock-up in risposta a temperature estreme della Regione del Mediterraneo. Il paragrafo che segue descrive il processo di modellazione del mock-up e le simulazioni condotte sul mock-up.

6.3.1 Modellazione e simulazione della "performance termica" del mock-up

"Parametric programs can study and analyse all climatic and environmental changes [...]. In addition, it can make simulation in the 4th dimension using the time aspect which can influence on the building in the real time, and how the time can change the performance of the building parametrically."[17]
[Eltaweel, & Yuehong, 2017, p. 1090]

L'obiettivo delle attività di simulazione, supportate dal software parametrico Grasshopper, è analizzare il comportamento a livello termico del mock-up, quando viene sottoposto a sollecitazioni estreme. Questa attività risulta necessaria per gli step della fase sperimentale

della ricerca per avere un primo quadro, seppur digitale e visivo, sulla risposta prestazionale del mock-up.In linea con le analisi degli eventi estremi della Regione del Mediterraneo (Cfr. Cap. 3), la sola variabile climatica che viene presa in considerazione in questo contesto di simulazione è la temperatura. Nello specifico, grazie alla possibilità del software di impostare i dati climatici di un contesto ambientale specifico, sono stati studiati due scenari climatici della Regione del Mediterraneo, simulando così due sollecitazioni della temperatura sul mock-up, rispettivamente per Italia e Spagna. Come detto precedentemente, gli eventi estremi di precipitazione intensa e intensificazione del carico da vento, non sono stati presi in considerazione per l'impossibilità del software stesso a riprodurre questi effetti.
Su Grasshopper, l'organizzazione dei componenti, ovvero gli elementi che costituiscono un progetto, sull'area di lavoro *Canvas* (luogo della rappresentazione visuale degli algoritmi), è fondamentale per una corretta impostazione degli algoritmi, al fine di non incorrere in errori che non consentono di effettuare la simulazione.
Ciò significa che, a causa della natura grafica del software parametrico, man mano che si aggiungono componenti, il file diventa visivamente complesso e difficile da gestire. Questo deriva dal fatto che, i componenti per funzionare, devono essere correttamente collegati tra loro e definiti mediante specifici dati che lo stesso software richiede per il funzionamento di tutto il diagramma di flusso che si viene a creare.

Per questo motivo, l'impostazione del flusso di lavoro su Grasshopper per la modellazione e la simulazione del mock-up, che risulta un'operazione metodologica sequenziale, si è strutturata in quattro fasi [Fig. 6.17], le cui specifiche sono descritte nel corso della trattazione.

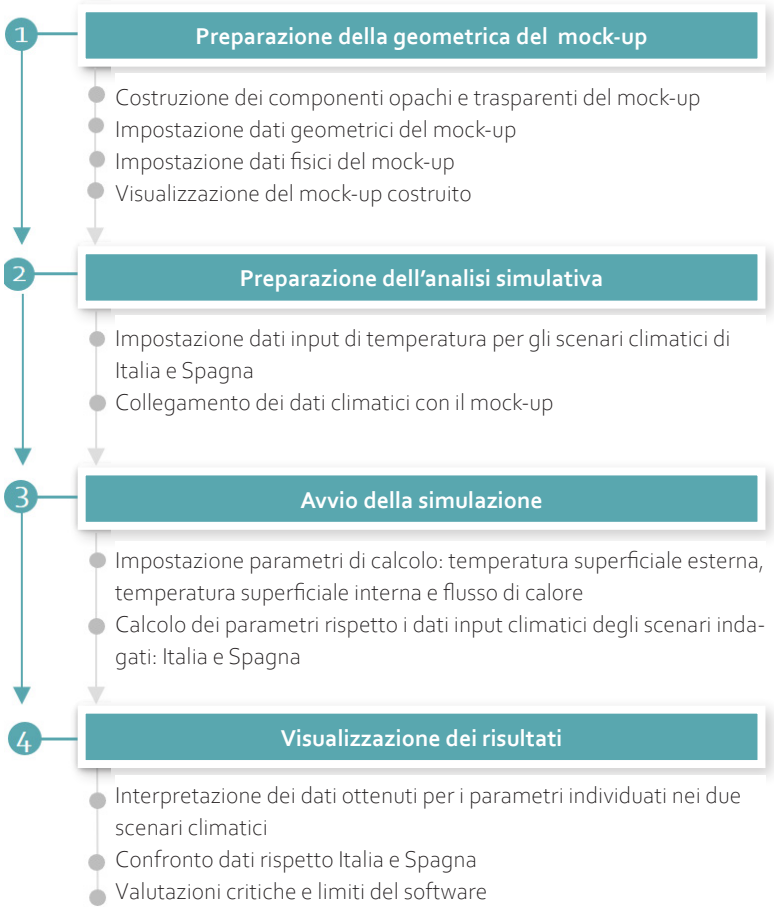


Fig. 6.17. Fasi della metodologia di lavoro per la simulazione su Grasshopper. Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

In Grasshopper, la metodologia utilizzata in riferimento alla definizione delle quattro fasi del *work-flow* di analisi e simulazione, viene visualizzata come nella figura sottostante [Fig. 6.18].

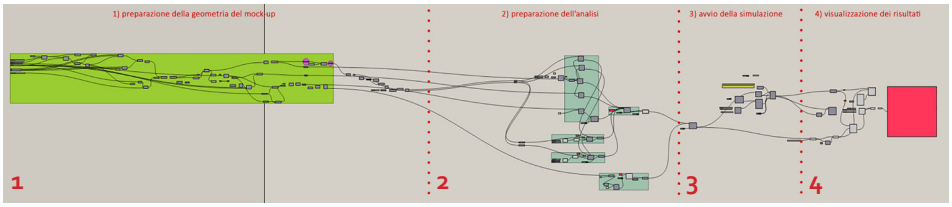


Fig. 6.18. Work-flow metodologico per la simulazione su Grasshopper. Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Il disegno dei componenti che costituiscono la geometria del mock-up sono stati generati tramite script da Rhino e importati sul Canvas di Grasshopper, divenendo così oggetti che possono essere utilizzati per l'analisi di simulazione.
Il disegno dei componenti che costituiscono la geometria del mock-up sono stati generati tramite script da Rhino e importati sul Canvas di Grasshopper, divenendo così oggetti che possono essere utilizzati per l'analisi di simulazione. La preparazione dei componenti è la base per l'impostazione delle relazioni tra gli oggetti e generare così la modellazione e la simulazione del mock-up (inteso come risultato dell'algoritmo).
Un altro step fondamentale, prima di connettere i vari componenti e procedere all'avvio della simulazione, è l'applicazione di dati geometrici, riferiti alle dimensioni (altezza, larghezza e profondità) di ogni singola cellula [Fig. 6.19] per riprodurre un modello digitale fedele al mock-up in scala 1:1. I valori di input geometrici derivano dal processo di design del mock-up, precedentemente descritto. Ciò consentirebbe di avere dei dati riferiti alla simulazione il più possibile vicini alla realtà.

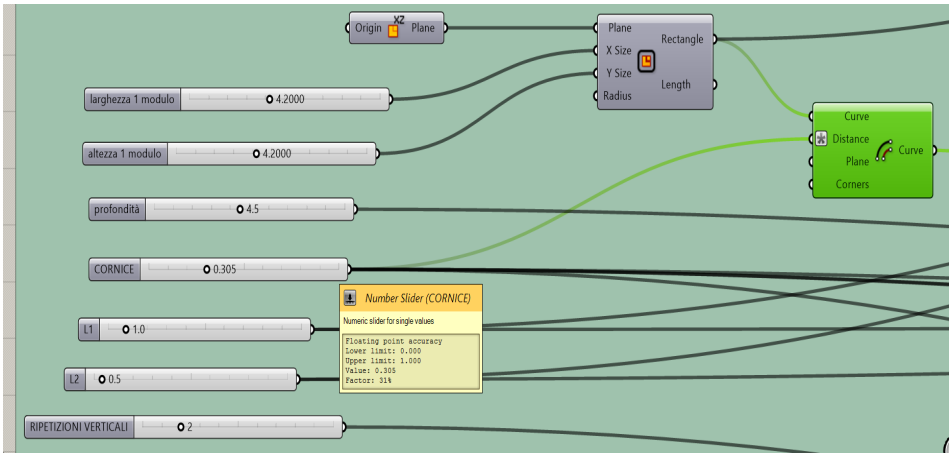


Fig. 6.19. Impostazioni dati geometrici del mock-up. Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Come si può notare, attraverso lo strumento *Number slider,* è possibile creare un sistema di scorrimento numerico che scorre solo all'interno di un determinato intervallo di valori.
Lo scorrimento all'interno di un determinato intervallo di valori è un buon modo per limitare l'intervallo di scorrimento a quello corrispondente a un elenco di numeri, permettendo

altresì di evitare errori di tipo dimensionale e consentendo una flessibilità di modifica istantanea degli input numerici.
Ritornando alla modellazione del mock-up, si vuole dare alcune specifiche sulla creazione delle superfici trasparenti che costituiscono le singole cellule.
Le superfici trasparenti sono state costruite attraverso *HoneyBee Add Surface*, collegato a *Honeybee Apertures*, al quale è stato associato un *dato boleano* (Boolean Toggle) che funziona con True/Vero o False/Falso, necessario per associare una risposta dell'oggetto secondo un criterio funzionale. Per maggiore chiarezza, il toggle è stato inserito per permettere o meno l'apertura della cellula, consentendo quindi la ventilazione di tipo naturale.
Poiché il mock-up non ha superfici apribili, il toogle è stato impostato su False/Falso, ma per capire il comportamento prestazionale del mock-up, nel caso in cui possiede superfici apribili, basterà impostare su True/Vero e verificare in modo flessibile e veloce, un nuovo funzionamento che deriva da una diretta modifica degli input.
A questo punto, alla voce *ep_constr_as list* di *Honeybee Apertures,* è stato assegnato la costruzione del vetro tramite *Honeybee Window Construction*. Per identificare il vetro, Grasshopper richiede delle specifiche caratteristiche a livello di dettaglio del materiale, in modo tale da poter ricreare la stratigrafia della cellula.
Come per il mock-up reale, sono state create le stratigrafie materiche relative alle superfici trasparenti (vision) e quelle opache (spandrel), che sono state collegate per formare l'assetto della singola cellula.
Per ciascuna stratigrafia, come richiesto da Grasshopper, sono stati immessi i valori di *trasmittanza termica* (U-Value W/m²K) con la specifica del gas interposto tra le lastre di vetro, il *coefficiente di guadagno di calore solare* (SHGC che include direttamente il calore solare che viene assorbito dal sistema vetrato e diretto verso lo spazio interno) e la *trasmittanza visibile* che esprime la quantità di luce trasmessa attraverso il vetro, quindi di raggi visibili ed è sempre espressa in percentuale %.
(Questi parametri sono stati definiti nel paragrafo sulla caratterizzazione tecnologica del mock-up e i valori inseriti nel software corrispondono a quelli calcolati mediante l'utilizzo del *performance calculator*).

Per facilitare la comprensione, la figura sottostante [Fig. 6.20] riporta il flusso di lavoro descritto per la creazione delle superfici trasparenti e i relativi dati fisici-materici applicati.

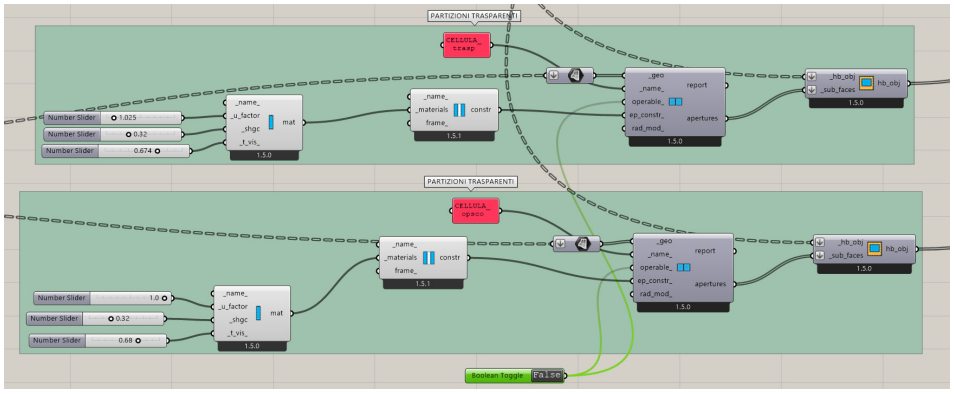


Fig. 6.20. Impostazioni dati fisici per la creazione delle superfici trasparenti delle cellule. Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

L'impostazione dei dati fisici che caratterizzano una stratigrafia materica non è un fattore secondario in quanto le richieste delle specifiche tecniche, all'interno di Grasshopper, va-

riano a seconda della complessità dell'oggetto/componente che si vuole creare. Pertanto, l'utente deve avere a disposizione un certo numero di caratteristiche fisico-tecniche dei materiali per poter procedere con l'avvio della simulazione.

Per quanto riguarda, la creazione degli elementi opachi di finitura in GFRC, è stata avviata attraverso il componente *Honeybee Face*, al quale è stato collegato *Hooneybee Opaque Construction*. Il parametro fisico di input richiesto per definire il materiale in GFRC è la resistenza termica (R-Value m^2W/K).
La figura sottostante [Fig. 6.21] descrive il processo di modellazione degli elementi opachi.

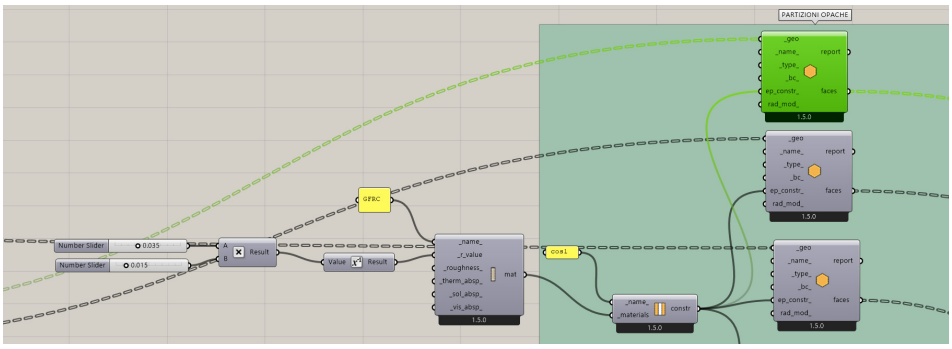


Fig. 6.21. Impostazione dati fisici per la creazione delle superfici opache in GFRC. Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Conclusa la modellazione, in termini geometrici, del mock-up [Fig. 6.22], si è proseguito con il processo di costruzione del work-flow per l'immissione di dati input, necessari per l'avvio della simulazione.

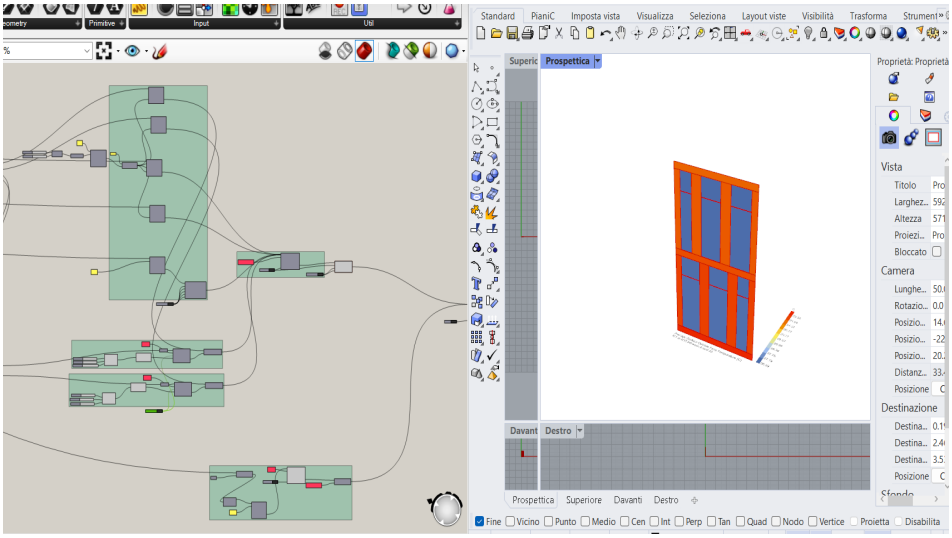


Fig. 6.22. Geometria del mock-up. Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Uno dei passaggi fondamentali, è stato quello di individuare gli output della simulazione attraverso il componente *Honeybee Simulation Output*, selezionando un set di variabili di

output richieste. Ai fini degli obiettivi della fase di simulazione tramite software, gli output scelti sono la *temperatura superficiale* interna ed esterna del mock-up e il *flusso di energia* che il mock-up lascia passare tra ambiente esterno ed interno.
Questi output sono stati collegati successivamenteal componente *Honeybee Simulation Parameters*, in modo tale da specificare quali tipo di output deve essere calcolato dal software.
Per semplificare la comprensione di alcuni passaggi, occorre riportare alcune specifiche proprie del funzionamento del software.
Come precedentemente detto, i componenti sul piano di lavoro Canvas di Grasshopper per lavorare devono essere correttamente collegati tra loro. Per questo motivo, ogni componente di Grasshopper ha dei connettori in ingresso (input) e in uscita (output), ciò significa che il componente processa i dati di ingresso e li restituisce in uscita. La porta di input si trova alla sinistra del componente, mentre quella di ouptut a destra: i dati infatti arrivano da ogni sorgente collegata alla sezione di input del componente e in output si ha il risultato che il componente genera attraverso una specifica funzione impostata.
A tal proposito, è sempre necessario sapere di che tipo di input si ha bisogno relativo alla funzione in modo tale da sapere già cosa si otterrà dopo il processo. Grasshopper, attraverso il suo sistema di codice dei colori, mostra lo strato di funzionamento di ogni componente.

In particolare:
- un componente di colore grigio indica che non ci sono problemi e che il componente lavora in maniera corretta;
- un componente di colore arancione indica che per far lavorare il componente bisogna risolvere il problema che il software individua;
- un componente di colore rosso indica un errore e non può funzionare nella situazione impostata. Pertanto, per consentire il funzionamento, bisogna controllare i dati di ingresso e capire il problema e risolverlo.

Questo sistema di Grasshopper risulta importante nel gestire la complessità del work-flow caratterizzato da una molteplicità di dati in ingresso e in uscita che, se non sono collegati correttamente tra loro, non lavorano bene e non si può procedere con l'avvio della simulazione e quindi generare i risultati.

Dopo tali necessarie precisazioni, la trattazione prosegue con l'impostazione dei parametri di input per avviare la simulazione.
Come anticipato, per conoscere il comportamento del mock-up sottoposto alla variabile ambientale della temperatura, si è pensato di calcolare i parametri della temperatura superficiale interna ed esterna e il flusso di energia che il mock-up lascia passare dall'ambiente esterno a quello interno.
Al fine di ottenere il più possibile dei risultati vicini a quelli reali e, in linea con il contesto di riferimento su cui si è impostato il percorso di ricerca per restringere il campo di indagine, il mock-up è stato studiato nel contesto della Regione de Mediterraneo.

Nello specifico, si sono ipotizzati *due scenari climatic*i:
- il primo fa riferimento alla temperatura impostata sulla Spagna, precisamente su Madrid;
- il secondo è definito dalla temperatura ambientale di sollecitazione del mock-up è relativa all'Italia, sulla città di Messina. La scelta di Messina è stata obbligata dal set di dati climatici del software che non riporta la città di Reggio Calabria, contesto in cui si era pensato di effettuare la simulazione per l'Italia.

I dati climatici, collegati al modello, sono stati importati dallo standard EnergyPlusfile meteo, *_epw_file*, che può essere ottenuto online da https://energyplus.net/weather. Attraverso questo link, si può scegliere la posizione geografica e impostarla sul piano di lavoro per simulare un contesto ambientale.
Per esplicitare l'importazione dei dati climatici, la figura [Fig. 6.24] mostra il work-flow di preparazione all'analisi a livello termico del mock-up.

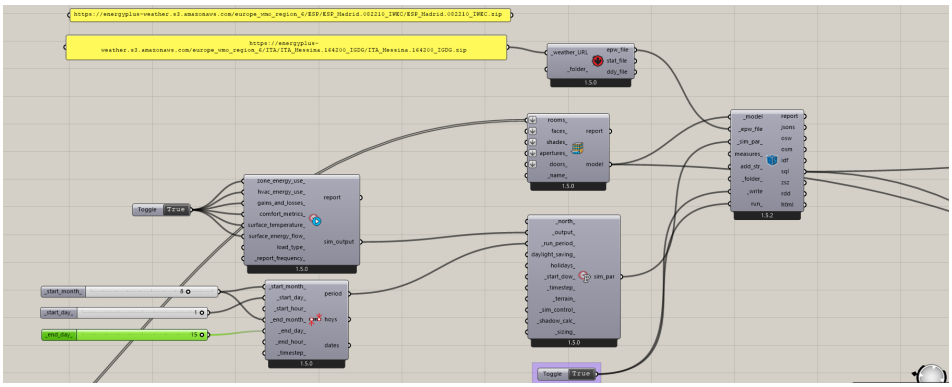


Fig. 6.24. Work-flow di preparazione alla simulazione. Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

L'intervallo di tempo analizzato per simulare il comportamento del mock-up è stato stabilito dall'1 agosto al 15 di agosto, poiché in quel periodo si sono registrate, sia per l'Italia che per la Spagna, temperature elevate che rappresentano quindi delle condizioni estreme da simulare. I valori di temperatura massima media per il periodo di tempi considerato si aggirano intorno ai 33° C per la Spagna e 31°C per l'Italia [Fig. 6.24].

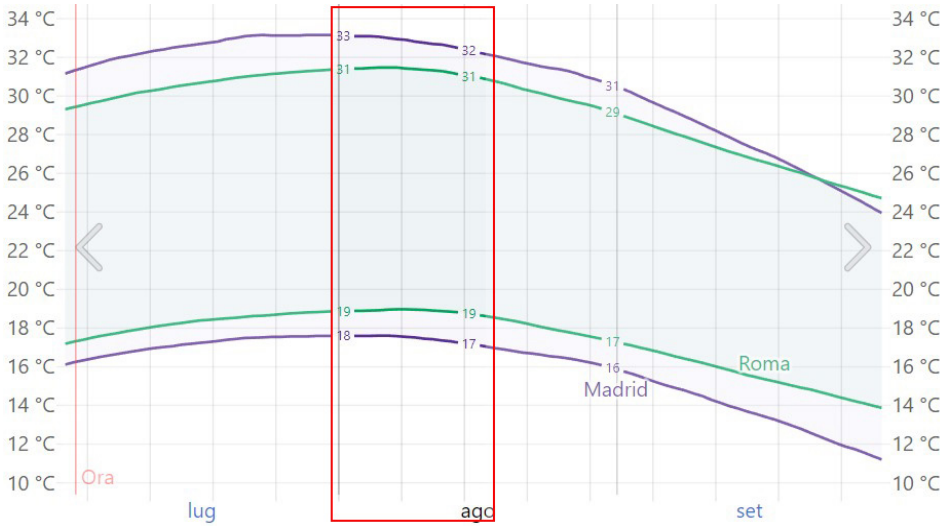


Fig. 6.24. Temperatura massima e minima media per l'Italia (in verde) e per la Spagna (viola)

Tuttavia, se si vuole conoscere il comportamento del mock-up in altri periodi temporali (stagionali, mensili, giornalieri), basta scorrere sul Number_Slider, il quale modifica automaticamente l'ouput della simulazione.

Sebbene l'obiettivo della simulazione è conoscere il comportamento della facciata del mock-up, sottoposta a due scenari climatici della temperatura, si è costruita idealmente una camera adiabatica (che non può scambiare calore con l'ambiente esterno) su cui si simula essere installato il mock-up.
Questa camera vuole simulare solo l'assetto geometrico della camera di prova della Sezione del TCLab (Cfr. Cap. 7) ma non viene considerato il suo comportamento per non alterare i risultati di risposta alla temperatura della facciata. Ciò significa che, se si fosse considerata la camera del laboratorio all'interno del calcolo del software, questa, essendo una camera chiusa senza possibilità di scambio di calore con l'esterno, faceva risultare la creazione di una serra, in cui la temperatura indoor è molto elevata.
In figura [Fig. 6.25], si può notare, gli input di costruzione della camera e l'impostazione di non visualizzazione della geometria e del suo funzionamento termico, al fine di creare una situazione ideale neutra, senza quindi considerare una temperatura interna molto elevata come una serra.

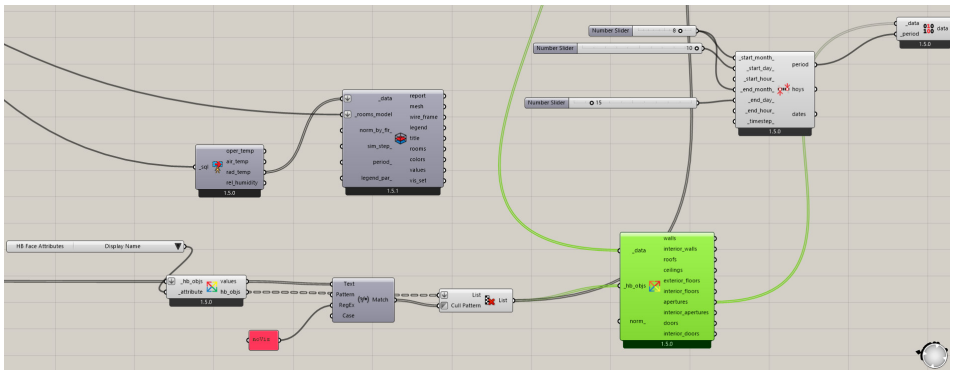


Fig. 6.25. Impostazioni di visualizzazione della camera. Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Definiti e impostati i vari parametri che, per la sequenza metodologica definiscono lo step n. 3 di avvio alla simulazione [Fig. 6.26], si passa alla presentazione degli scenari di simulazione.
Nello specifico, vengono riportati i risultati della simulazione che rappresentano il comportamento del mock-up, analizzato per la temperatura superficiale interna ed esterna e per il flusso di energia che lascia passare da un ambiente esterno a quello interno.

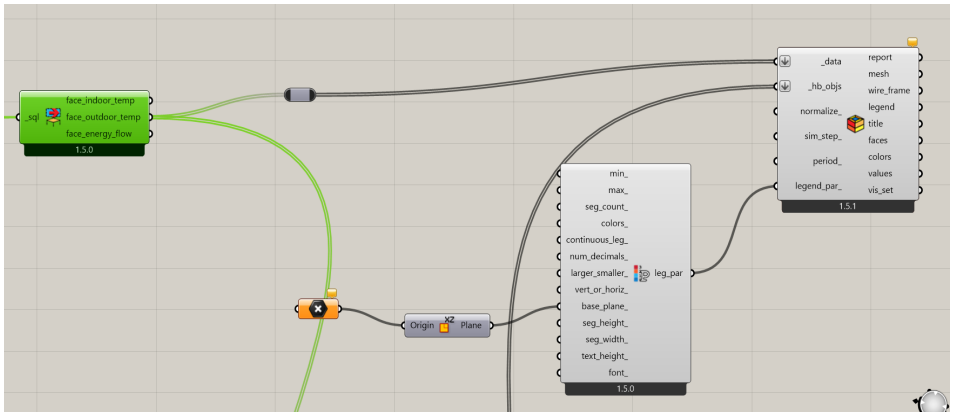


Fig. 6.26. Paramteri di avvio per la simulazione. Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Scenario climatico: Italia

Dopo aver impostato le condizioni climatiche al contorno (variabile climatica e periodo di tempo), il primo parametro calcolato è la temperatura superficiale esterna considerando una temperatura massima media esterna di 33°C.
Come si può notare dalla figura [Fig. 6.27], la media (dall'01/08 al 15/08) della temperatura superficiale esterna relativa alle superfici trasparenti è di circa 26,59°C mentre le zone che risultano più calde sono quelle di finitura dove vengono applicati i pannelli in GFRC.
Al primo livello del mock-up, la temperatura rilevata è di 32,56°C e al secondo livello, si attesta intorno ai 32,96°C.

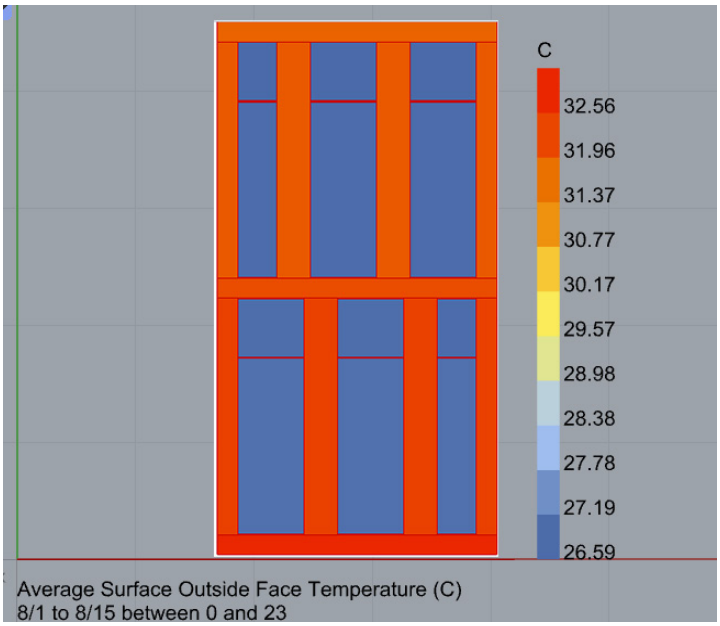


Fig. 6.27. Valori temperatura superficiale esterna, Italia. Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

I valori risultanti da questa prima simulazione attestano una differenza di temperatura di circa 6°C tra la temperatura rilevata sulle superfici trasparenti e la temperatura ambientale esterna; mentre per le porzioni opache in GFRC, la differenza di temperatura si attesta ad 1°C. Sebbene la superficie di porzione opaca è inferiore rispetto a quella trasparente, questa può incidere in maniera negativa non solo sul comfort, ma potrebbe creare una situazione di stress termico.

Situazione diversa si ha con i risultati della simulazione relativa alla misurazione della temperatura superficiale interna: le superfici trasparenti hanno una temperatura intorno ai 30,31°C mentre la temperatura sulle superfici opache si abbassa attestandosi ai 29,25°C.
Per quanto riguarda il flusso di energia che passa attraverso la vetrata dall'esterno all'interno, è di 9,22 kWh/m^2, valore inferiore rispetto all'impostazione standard del software che è stabilito intorno ai 13 kWh/m^2.

Nella pagina seguente sono riportati i valori riferiti a temperatura superficiale interna [Fig. 6.28] e flusso di energia [Fig. 6.29].

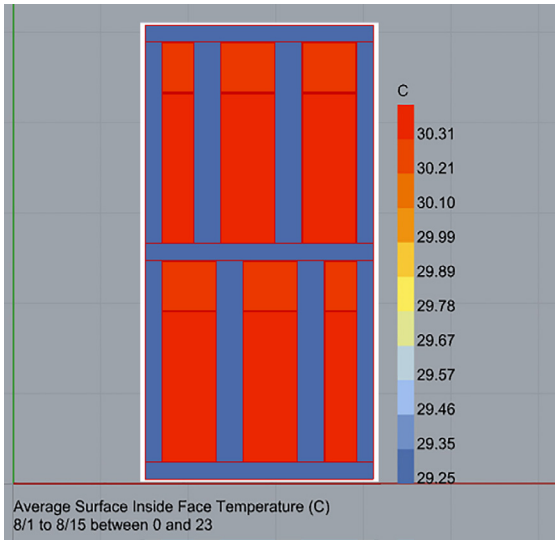


Fig. 6.28. Valori temperatura superficiale interna, Italia. Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

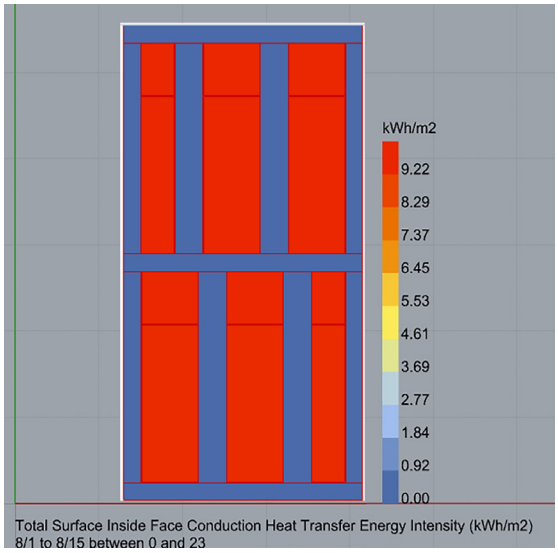


Fig. 6.29. Valori flusso di energia, Italia. Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Scenario climatico: Spagna

Si precisa che i parametri sono stati calcolati secondo la stessa sequenza per lo scenario climatico italiano, ma considerando una temperatura massima media di 31°C.
I dati relativi temperatura superficiale esterna [Fig. 6.30] delle superfici trasparenti è di circa 26,07°C; al primo livello sui pannelli in GFRC, si riscontra una temperatura di 32,81°C mentre al secondo livello, si attesta intorno ai 32,14°C. I valori risultanti attestano una differenza di temperatura di circa 5°C tra la temperatura rilevata sulle superfici trasparenti e la temperatura ambientale esterna; mentre per le porzioni opache in GFRC, la differenza di temperatura si attesta ad 1°C. La temperatura superficiale interna [Fig. 6.31] viene così rilevata: le superfici trasparenti hanno una temperatura intorno ai 31,59°C mentre la temperatura sulle superfici opache si abbassa attestandosi ai 30,54°C.
Per quanto riguarda il flusso di energia che passa attraverso la vetrata dall'esterno all'interno [Fig. 6.32], è di 10,46 kWh/m^2, valore inferiore rispetto all'impostazione standard del software che è stabilito intorno ai 13 kWh/m^2.

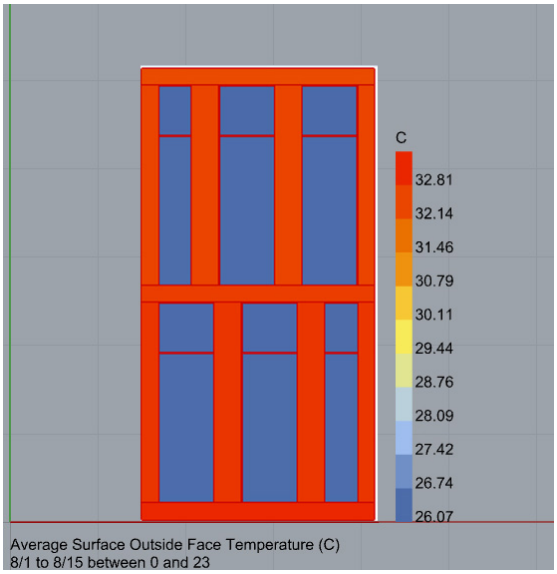


Fig. 6.30. Valori temperatura superficiale esterna, Spagna. Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

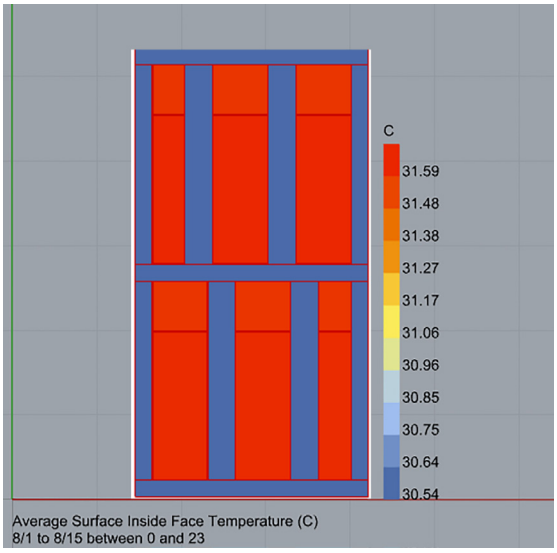


Fig. 6.31. Valori temperatura superficiale interna, Spagna. Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

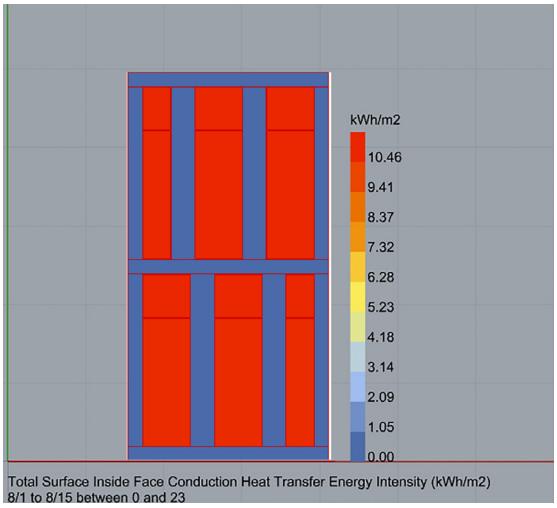


Fig. 6.32. Valori flusso di energia, Spagna. Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

I risultati delle attività di simulazione vengono discussi nel prossimo paragrafo.

6.4 Valutazioni critiche dei risultati ottenuti

"To increase the accuracy and find out the certain problems,
more measurements must be taken (in similar and/ or different conditions).
Those measurements will be helpful to define errors and find out the correlation between each impact."[18]
[Kesten, et al., 2010, p. 164]

Le attività di simulazione effettuate tramite il software Grasshopper di Rhino, hanno l'intento di valutare il comportamento prestazionale a livello termico del mock-up di facciata continua della tipologia a cellula.
In particolare, si è studiato il mock-up secondo due scenari climatici, Italia e Spagna, relativamente ai parametri della temperatura superficiale esterne e interna e rispetto al flusso di energia che le superfici trasparenti lasciano passare da un ambiente esterno ad uno interno. L'intervallo temporale considerato durante la stagione estiva inizia dall'1/08 e si conclude il 15/08. I giorni di misurazione sono selezionati in base ai dati meteorologici medi nei contesti climatici considerati e includono condizioni meteorologiche con temperatura massima media di 33°C per l'Italia e di 31°C per la Spagna.
Per semplificare la lettura dei dati, questi vengono sistematizzati in forma tabellare [Tab. 7], che contiene quindi i risultati ottenuti dalla prima parte della fase sperimentale condotta sul mock-up.

Risultati simulazione	Temperatura sup. esterna (°C)		Temperatura sup. interna (°C)		Flusso di calore (kWh/m²)	
	Italia	Spagna	Italia	Spagna	Italia	Spagna
Superfici vetrate (°C)	26,59	26,07	30,31	31,59	9,22	10,46
Superfici opache I livello (°C)	32,56	32,81	29,25	30,54	0,0	0,0
Superfici opache II livello (°C)	32,96	32,14	29,25	30,54	0,0	0,0

Tab. 7. Sistematizzazione dei risultati della simulazione. Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

La prima osservazione è riferita al fatto che il comportamento del mock-up non si differenzia di molto rispetto ai due scenari climatici ipotizzati per la Regione del Mediterraneo, e questo aspetto valida l'analisi critica sullo stato dell'arte sulle previsioni future di cambiamento climatico rispetto l'innalzamento della temperatura che, sia per l'Italia che per la Spagna, è un evento estremo da tenere in considerazione per la progettazione di facciate continue (Cfr. Cap. 3).
La seconda osservazione si riferisce alla differenza di temperatura che intercorre tra la temperatura delle porzioni opache del mock-up rispetto alla temperatura ambientale esterna. Difatti, come detto precedentemente, le superfici opache hanno circa 1°C di differenza con la temperatura esterna; valore simile sia per l'Italia che per la Spagna che potrebbe creare uno stress termico sull'intero mock-up ed inficiare le prestazioni complessive, sebbene la superficie opaca è in misura minore rispetto a quella vetrata.
Questi aspetti non intendono tradursi nell'affermare o meno la validità dell'assetto tecnologico del mock-up negli scenari analizzati (esportabilità del sistema tecnologico in diversi contesti ambientali), in quanto le prestazioni dipendono dall'esposizione, dall'ubicazione e da altri fattori fisici e climatici interagenti, ma valida l'obiettivo della ricerca, ovvero la costruzione di un protocollo metodologico che può essere un valido strumento per la verifica delle prestazioni delle facciate continue per i cambiamenti climatici della Regione del Mediterraneo.

Entrando nello specifico del comportamento termico del mock-up, si nota come le superfici vetrate che costituiscono la cellula (in questo caso ci si riferisce sia alla porzione vision che spandrel) hanno una temperatura superficiale esterna accettabile tra i 26,07°C (Spagna) e i 26,59°C (Italia). Questo valore potrebbe però subire delle variazioni in negativo, peggiorando la situazione termica sulla superficie trasparente, a causa della variazione della temperatura esterna, comportando di conseguenza un surriscaldamento della zona che si riversa nella temperatura dello spazio interno, con un aumento del carico termico.
Un altro aspetto da tenere in considerazione, in linea con la lettura dinamica degli impatti 'Building envelope versus Climate change' (Cfr. Cap. 3), deriva dal controllo di questo valore che, a seconda dell'ubicazione del mock-up e dei materiali al contorno, potrebbe comportare un aumento della temperatura dell'aria esterna, amplificando il fenomeno di ondate e isole di calore.
Se per la temperatura superficiale esterna, i valori possono essere considerati accettabili, questa osservazione non può valere per i risultati scaturiti dall'analisi della temperatura superficiale interna che, difatti, si attesta tra i 30,31°C (Italia) e i 31,59°C (Spagna).
Ciò significa che, sebbene la cellula sia caratterizzata da un doppio strato di vetro con interposizione di gas nell'intercapedine, la temperatura superficiale interna risulta elevata, provocando un discomfort nello spazio interno. Questo risultato ottenuto orienta una possibile strategia adattiva per diminuire la temperatura superficiale interna del mock-up.
Si potrebbe ipotizzare di interporre tra le lastre di vetro della cellula uno smart material (tra quelli individuati dalle analisi nel Cap. 4, come i termobimetalli) in grado di gestire e regolare l'apporto termico interno [Fig. 6.33].
La soluzione adattiva non dovrebbe però interferire con la gestione del flusso di calore tra esterno ed interno che, dai dati rilevati risulta accettabile attestandosi per lo scenario climatico Italia 9,22 kWh/m² mentre per la Spagna 10,46 kWh/m².
Si vuole specificare che quanto detto rispetto alla soluzione adattiva è solo un'ipotesi che si basa sul quadro conoscitivo-critico analizzato nel Capitolo 4 e non un obiettivo della ricerca da perseguire in quanto per verificare la sua risposta adattiva andrebbe validata, in un primo momento, anche dal punto di vista geometrico-dimensionale e tecnologico.

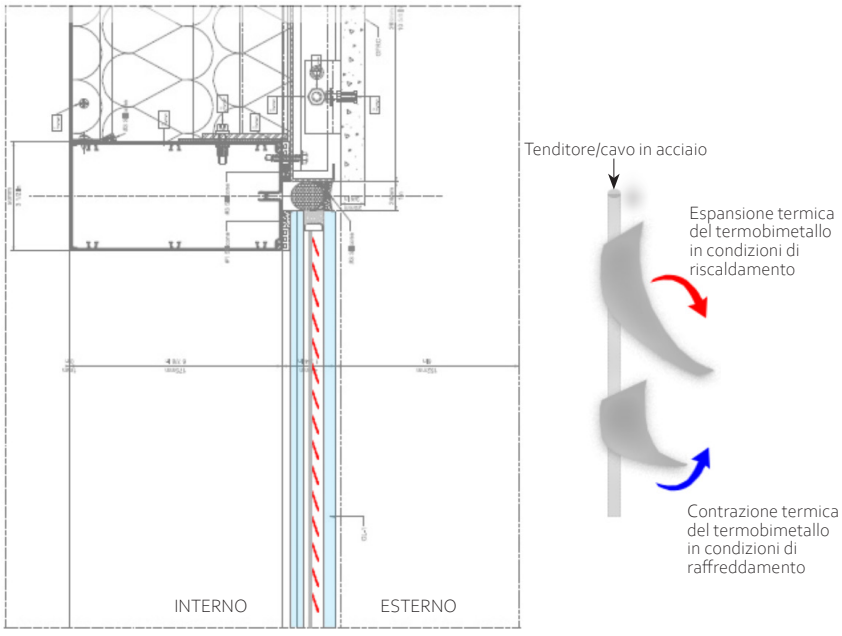


Fig. 6.33. Ipotesi posizionamento termobimetalli nelle porzioni trasparenti del mock-up. Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Per quanto riguarda le superfici opache rappresentate dai pannelli in GFRC, la temperatura superficiale esterna si attesta intorno ai 33°C, sia per i pannelli posti al I livello che per quelli posti al II livello. Ciò significa che, sebbene i pannelli siano molto isolanti, questi si scaldano di più rispetto le superfici trasparenti. Questi valori in combinazione con una temperatura dell'aria calcolata intorno ai 35°C (sia per Italia che per la Spagna, nel periodo tra l'01/08 e il 15/08), potrebbero determinare l'innesco del fenomeno dell'isola e dell'ondata di calore. La temperatura interna invece scende di qualche grado attestandosi per l'Italia intorno ai 29,25°C e per la Spagna 30,54°C.

Come precisato, per ottenere risultati più affidabili, la verifica delle prestazioni termiche del mock-up è stata condotta nel periodo estivo, considerando un intervallo di tempo in cui sono state registrate delle temperature massime medie tra i 31 e i 33°C.
L'interpretazione dei risultati ottenuti attraverso il processo di simulazione condotto tramite il software parametrico Grasshopper, rileva come il monitoraggio della temperatura superficiale del mock-up possa essere considerato un indicatore utile alla caratterizzazione termica delle facciate continue, soprattutto in considerazione dell'aumento delle temperature negli scenari di cambiamento climatico per la Regione del Mediterraneo.
Tuttavia, i dati rilevati dal software sulla temperatura superficiale non sono sufficienti a spiegare in modo affidabile l'evoluzione della temperatura superficiale in qualsiasi ora del giorno, in qualsiasi giorno o stagione dell'anno e in qualsiasi condizione meteorologica.
Per questi motivi, il solo indicatore della temperatura superficiale, calcolato tramite software, non può essere un *indicatore robusto* da considerare per la caratterizzazione termica delle facciate continue in regime di cambiamento climatico.
Questo aspetto viene sottolineato dal fatto che, sebbene il software può simulare la radiazione solare, la temperatura dell'aria esterna, la direzione del flusso di vento, non è stato possibile simulare il comportamento del mock-up in condizioni climatiche sfavorevoli.
Ciò significa che il software non consente di effettuare simulazioni, sottoponendo il mock-up a precipitazioni intense e a carico da vento.
Da ciò, si deduce che non è possibile fare un diretto confronto e un'analisi in parallelo tra i risultati derivanti le attività di simulazione con quelli riferiti ai test ma, al tempo stesso, si intende mettere in evidenza la stretta correlazione delle due fasi di sperimentazione, in cui i software rappresentano un potenziale supporto al processo di verifica prestazionale.
Con questo concetto, si intende sottolineare che i risultati relativi alla temperatura superficiale esterna che evidenziano un comportamento positivo della superficie vetrata, devono trovare riscontro ed essere in linea con i risultati delle attività di testing, in riferimento alla prova in laboratorio che simula *realmente* una temperatura estrema.
Un altro fattore limite del software si è riscontrato nell'impostazione dei dati climatici reali; difatti, non è stato possibile analizzare il mock-up, per lo scenario in Italia, considerando la città di Reggio Calabria, in quanto questa non è inclusa nei file _epw_weather, ovvero nel sistema dei file meteo che utilizza Grasshopper. Oltre a questo, sul software si è riscontrata l'impossibilità di settare valori di temperatura esterna di picco per poter simulare e valutare il comportamento del mock-up a temperature esterne maggiori di 31°C e 33°C (valori immessi rispettivamente per gli scenari di Spagna e Italia). Questo limite del software contribuisce ad affermare l'esigenza di ricorrere a *simulazioni dal vero*, al fine di conoscere le reali prestazioni delle facciate continue a fronte di estremi climatici futuri.
Per queste ragioni e per gli obiettivi della ricerca, risulta necessario sviluppare una metodologia univoca di valutazione prestazionale che sia validata, in ultima istanza, dalle strategiche ed essenziali attività di testing in laboratorio.

Ciò nonostante, la metodologia utilizzata per la costruzione del work-flow di simulazione ha permesso di creare un ambiente di lavoro che può essere utilizzato per simulazioni future.

Difatti, i componenti creati sono stati pensati per essere facilmente settati per impostare una nuova simulazione, attraverso la modifica delle impostazioni relative alla preparazione della geometria delle facciate continue della tipologia a cellula, il periodo e il contesto dei dati climatici in cui effettuare la simulazione.
In conclusione si può affermare che, l'integrazione degli strumenti parametrici nella valutazione delle performance delle facciate continue in regime di cambiamento climatico, delinea un approccio trasversale nel processo di verifica prestazionale, poiché i vincoli dei parametri nella simulazione non consentono di effettuare una riproduzione dei possibili effetti estremi di cambiamento climatico. Nello specifico, la maggior parte degli strumenti esistenti non è in grado di calcolare le condizioni termiche, includendo ad esempio la pressione del vento.
Di conseguenza, per la fase sperimentale della ricerca, si ritiene necessario affiancare agli strumenti di simulazione un *feedback* basato su attività di testing che consentono una misurazione reale delle prestazioni del mock-up, tenendo conto degli eventi estremi analizzati per la Regione del Mediterraneo.

Conclusioni

In questo capitolo, gli aspetti significativi e rilevanti per il processo di sviluppo della ricerca si riscontrano nell'acquisizione delle competenze tecniche e metodologiche, sia sulla progettazione delle facciate continue sia sull'utilizzo di specifici strumenti parametrici, considerati indispensabili in un approccio adattivo e resiliente al clima.
Il primo aspetto è stato reso possibile grazie alla sinergia strutturata con l'Azienda Cianciolo che ha permesso di guidare il processo di design del mock-up, portando alla realizzazione del modello in scala 1:1 su cui indirizzare le successive attività di testing.
L'assetto geometrico del mock-up, costituito da sei cellule disposte su due livelli, ha dimensioni totali di 4850 mm (larghezza) x 9430 mm (altezza), pensate in base ai trend del mercato che richiedono forme e dimensioni delle facciate continue sempre più complesse e performanti.
Il secondo aspetto, strettamente correlato al primo per la modellazione geometrica del mock-up sul software Grasshopper, ha esplicitato la prima parte della fase di sperimentazione relativa alle attività di simulazione condotte sul mock-up.
L'obiettivo di queste attività è l'analisi del comportamento termico del mock-up, simulando condizioni di temperature differenti in due scenari climatici di cambiamento climatico per la Regione del Mediterraneo, nello specifico Italia e Spagna.
Ai fini degli obiettivi della fase di simulazione tramite software, gli output scelti per la definizione delle prestazioni del mock-up, sono la *temperatura superficiale interna ed esterna* del mock-up e il *flusso di energia* che il mock-up lascia passare tra ambiente esterno ed interno.
I risultati della simulazione rilevano che per la temperatura superficiale esterna, i valori possono essere considerati accettabili, mentre per la temperatura superficiale interna, i valori risultano elevati, provocando un discomfort nello spazio interno, valori che potrebbero peggiorare a seguito di una temperatura estrema dovuta al fenomeno ondata di calore che diventerà sempre più frequente per la Regione del Mediterraneo.
D'altro canto, i limiti riscontrati nel software nella riproduzione della sollecitazione di eventi climatici estremi, rilevano la difficoltà a determinare il funzionamento prestazionale del mock-up di facciata continua della tipologia a cellula.
Questo fattore spinge gli step della ricerca ad affiancare le attività di simulazione con quelle di testing, per determinare una *reale* misurazione delle prestazioni de mock-up, in regime di cambiamento climatico per la Regione del Mediterraneo.

Note

1. "Le esplorazioni di progettazione parametrica basate sulle prestazioni dipendono dalla formulazione di flussi di lavoro personalizzati che richiedono la lettura, la scrittura, l'interpretazione e la manipolazione di database, come parte del processo di progettazione". Ercan, B., & Elias-Ozkan, S. T. (2015). Performance-based parametric design explorations: A method for generating appropriate building components. *Design Studies*, 38, pp. 33-53. DOI: 10.1016/j.destud.2015.01.001 (cit. pag. 33)

2. "Gli standard e le procedure sono stabiliti dalle specifiche del progetto e dai disegni architettonici. Lo sviluppo delle specifiche è quindi una fase critica di un programma di garanzia della qualità. In tutte le fasi successive tra cui la produzione e la revisione dei disegni d'officina, il mock-up e le prove sul campo, la fabbricazione, l'assemblaggio e l'installazione delle facciate continue, sono elementi di controllo e garanzia della qualità".
CMHC (2004). *Glass and metal curtain walls (Best practice guide, building technology).* Canada Mortgage and Housing Corporation (CMHC), Canada. ISBN 0-660-19394-9 (cit. Cap. 7, pag.1)

3. L'*American Society of Civil Engineers*, conosciuta anche con l'acronimo ASCE è un'associazione professionale fondata nel 1852 per rappresentare membri della professione di ingegnere civile di tutto il mondo. ASCE è un fornitore leader di conferenze tecniche e professionali e formazione continua, il più grande editore mondiale di contenuti di ingegneria civile e una fonte autorevole di codici e standard. Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://www.asce.org/about-asce

4. "Oggi esiste una maggiore domanda di edifici ad alte prestazioni in generale e in particolare di sistemi di facciata continua. [...]. l sistema di facciata continua è oggi considerato uno dei componenti più importanti degli edifici, in grado di contribuire a risparmiare energia per il riscaldamento, il raffreddamento e l'illuminazione e, in alcuni casi, a generare elettricità". Memari, A. M. (2013). New developments in curtain wall and glazing systems. In Committee on Curtain Wall Systems. (2013). *Curtain wall systems: a primer.* American Society of Civil Engineers, edited by Ali M. Memari, Ph. D., P.E. (pp. 194-209). ISBN 978-0-7844-7768-7

5. ASTM C864-05(2019): *Standard Specification for Dense Elastomeric Compression Seal Gaskets, Setting Blocks, and Spacers.* Questa specifica riguarda le guarnizioni preformate a compressione elastomerica densa e gli accessori per l'uso in applicazioni di sigillatura e vetratura. Questi materiali sono generalmente utilizzati per sigillare o servire come componenti di sistemi di sigillatura a compressione tra superfici meccanicamente bloccate nelle costruzioni edili. Il metodo di prova C1166, come indicato nella presente specifica, deve essere utilizzato per misurare e descrivere le proprietà di materiali, prodotti o gruppi in risposta al calore e alla fiamma in condizioni di laboratorio controllate e non deve essere utilizzato per descrivere o valutare il rischio di incendio o rischio di incendio di materiali, prodotti o assiemi in condizioni di incendio effettive. Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://www.techstreet.com/standards/astm-c864-05-2019?product_id=2045434

6. EN 410:2011 *Glass in building - Determination of luminous and solar characteristics of glazing*: La norma specifica i metodi per la determinazione delle caratteristiche luminose e solari delle vetrate per edilizia. Queste caratteristiche possono servire come base per il calcolo della illuminazione, riscaldamento e raffreddamento delle stanze e permettono una comparazione tra i differenti tipi di vetrate.

7. EN 673:2011 'Glass in building - Determination of thermal transmittance (U value) - Calculation method': La presente norma europea specifica un metodo di calcolo per determinare la trasmittanza termica di vetrate con superfici piane e parallele.

8. NFRC 2010, "NFRC 200-2010[E0A0] Procedure for Determining Fenestration Product Solar Heat Gain Coefficient and Visible Transmittance at Normal Incidence", National Fenestration Rating Council, Silver Spring, MD: Questo standard specifica un metodo per calcolare il guadagno di calore solare e la trasmittanza visibile dalla radiazione solare diretta attraverso la maggior parte dei prodotti di finestratura solo con incidenza normale.

9. Un'unità di vetro isolante IGU consiste comunemente di due (a volte più) lastre di vetro separate da un materiale distanziatore e sigillate insieme sul bordo. Lo spazio aereo isolante è riempito con aria o un gas nobile, come argon o krypton all'interno. L'uso di argon o krypton nello spazio aereo tra le due lastre di vetro fornisce un ulteriore isolamento, poiché questi gas sono più densi dell'aria e hanno meno probabilità di lasciare passare il calore attraverso l'IGU. Combinati con un rivestimento in vetro basso emissivo, questi gas lavorano per migliorare il valore U complessivo della superficie vetrata.

10. Il G.F.R.C. (Glass, Fiber, Reinforced, Concrete) è un materiale innovativo originariamente sperimentato in Russia intorno al 1940, ma sviluppato definitivamente alla fine degli anni '70 negli Stati Uniti. È un conglomerato composto da una matrice cementizia, acqua e inerti, nel quale vengono aggiunte fibre di vetro con funzione di rinforzo. L'inserimento dell'armatura in fibra di vetro conferisce al prodotto una ottima resistenza meccanica a flessione e trazione, senza dover tenere conto dei copriferri minimi richiesti dalle armature metalliche, consentendo di produrre elementi di elevate dimensioni con spessori molto bassi, che possono adattarsi a qualsiasi esigenza architettonica. Per ulteriori informazioni, consultare il sito: https://www.zanette.com/pareti-ventilate/zip/caratteristiche-zip/

11. ASTM C864: *Standard Specification for Dense Elastomeric Compression Seal Gaskets, Setting Blocks, and Spacers.* Questa specifica copre guarnizioni e accessori a compressione elastomerica densa preformata per l'uso in applicazioni di sigillatura e vetratura. Il metodo di prova C1166, come indicato nella presente specifica, deve essere utilizzato per misurare e descrivere le proprietà di materiali, prodotti o gruppi in risposta al calore e alla fiamma in condizioni di laboratorio controllate e non deve essere utilizzato per descrivere o valutare il rischio di incendio o incendio rischio di materiali, prodotti o assemblaggi in condizioni di incendio effettive. Tuttavia, i risultati di questa prova possono essere utilizzati come elementi di una valutazione del rischio di incendio che tenga conto di tutti i fattori pertinenti per una valutazione del rischio di incendio di un particolare uso finale.

12. "I metodi di progettazione parametrica, invece d'altra parte, consentono ai progettisti di generare ed esplorare le geometrie degli elementi costruttivi manipolando alcuni parametri". Aksamija, A. (2018). Methods for integrating parametric design with building performance analysis. In *ARCC Conference Re-*

pository.

13. Il principio del design parametrico può essere definito come design matematico, dove le relazioni tra gli elementi del design sono mostrate come parametri che potrebbero essere riformulati per generare geometrie complesse, queste geometrie si basano sui parametri degli elementi, modificando questi parametri; nuove forme vengono create contemporaneamente. Eltaweel, A., & Yuehong, S. U. (2017). Parametric design and daylighting: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, pp. 1086-1103. DOI: 10.1016/j.rser.2017.02.011

14. *Envi-MET* è un software di modellazione multidisciplinare che consente di modellare il comportamento fisico e microclimatico degli edifici in un ambiente esterno. È un software open source, libero da licenze con una solida base di calcolo e con un'interfaccia semplice che consente di ottenere un risultato con tutte le informazioni utili per la valutazione del microclima negli spazi aperti.

15. *Grasshopper* è un linguaggio di programmazione visiva e un ambiente che viene eseguito all'interno dell'applicazione CAD (computer-aided design) di Rhinoceros 3D. Il programma è stato creato da David Rutten presso Robert McNeel & Associates. Gli usi avanzati di Grasshopper includono la modellazione parametrica per l'ingegneria strutturale, la modellazione parametrica per l'architettura e la fabbricazione, l'analisi delle prestazioni di illuminazione per l'architettura eco-compatibile e il consumo energetico degli edifici.

16. *Rhinoceros,* comunemente chiamato Rhino o Rhino3D, è un software applicativo commerciale per la modellazione 3D di superfici sculturate (free form) realizzato da Robert McNeel & Associates, un'azienda di Seattle nello stato di Washington, negli USA.

17. "I programmi parametrici possono studiare e analizzare tutti i cambiamenti climatici e ambientali [...]. Inoltre, possono effettuare simulazioni nella quarta dimensione utilizzando l'aspetto temporale che può influenzare l'edificio in tempo reale e come il tempo può modificare le prestazioni dell'edificio in modo parametrico". Eltaweel, A., & Yuehong, S. U. (2017). Parametric design and daylighting: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, pp. 1086-1103. (cit. pag. 1090). DOI: 10.1016/j.rser.2017.02.011

18. "Per aumentare l'accuratezza e individuare determinati problemi, è necessario effettuare più misurazioni (in condizioni simili e/o diverse). Tali misurazioni saranno utili per definire gli errori e scoprire la correlazione tra ogni impatto". Kesten, D., Fiedler, S., Thumm, F., Löffler, A., & Eicker, U. (2010). Evaluation of daylight performance in scale models and a full-scale mock-up office. *International Journal of Low-Carbon Technologies,* 5(3), pp. 158-165. (cit. pag. 164). DOI: 10.1093/ijlct/ctq023

References

Aksamija, A. (2018). Methods for integrating parametric design with building performance analysis. In *ARCC Conference Repository*. Cit. pag. 1.

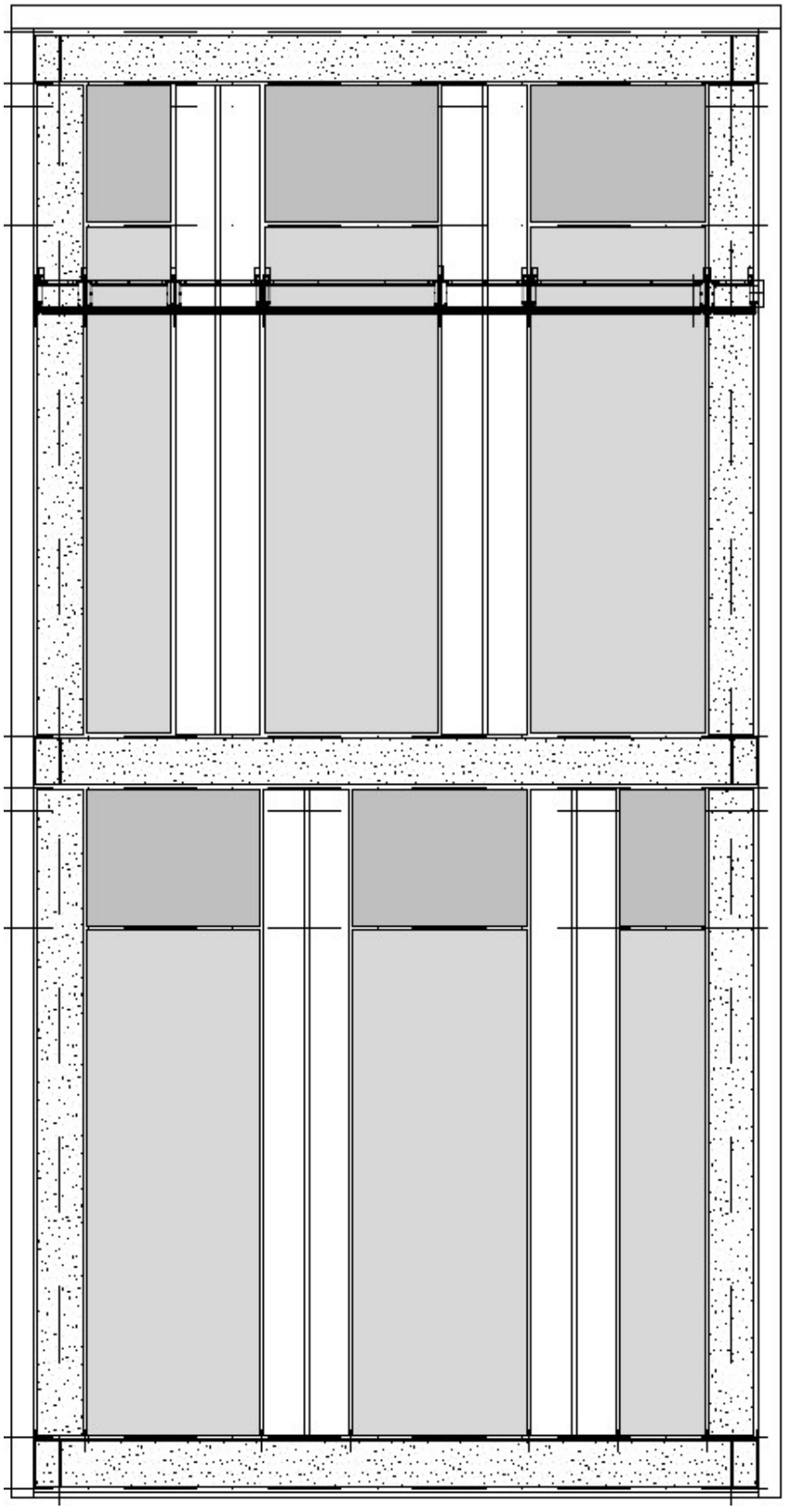
CMHC (2004). *Glass and metal curtain walls (Best practice guide, building technology)*. Canada Mortgage and Housing Corporation (CMHC), Canada. ISBN 0-660-19394-9 Cit. Cap. 7, pag. 1.

Ercan, B., & Elias-Ozkan, S. T. (2015). Performance-based parametric design explorations: A method for generating appropriate building components. *Design Studies*, 38, pp. 33-53. DOI: 10.1016/j.destud.2015.01.001 Cit. pag. 33.

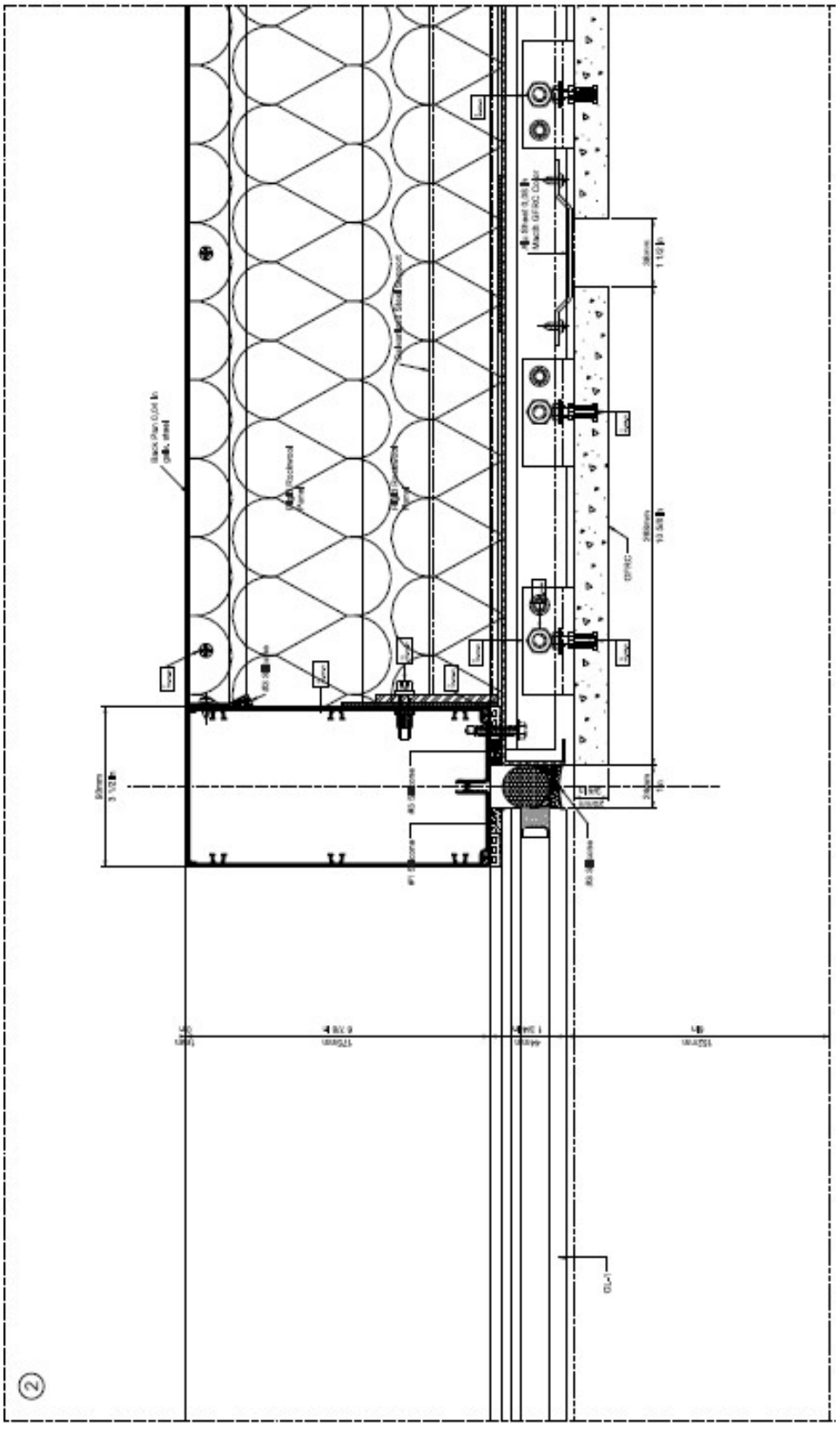
Eltaweel, A., & Yuehong, S. U. (2017). Parametric design and daylighting: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, pp. 1086-1103. DOI: 10.1016/j.rser.2017.02.011 Cit. pag. 1090.

Kesten, D., Fiedler, S., Thumm, F., Löffler, A., & Eicker, U. (2010). Evaluation of daylight performance in scale models and a full-scale mock-up office. International Journal of Low-Carbon Technologies, 5(3), pp. 158-165. DOI: 10.1093/ijlct/ctq023 Cit. pag. 164.

Memary, A. M. (2013). New developments in curtain wall and glazing systems. In Committee on Curtain Wall Systems. (2013). *Curtain wall systems: a primer*. American Society of Civil Engineers, edited by Ali M. Memari, Ph. D., P.E. pp. 194-209. ISBN 978-0-7844-7768-7 Cit. pag. 194.

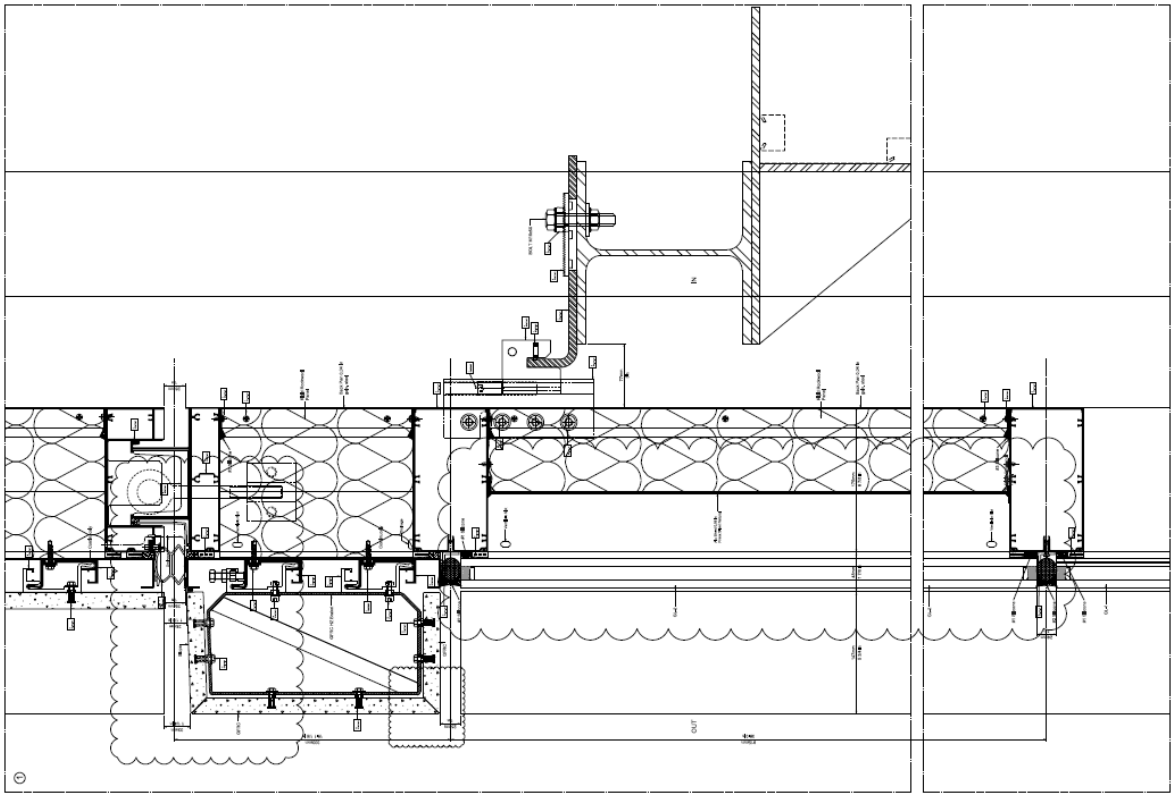


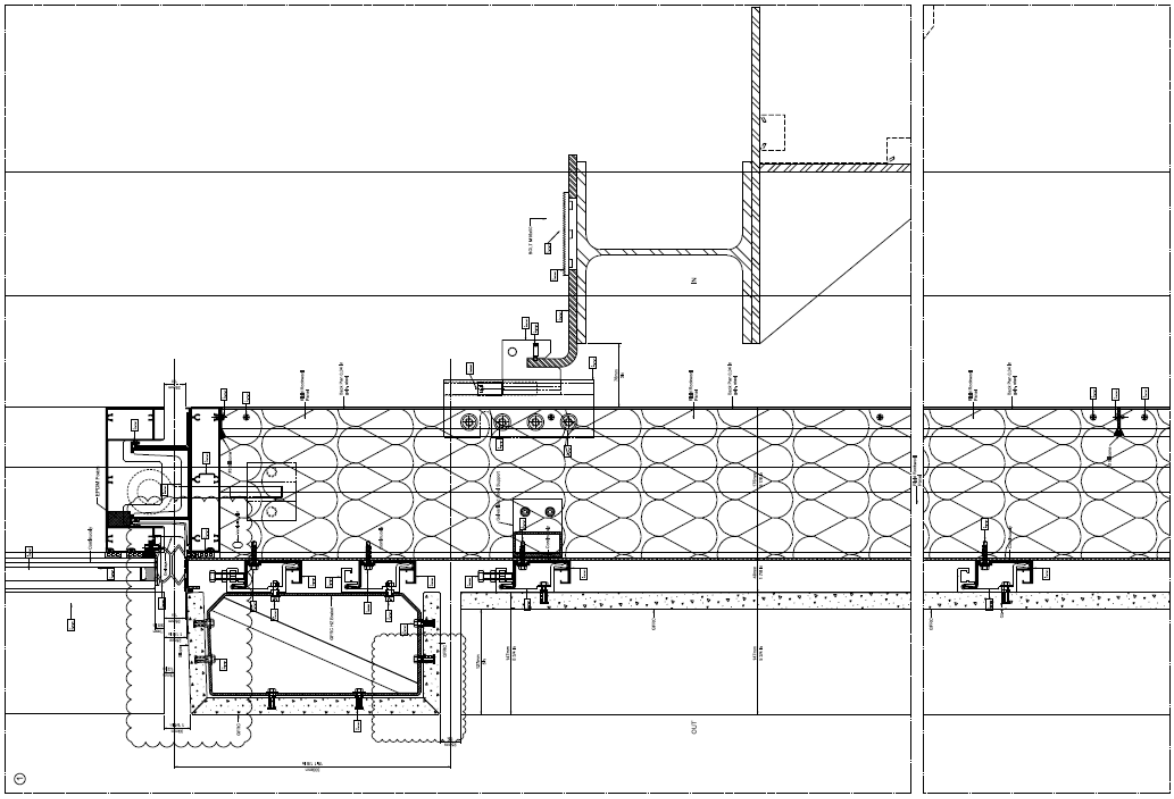
Assetto geometrico del mock-up



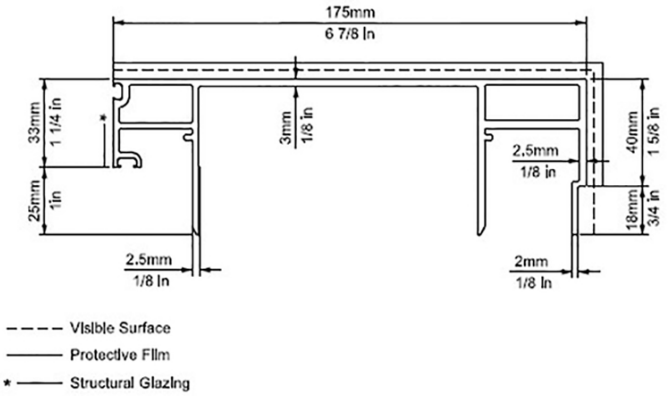
Sezione verticale:
Dettaglio del nodo di connessione della lastra di vetro della cellula al montante

Nella pagina accanto:
Sezioni orizzontali del mock-up sottoposto a verifica prestazionale: dettaglio sulla porzione trasparente e dettaglio sulla porzione opaca

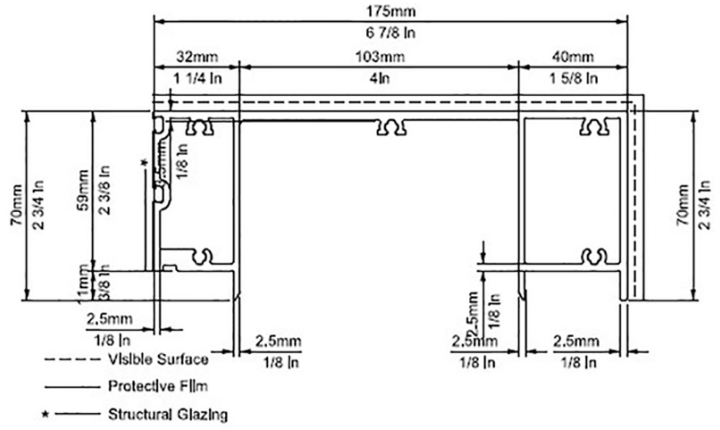




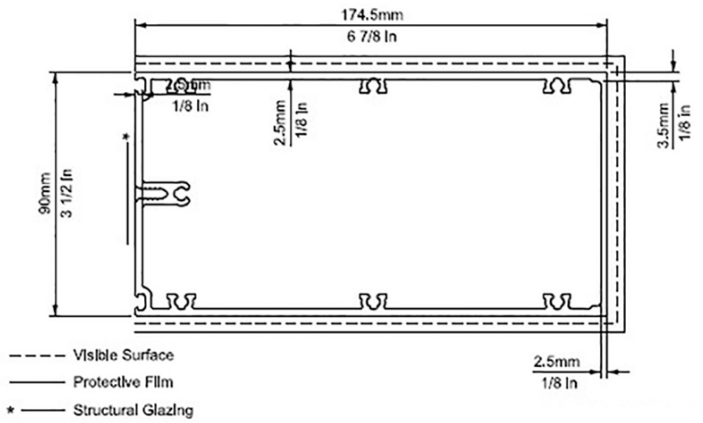
1



2

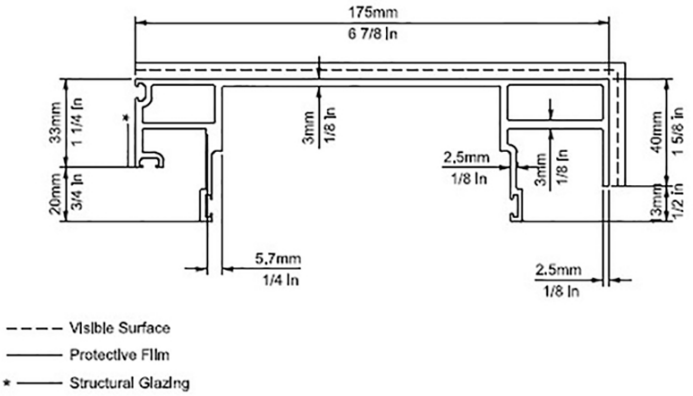


3

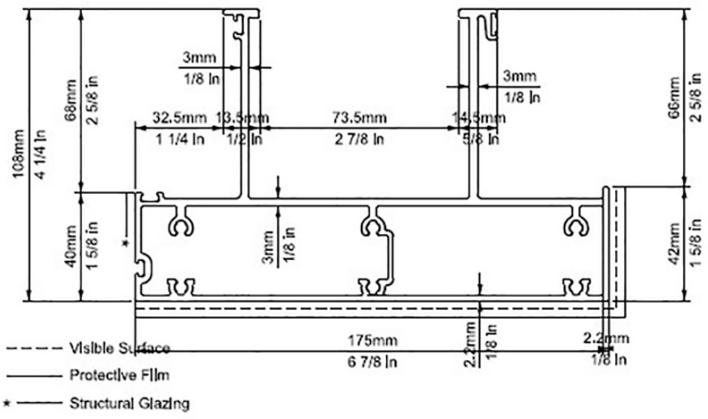


Sistema di intelaiatura della cellula in profili di alluminio estruso in lega EN AW 6063 T6

4



5



1. Connessione ad incastro femmina, Peso 3159 g/m
2. Connessione ad incastro maschio, Peso3080 g/m
3. Traverso inferiore, Peso 4177 g/m
4. Traverso superiore, Peso 4990 g/m
5. Montante intermedio, Peso4224 g/m

Sistema di intelaiatura della cellula in profili di alluminio estruso in lega EN AW 6063 T6

Il calcolo della trasmittanza termica del nodo [Fig. 1] è stato eseguito in accordo con la norma EN ISO 10077-2:2017 *Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Part 2: Numerical method for frames* (ISO 10077-2:2017), secondo il Radiosity Method (rif. § 6.4.2. della EN ISO 10077-2:2017). Il metodo della radiosity tiene conto in maniera molto più accurata dei fenomeni termici di quanto facciano i metodi tradizionali ai fini del calcolo della trasmittanza termica dei profili per serramenti, specie di quelli contenenti cavità come quelli in alluminio, acciaio, pvc e legno/alluminio.
La ISO 10077-2:2017 non include gli effetti della radiazione solare, il trasferimento di calore causato da perdite d'aria o il trasferimento di calore tridimensionale come le connessioni metalliche puntuali.
Per i calcoli termici è stato utilizzato il software "Flixo 8.1".

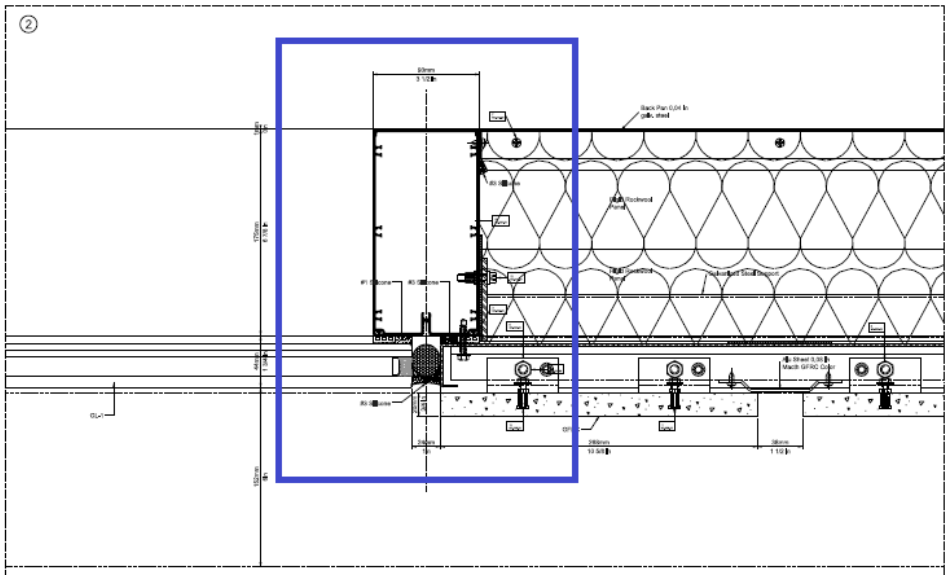


Fig. 1. Nodo del mock-up calcolato

Materiali costituenti il nodo analizzato

In Tab. 1 vengono riportati i valori di conduttività termica dei materiali impiegati nelle analisi e la loro emissività pari a 0,9, in linea con la normativa di riferimento.

Materiali che compongono il telaio	Conduttività (W/mK)	Emissività
Lega di alluminio	160	0,9
Acciaio	50	0,9
EPDM	0,25	0,9
EPDM Foam (espanso)	0,05	0,9
GFRC	1,00	0,9
Pannello isolante Rockwool	0,035	0,9
Silicone strutturale	0,50	0,9
Vetro vision facade	1,024	0,9

Tab. 1. Materiali del mock-up impiegati nel calcolo termico con emissività pari a 0,9 definita dal software Flixo 8.1 ed in linea con la normativa di calcolo di riferimento

Risultati ottenuti

Vengono riportati i risultati ottenuti dalle analisi effettuate sul nodo corrispondenti all'andamento delle temperature e dei flussi di calore all'interno della sezione, dove ad ogni colore corrisponde un livello termico come riportato nella legenda dei colori.
La trasmittanza termica del nodo risulta essere pari a Uf = 4,1 W/m²K

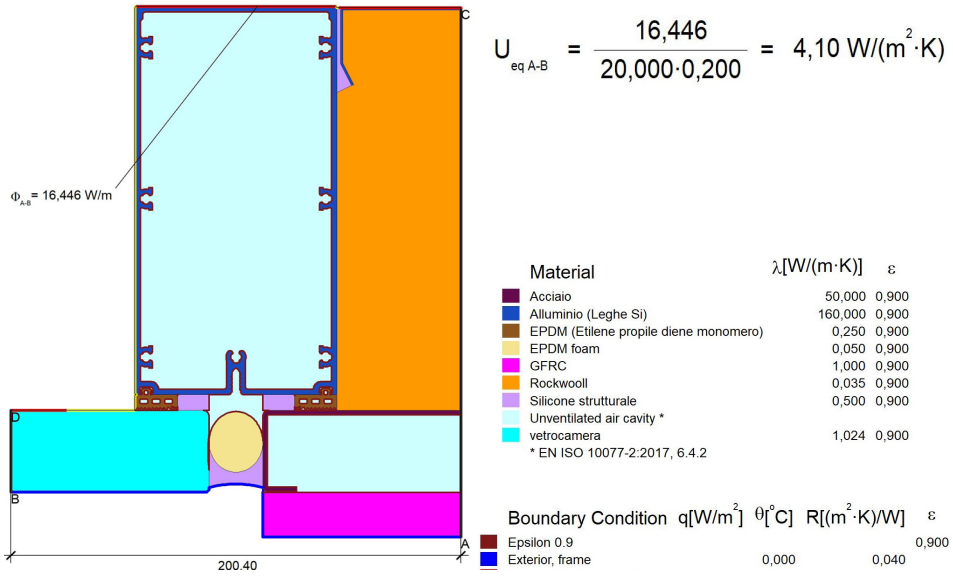
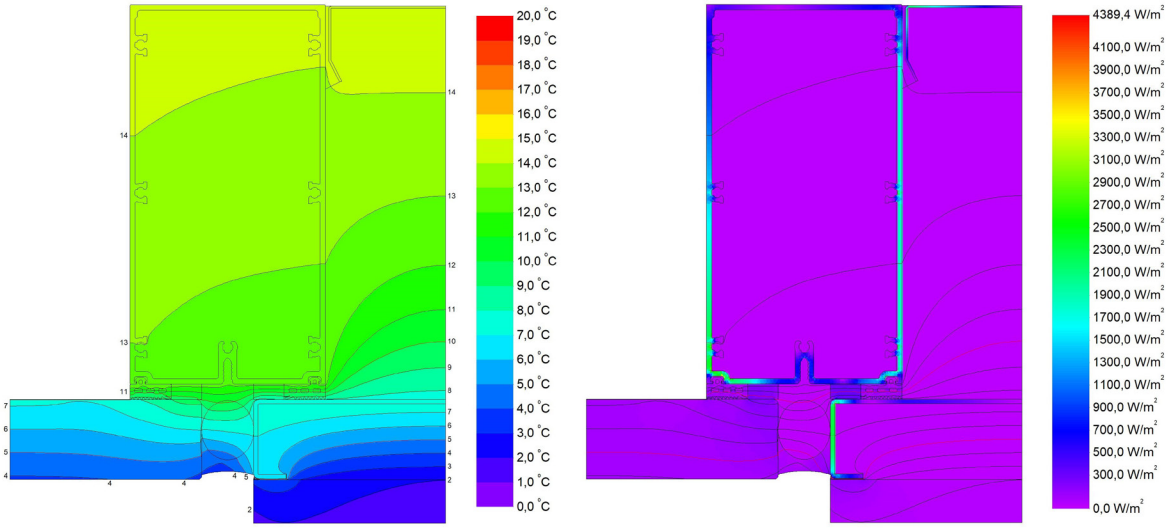


Fig. 2. Configurazione del nodo nel programma Flixo ai fini del calcolo termico con legenda materica

Fig. 3. Andamento delle temperature e dei flussi di calore nel nodo







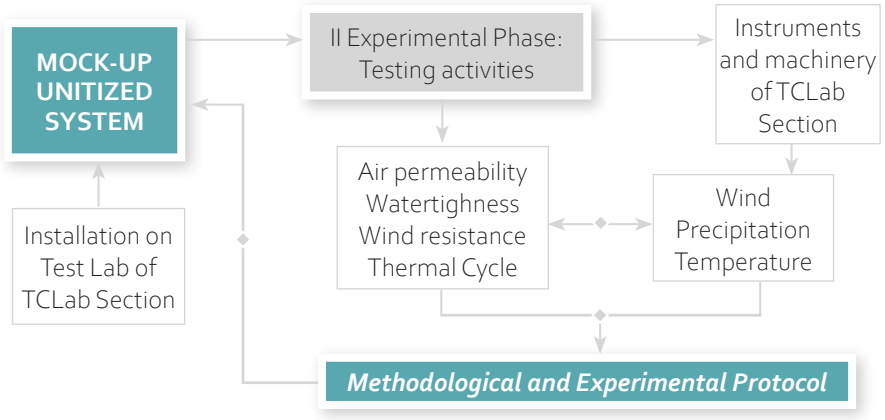
Capitolo 7

Analisi Sperimentale
Azioni di testing finalizzate alla verifica prestazionale

Abstract

Chapter 7 represents the second step in the research's experimental phase. The objective is the definition of a methodological protocol, through which the real performance of the hypothesized mock-up can be measured against extreme climate change events in the Mediterranean Region- The testing activities conducted on the mock-up are carried out at TCLab Section, equipped with a test chamber (TestLab), instrumentation and machinery capable to simulate the climate change effects on building envelopes. Based on a state-of-the-art, air permeability and water-tightness tests do not reflect the long-term performance of façades, especially because of climate change. For these reasons, the methodological protocol, the research output, can be considered as an extension of the standard test procedure, which, in addition to obligatory tests for the air leakage and water-tightness evaluation, includes additional tests such as dynamic wind loading and thermal cycling to simulate climate change and measure the mock-up's areal behavior.
This approach to testing is dictated by the protocol's flexibility, which is structured on the basis that curtain walls must guarantee their adaptive functioning in response to extreme climatic conditions. In this chapter, in addition to the structuring process of the methodological protocol, research output, the results of the testing activities conducted on the mock-up are reported.

Key-words
design process, mock-up, methodological protocol, testing, extreme events



Capitolo 7: Thematic Flow-Chart - Dalla Fase Sperimentale alla Fase di Verifica

Introduzione

"Given the ever growing complexity and variety of building envelope systems, the evaluation of their performance via preconstruction mock-up test is critical to ensure performance during the service life of building"[1]
[Behr, 2009, p. 247]

Con questo capitolo, si dà l'avvio al secondo step della fase sperimentale della ricerca.
Le attività operative e applicative della ricerca si basano sull'obiettivo di definire un protocollo di procedure di testing normate, attraverso il quale poter analizzare le prestazioni a lungo termine su un mock-up di facciata continua della tipologia a cellula, rispetto ad eventi estremi di cambiamento climatico per la Regione del Mediterraneo, quali temperature estreme, precipitazioni intense e carico da vento. Le attività di simulazione e testing condotte sul mock-up ipotizzato, sono state svolte presso la Sezione TCLab del BFL, dotata di una camera di prova (TestLab) e di attrezzature e macchinari in grado di simulare gli effetti del cambiamento climatico sugli involucri edilizi.
Definiti l'apparato strumentale e la progettazione e la costruzione del mock-up in scala 1:1, si passa alla descrizione della fase preliminare di preparazione per l'avvio delle attività di testing. Questa fase consiste nelle operazioni costitutive del processo di installazione del mock-up nella camera di prova, rappresentando un fattore rilevante per la conduzione dei test. Pertanto si predispongono gli opportuni ancoraggi, le staffe, per connettere il mock-up alla camera di prova del laboratorio, e la successiva sigillatura dello spazio rimanente tra mock-up e camera di prova. Questo passaggio risulta essere delicato e alquanto complesso, poiché errori di misurazione, potrebbero comportare un disallineamento del mock-up durante la sua installazione, comportando delle correzioni on-site.
Come più volte sottolineato nella tesi, le soglie di raggiungimento prestazionale delle facciate continue sono *obbligate* da limiti normativi e classificazioni standard in relazione a prove di permeabilità all'acqua e di tenuta all'acqua in regime statico e dinamico. Tuttavia, queste sole prove non rispecchiano le prestazioni a lungo termine delle facciate, soprattutto in considerazione dei cambiamenti climatici, ritenendo necessario analizzare questi sistemi attraverso prove termiche e di carico da vento.
È su queste basi che viene strutturato il *protocollo metodologico* di prova per la verifica sperimentale sul mock-up di facciata continua a cellula, inteso come ciclogramma di prova aggiornato in grado di leggere, in modo dinamico, le performance del mock-up analizzato associando i requisiti prestazionali all'evento estremo di cambiamento climatico della Regione del Mediterraneo.

Pertanto, il mock-up è stato studiato simulando le seguenti sollecitazioni esterne:
- *temperature estreme*: per simulare il fenomeno di ondate e isole di calore, la sperimentazione è stata effettuata sollecitando il mock-up a temperature ambientali elevate;

- *precipitazioni intense:* per simulare bombe d'acqua e pluvial flooding, la sperimentazione è stata effettuata mediante la riproduzione di un flusso d'acqua sulla facciata esterna del mock-up attraverso l'impianto sprinkler con ugelli calibrati. Sono state eseguite due simulazioni del getto d'acqua: la prima, in condizioni di assenza di vento ed esercitando una pressione positiva/negativa sulla facciata e la seconda simulazione effettuata in presenza di vento riprodotto con il ventilatore che arriva a simulare la presenza di un uragano;

- *vento estremo*: per simulare le diverse intensità del carico da vento, la sperimentazione è stata effettuata simulando un flusso di vento, secondo tre step: il primo riferito ad una leggera pressione di vento, il secondo in condizioni di servizio e il terzo in condizioni di sicurezza al fine di verificare il comportamento del mock-up ad una forte pressione.

Per questi motivi, il protocollo metodologico e sperimentale, output della ricerca, può essere considerato come un'estensione della procedura di prova standard, quindi *adattato* al presente mock-up che, oltre a contenere test obbligatori come la valutazione delle perdite d'aria e infiltrazioni all'acqua, prevede test aggiuntivi come il carico dinamico del vento e i cicli termici al fine di simulare i cambiamenti climatici e mostrare il comportamento del mock-up. Questa modalità di approccio al testing è dettata proprio dalla flessibilità del protocollo, ideato e strutturato sulla base che le facciate continue devono garantire il loro funzionamento adattivo in risposta a condizioni climatiche estreme.
La trattazione che segue, oltre ad esplicitare il processo di sviluppo del protocollo metodologico e sperimentale, descrivere le attività di testing condotte sul mock-up, ponendo attenzione sui deficit e criticità del mock-up, quando questo è sottoposto a continui stress climatici

7.1 Strumenti adottati per il testing

"Un laboratorio oltremodo pensato come un continuo upgrade di strumentazioni,
per svolgere attività in risposta ai trend di innovazione dell'industria delle costruzioni
nei processi che tendono a realizzare involucri
ambientalmente interattivi, adattivi e interagenti"[2]
[Milardi, 2015, p. 224]

La fase sperimentale della ricerca, definita da due step: attività di simulazione (già descritte nel Cap. 6) e da attività di testing (oggetto del presente capitolo), ha l'obiettivo di analizzare le prestazioni del mock-up in base al suo comportamento funzionale quando viene sollecitato da eventi estremi di cambiamento climatico che, per la Regione del Mediterraneo, corrispondono a temperature estreme, precipitazioni intense e intensificazione del carico da vento (Cfr. Cap. 3).
Prima di addentrarci nella trattazione sulle attività di testing condotte sul mock-up, occorre rafforzare alcuni concetti utili alla comprensione delle azioni operative e strumentali della ricerca.
In primo luogo si vuole ribadire che, di fronte alla necessità della richiesta di un equilibrio dinamico, che sottende il rapporto edificio-contesto, che per la presente ricerca è rappresentata dalla relazione 'Building envelope *versus* Climate Change' (Cfr. Cap. 3), emerge la difficoltà di valutare le prestazioni degli involucri rispetto a variabili ambientali stante il fatto che le componenti di cui sono costituiti sono molteplici e tutte da valutare singolarmente. Tuttavia questa procedura non consente di validare a livello complessivo il funzionamento dinamico degli involucri a sollecitazioni esterne, soprattutto se si considera che ogni componente ha una propria stratigrafia e diversa composizione materica [Lucarelli, 2015].
Inoltre, sebbene sia stata condotta una prima verifica prestazionale attraverso le azioni di simulazione con software parametrico (Cfr. Cap. 6), queste non sono risultate sufficienti a comprendere le reali prestazioni del mock-up soggetto ad eventi estremi di cambiamento climatico per la regione del Mediterraneo.
Per questi motivi, l'approccio operativo basato su test di misura e valutazione prestazionale in regime simulato, presso laboratori di prova specializzati, si distingue come strumento strategico rispetto ad una nuova modalità di lettura *contestuale e dinamica* delle prestazioni degli involucri nei diversi assetti tecnologici e materici [Milardi, 2015].
Per la ricerca, questo approccio di tipo sperimentale è reso possibile dall'opportunità di poter disporre di un laboratorio di testing avanzato, la sezione TCLab, centrale[3] alla struttura laboratoriale di ricerca permanente del Building Future Lab[4] costruito presso l'Università Mediterranea di Reggio Calabria, con afferenza al Dipartimento di Architettura e Territorio dArTe [Trombetta, & Milardi, 2015]. La sezione TCLab[5], attraverso specifiche attrezzature e strumentazioni (di cui si darà specifica nel prosieguo del paragrafo), consente di simulare condizioni climatiche-ambientali e di conseguenza misurare le prestazioni degli involucri

edilizi, orientando il settore delle costruzioni a realizzare involucri performanti in un'ottica di *Adaptive* e *Climate Resilient Design* (Cfr. Cap. 1).
La progettazione delle caratteristiche adattive e resilienti degli involucri edilizi, soprattutto in aree sensibili e critiche a livello climatico, come quella della Regione del Mediterraneo, sembra si stia caratterizzando di azioni che sono rivolte alla comprensione delle dinamiche prestazionali e alla verifica dell'applicabilità delle soluzioni strategiche in una fase che precede quella esecutiva [Milardi, et al., 2021 (a)].
Nel settore della Ricerca e Sviluppo, infatti, si assiste non solo all'ampliamento delle tipologie di sistemi per l'involucro ma, soprattutto, si registra uno straordinario incremento di innovazione sulle funzionalità e risposte attive dei componenti. Ciò spinge i diversi attori del settore delle costruzioni a definire degli scenari di previsione sul comportamento prestazionale degli involucri, analizzato rispetto ad un contesto climatico di riferimento, al fine di validare l'adeguatezza delle risposte in un'ottica predittiva. Inoltre, la verifica e il controllo durante prove sperimentali, basati su procedure di prova normate, permettono non solo di ottimizzare le performances qualitative di un progetto ma di minimizzare gli errori durante la realizzazione, facilitando l'attività di controllo-confronto tra ciò che si progetta, ciò che si realizza e ciò che si gestisce [Milardi, et al., 2021 (b)].
Riguardo a quest'ultimo aspetto, il processo sperimentale derivante dalle attività di testing può essere considerato come uno strumento che è in grado di supportare la previsione di risultati attesi e di leggere ex-ante le prospettive future, indirizzando o calibrando aspetti migliorativi, arricchendo in tal modo il processo di design di una capacità prestazionale testata in ambiente controllato. I risultati sono riscontrabili nell'accrescimento delle conoscenze di settore e a concepire l'innovata figura professionale dell'architetto, capace di prevedere ex ante gli effetti indotti e subìti degli involucri edilizi e il cambiamento climatico.
Un fattore che viene preso in considerazione per *affermare* l'importanza delle attività di testing, deriva dal fatto di poter sperimentare sul campo e quindi testare 'dal vero' le prestazioni degli involucri edilizi simulando, attraverso specifiche attrezzature, effetti dei fenomeni di cambiamento climatico, su modelli di prova in scala reale, detti mock-up [Milardi, 2015; Mazzucchelli, et al., 2022].
In linea con gli aspetti tracciati dall'innovazione tecnologica che richiede nuove performance agli involucri edilizi - di tipo Adaptive e Climate Resilient - in relazione ad un contesto ambientale in continuo mutamento, il ruolo del testing e della sperimentazione per la ricerca è fondamentale come fattore potenziale di modifica ai processi di progettazione consolidati, attraverso una modalità di controllo e verifica delle caratteristiche prestazionali delle facciate continue in grado di rispondere in modo innovato ai trend del mercato, alle stringenti normative di settore e, in particolare, alle dinamiche di cambiamento climatico [Trombetta, et al., 2022].
Le attività di simulazione e testing possono essere eseguite mediante due diverse metodologie: da un lato, il livello di *certificazione* basa le attività di testing su mock-up di involucro, facciate o componenti di questi, seguendo procedure di prova normate, definiti *method statement*, in ambito europeo UNI EN e americano AAMA, ASTM che valida il soddisfacimento dei requisiti previsti in ambito normativo del prodotto testato che ottiene la certificazione per poter essere immesso nel mercato; dall'altro, il livello sperimentale è diretto alla valutazione sperimentale – attraverso attrezzature, strumenti e macchinari presenti nella sezione TCLab - di un mock-up di involucro o altro costruito appositamente per verificare le caratteristiche delle sue prestazioni mediante la formulazione di un assetto e un processo di prova realizzato su misura per il mock-up da testare.
Questo livello sperimentale[6] ha lo scopo di aggiornare le procedure di prova normate correnti, implementare nuovi assetti tecnologici, ciclogrammi di prova e soglie prestazionali e traccia la possibilità di definire un upgrade tecnologico e prestazionale del mock-up testato mediante modifiche di geometria, di materiali o di dimensioni, trasformandolo in un nuovo

mock-up da sottoporre ad attività di testing. Questa metodologia sperimentale interna di processo deve essere strutturata e stabilita con il team tecnico del laboratorio di prova e con i produttori che forniscono il mock-up.
Rispetto a quanto detto, nella sezione TCLab si sono svolte esperienze di test su facciate continue, involucri edilizi e componenti come infissi, portoni, sia in regime di certificazione che di sperimentazione, in merito alle prove di:
- Permeabilità all'aria in regime statico;
- Tenuta all'acqua in regime statico e dinamico;
- Resistenza al carico del vento e carico permanente;
- Resistenza all'urto;
- Resistenza alle azioni sismiche su elementi non strutturali sugli assi x-y-z, sia in regime statico che dinamico;
- Resistenza agli shock termici, o comunque agli andamenti termici estremi su ciclogrammi da +85 C° a -15 C° (+88/-18);
- Test di flussi termici su serramenti esterni.

Perseguendo gli obiettivi della ricerca, l'attività di testing (secondo step della fase sperimentale) condotta nella sezione TCLab e i relativi risultati – che vengono descritti nel prosieguo dei paragrafi – si basano sulla misurazione delle reali risposte prestazionali del mock-up di facciata continua della tipologia a cellula, secondo una metodologia di prova di tipo sperimentale, strutturata ad hoc per questo specifico mock-up, in cui è richiesta la simulazione di eventi estremi (tra quelli analizzati) di cambiamento climatico per la Regione del Mediterraneo.

Dopo tale premessa, si intende delineare le principali attrezzature[7] di cui è dotata la sezione TCLab e gli strumenti che sono adottati per svolgere la fase sperimentale della ricerca. Il tentativo di riportare una descrizione sintetica delle principali attrezzature della sezione, risiede nel fornire delle informazioni utili alla comprensione dei processi di prova e degli strumenti che effettuano testing in conformità con normative in ambito europeo e americano e facilitare di conseguenza la lettura delle attività di testing della fase sperimentale che sarà condotta sul mock-up ipotizzato.
Si vuole precisare che, la gestione delle prove e la lettura dei dati viene effettuata in maniera centralizzata da una 'Control Room' dotata di sistema Wizard a controllo in telemetria.
Le attrezzature e le strumentazioni che dispone il laboratorio di testing sono frutto dell'innovazione tecnologica anche proveniente anche da altri settori, come ad esempio la struttura dell'elica del ventilatore AAMA (di cui si darà specifica nel prosieguo della trattazione) deriva dal principio di funzionamento dell'elica utilizzato dal settore aeronautico.

La sezione del TCLab è dotato di due grandi attrezzature:
- una 'Camera di Prova' denominata *Test Lab*;
- 'Cella' di Simulazione Climatica per test accelerati indoor e outdoor, identificata con il nome di *Test Cell*, 360°/Lat/β.

Il Test Lab, realizzato secondo le caratteristiche di funzionamento stabilite dalle prove da effettuare, è costituito da una struttura intelaiata in acciaio di dimensione 18 m in altezza (15 effettivi), 12 m in larghezza e 4,5 m in profondità, suddiviso in due campate (Test Lab destro e Test Lab sinistro). La garanzia di tenuta della camera è data dalla chiusura in pannelli di tamponamento in poliuretano espanso che, nella parte frontale della camera vengono rimossi, al fine di garantire l'installazione dei mock-up in scala 1:1, di facciate continue (definite dalla EN 13830:2015 – Curtain Walling), o elementi simili, per essere testati secondo procedure di prova standardizzate, sia in ambito europeo che americano.

Il Test Lab [Fig. 7.1] è formato da un impianto di AAV (aria, acqua e vento, pressione-depressione), una camera termica (dimensioni 7x5x1.50 m), travi sismiche e mobili, per lo svolgimento delle prove di spostamento e per gli equilibri elastici.
Le travi sono 8, simulano le solette di un edificio e si dividono in 6 travi mobili (tre per lato) e 2 travi fisse (travi sismiche) (una per lato). Il laboratorio è predisposto per la divisione interna tra le due camere affinché si possa sigillare anche solo una parte di laboratorio e permettere l'esecuzione dei test su più provini. La particolare configurazione dell'impianto consente una notevole flessibilità nella geometria dei campioni da testare: non solo facciate piane ma anche porzioni di facciata curve, con angoli concavi e convessi e con elementi sporgenti. La dimensione massima del mock-up può essere 14x12 m, ovvero circa 170 mq per un peso massimo di 130 kg/mq.

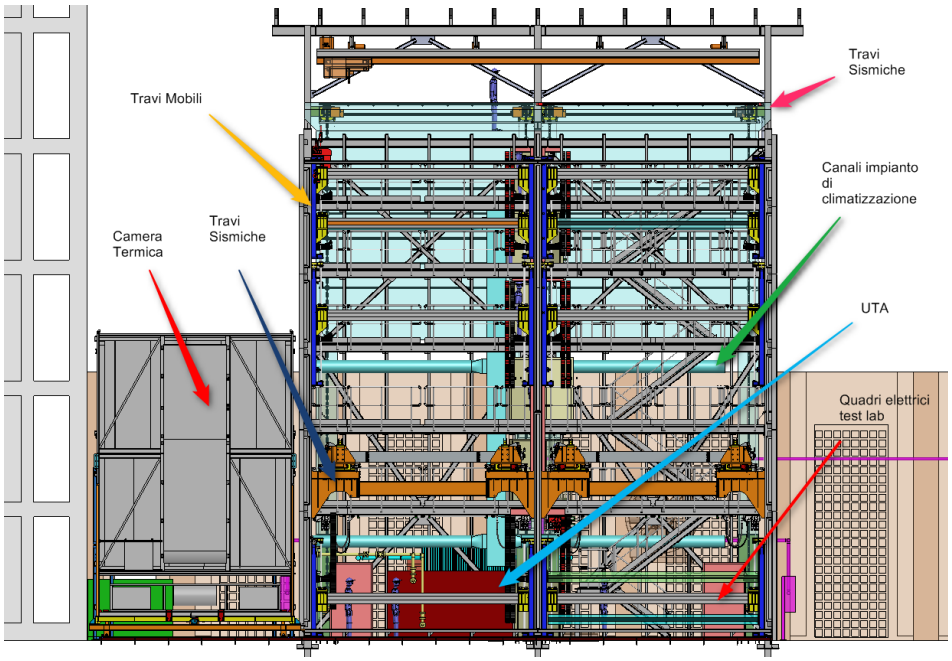


Fig. 7.1. Vista frontale del TestLab con specifica sulle principali attrezzature

È inoltre dotato di 50 laser per la misura delle deflessioni frontali durante le prove di resistenza al carico da vento e per le prove di permeabilità all'acqua di un impianto sprinkler [Fig. 7.2] - oggetto di brevetto internazionale: '*Apparatus for testing of water permeability of samples of building facades*'[8] - che ha lo scopo di generare un film di acqua uniforme sulla superficie del provino con spruzzi di diverse intensità, secondo le portate richieste dalla normativa UNI e ASTM. Il sistema sprinkler è costituito da una serie di tubi in acciaio con ugelli montati a cono pieno in modo da creare una maglia quadrata di 700 mm di lato. I tubi sono collegati tra di loro mediante tubi flessibili e sono dotati di un sistema di regolazione della portata indipendente per ogni fila di ugelli.

Il Test lab è dotato anche da una Camera Termica [Fig. 7.3], realizzata in conformità alla AAMA 501.5-07 '*Test Method for Thermal Cycling of Exterior Walls*'[9] (dimensione 7mx9m) per la simulazione di shock termici e l'irraggiamento solare. Le prestazioni prevedono cicli termici estremi da norma: +88 C°/– 18C° per 8h, a temperatura interna costante di 24 C°. Montata su binari paralleli al piano della facciata per scorrere lungo tutta la camera di

prova, è dotata della possibilità di regolazione perpendicolare al piano della facciata per compensare alla variabilità dimensionale dei componenti in prova.



Fig. 7.2. Sistema impianto sprinkler



Fig. 7.3. Camera termica

La *Test Cell* [Fig. 7.4] è una struttura per la caratterizzazione termodinamica di sistemi di involucro edilizio in scala reale ed è dotata di una Hot-Box per la valutazione dei flussi termici e la misurazione della trasmittanza termica dinamica di chiusure opache e per la determinazione della conduttanza termica di pareti opache in regime stazionario.
Nello specifico le tre unità indipendenti sono:
- *Semicella fissa* (semicella calda), costituita da una struttura in profilati di alluminio che supporta una cella realizzata con pannelli di polistirolo espanso, spessore mm 160, rivestiti internamente con nobilitato, colore nero opaco, spessore mm 10. La cella è priva della parete frontale prevista per essere accoppiata al campione in prova.
- *Porta campione*, formato da un telaio in profilati di acciaio munito di quattro ruote con gola a V e da due cornici in profilati di alluminio. Una cornice di alluminio è solidale al carrello mentre la seconda può essere fissata in posizione variabile in funzione dello spessore del campione che può variare dal valore minimo di 100 mm al valore massimo di 400 mm.
- *Semicella mobile* (semicella calda), a differenza della semicella fissa è collegata alla piattaforma di supporto tramite un telaio munito di 4 ruote con gola a V.



Fig. 7.4. TestCell

Uno dei più importanti strumenti di supporto alle grandi attrezzature è il ventilatore assiale dinamico [Fig. 7.5] che è in grado di produrre un flusso d'aria normale al campione con velocità minima superiore a 30 m/s (per oltre 70 km/h) lungo l'asse centrale orizzontale per l'esecuzione di prove di tenuta all'acqua e aria in condizioni dinamiche secondo la norma europea EN 13050:2011. È in grado di generare velocità del vento pari a circa 220 Km/h in conformità alle normative statunitensi AAMA 501.1-05 '*Standard test method for water penetration of windows, curtain walls and doors using dynamic pressure*'.



Fig. 7.5. Ventilatore assiale dinamico

Definito l'apparato strumentale della sezione TCLab, il paragrafo che segue sposta l'attenzione su una delle fasi più importanti per la preparazione delle attività per l'avvio delle azioni di testing. Si fa riferimento alla definizione delle operazioni per l'installazione del mock-up nella camera di prova del laboratorio, condizione necessaria per procedere alla verifica prestazionale del mock-up.

7.2 Fase preliminare: installazione del mock-up nella camera di prova

"The installation technology, safety procedures and quality assurance depend not only on the type of the building and system used, but also on the good practices and traditions in the region and the facade company involved in the construction"[10]
[Trifonova, 2016, p. 198]

Le operazioni di predisposizione della camera di prova per l'alloggiamento del mock-up costituiscono la fase preliminare per procedere con l'avvio delle attività di testing.
A tal proposito, si vuole mettere in evidenza che il processo di design del mock-up (descritto nel precedente capitolo, Cfr. Cap. 6), non si conclude con la definizione tecnica degli elementi che costituiscono il mock-up, ma la progettazione ha riguardato anche la predisposizione degli opportuni ancoraggi per connettere il mock-up alla camera di prova del laboratorio, denominata TestLab (a cui si rimanda per specifiche al paragrafo precedente).

Questa attività è stata strutturata in modo congiunto con gli ingegneri e la sezione TCLab. Le operazioni di rilievo della geometria strutturale della camera di prova hanno permesso la definizione completa e dettagliata, a livello dimensionale, degli elementi strutturali quali, le travi mobili e le travi sismiche sismiche e la distanza che intercorre in altezza tra le travi. Ciò ha portato alla definizione dell'assetto della camera di prova, all'individuazione della quota di interpiano e delle possibili zone sulle travi su cui ancorare il mock-up, attenzionan-

do le parti di bordo sinistra e destra delle travi che non possono essere utilizzate per l'installazione del mock-up, in quanto sono caratterizzate dalla presenza dei rispettivi motori elettrici ed altri elementi meccanici, che ne consentono la movimentazione per le prove di tipo strutturale.
La soluzione tecnica progettata [Figg. 7.6, 7.7, 7.8] si caratterizza dal posizionamento, per ognuna delle tre travi, di 3 staffe di ancoraggio puntiformi in acciaio delle dimensioni di 200 mm in larghezza e di 390 mm in lunghezza (pari alla dimensione della trave).

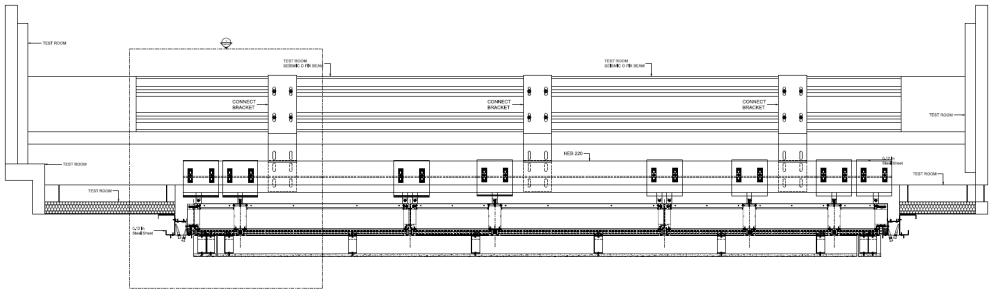


Fig. 7.6. Sezione orizzontale: installazione del mock-up nella camera di prova. Elaborazione a cura della Dottoranda con il supporto degli ingegneri dell'azienda Cianciolo Group s.r.l.

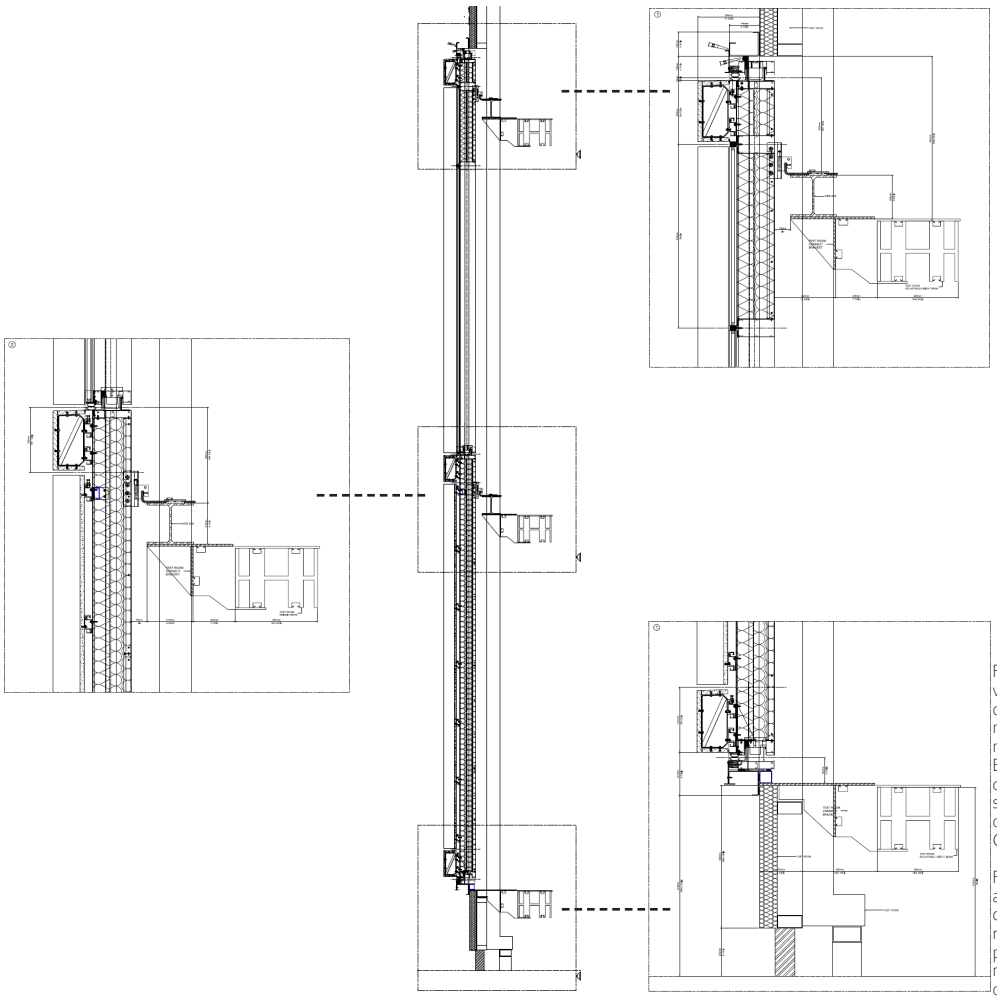


Fig. 7.7. Sezione verticale e dettagli di connessione: posizionamento del mock-up nella camera di prova. Elaborazione a cura della Dottoranda con il supporto degli ingegneri dell'azienda Cianciolo Group s.r.l.

Fig. 7.8. Nella pagina accanto predisposizione delle staffe di ancoraggio e travi (in rosso) per la connessione del mock-up alla camera di prova



La staffa sinistra è posta ad una distanza di 651 mm dagli elementi meccanici ed elettrici posti al bordo della trave, mentre la distanza dalla parte destra della trave aumenta, arrivando ai a 914 mm. Le staffe di numero complessivo pari a 9, sono connesse mediante bullonatura alle travi del laboratorio, dimensionate rispetto all'altezza e alla larghezza delle travi. Le staffe sbordano rispetto la trave di 418 mm e la distanza tra il mock-up e la staffa viene assicurata da una tolleranza di 76 mm.
Il *collegamento* tra le staffe e il mock-up è realizzato attraverso il posizionamento di travi HEB 220, poste in corrispondenza dei montanti superiori e inferiori dell'intelaiatura delle cellule. Le 3 travi HEB (stesso numero delle travi della camera di prova) sono connesse alle staffe di ancoraggio mediante saldatura. Dall'esterno questi elementi strutturali non si vedono, grazie al pannello spandrel della cellula.
La connessione del provino alla camera di prova è indispensabile per la verifica delle prestazioni e risulta essere un passaggio delicato e alquanto complesso, poiché errori di misurazione per il posizionamento del provino, ad esempio tra telaio mock-up, staffe di ancoraggio e travi della camera di prova, potrebbero comportare un disallineamento del mock-up durante la sua installazione con la diretta conseguenza di apportare le modifiche necessarie, attraverso specifiche operazioni/lavorazioni di correzione, che determinano altresì un allungamento dei tempi di installazione.
Per queste ragioni, la fase preliminare all'installazione del provino, è stata caratterizzata da un controllo meticoloso sulle dimensioni sia degli elementi che costituiscono il mock-up sia degli elementi di connessione del mock-up alla camera di prova, per verificare la coincidenza rispetto quanto progettato e disegnato a livello esecutivo.
In questo contesto, è rilevante mettere in evidenza un aspetto problematico che deriva dalla progettazione del sistema di sigillatura (operazione di risarcitura) dello spazio che si genera tra il mock-up e la camera di prova.
Questo spazio è il risultato della distanza che intercorre tra il bordo aperto della camera di prova e il perimetro del provino che deve essere accuratamente sigillato. Per avere una camera a tenuta ed evitare infiltrazioni indesiderate di acqua e perdite d'aria, la chiusura avviene mediante elementi in alluminio (di larghezza pari a 620 mm) connessi alla struttura portante interna della camera mediante viti e bulloni innestati tra il mock-up e la camera di prova [Fig. 7.9]. In aggiunta, per escludere importanti perdite d'aria, viti e bulloni vengono sigillati mediante silicone butilico e gli spazi tra mock-up e elementi in alluminio e tra questi e la camera di prova vengono riempiti in gomma isolante e successivamente sigillati mediante vernice sigillante in poliuretano espanso e nei punti più a rischio viene applicato il nastro adesivo sigillante [Fig. 7.10].





Fig. 7.9. Elementi di chiusura in alluminio tra travi perimetrali del mock-up e camera di prova

Fig. 7.10. Risarcitura con vernice sigillante e nastro adesivo

L'installazione del mock-up è stata eseguita in riferimento ad un piano delle attività strutturato in sinergia con gli ingegneri e gli installatori dell'Azienda Cianciolo e la sezione del TCLab, definendo un cronoprogramma al fine di evitare che le operazioni di competenza della sezione TCLab non intralciassero quelle dell'Azienda Cianciolo e viceversa.
Come messo in evidenza nel capitolo 5, una corretta installazione può limitare l'insorgenza di fallimenti o problematiche prestazionali del sistema che, se riscontrate durante attività di testing, spesso risulta difficile individuare il malfunzionamento e definire una soluzione ad hoc per correggerlo.

Per maggiore chiarezza, vengono riportate le attività che devono essere intese come step sequenziali per l'installazione del provino:

1. Preparazione della camera di prova che prevede lo smontaggio di 33 pannelli di tamponamento;
2. Posizionamento alla giusta quota delle travi della camera di prova per il corretto allineamento della struttura portante del mock-up;
3. Posizionamento delle 9 staffe di ancoraggio alle travi della camera di prova mediante bulloni in acciaio;
4. Posizionamento delle 3 travi HEB e connessione mediante sigillatura alle staffe di ancoraggio;
5. Posizionamento dei profili in acciaio del telaio strutturale di perimetro del mock-up (in questa fase vengono montanti solo 3 profili - 1 orizzontale alla base del mock-up e 2 verticali perimetrali - in quanto se installato il profilo orizzontale di chiusura, non consentirebbe il montaggio delle cellule, data la mancanza di spazio per la movimentazione);
6. Chiusura mediante elementi in alluminio dello spazio di risulta che intercorre tra il telaio strutturale del mock-up e il perimetro del foro della camera di prova;
7. Assemblaggio del mock-up che prevede il posizionamento delle sei cellule. Ogni cellula viene sollevata mediante specifico bilancino di sospensione con catene di ritegno e agganciata mediante discesa in verticale. Per l'esecuzione di questa procedura di aggancio 2 operatori all'esterno hanno il compito di accompagnare la cellula e posizionarla, 2 operatori all'interno della camera di prova, ad un livello di quota più alto verificano l'allineamento della cellula e danno l'avvio al fissaggio e un ultimo operatore ha il compito di sganciare la cellula dal bilancino. Il posizionamento delle cellule del primo e del secondo livello avviene da destra verso sinistra[11];
8. Posizionamento dell'ultimo profilo in acciaio del telaio strutturale di perimetro del mock-up e successiva chiusura con elementi di alluminio tra telaio del mock-up e camera di prova;
9. Pulizia dei giunti delle cellule e verifica che le superfici non siano bagnate;
10. Applicazione del sigillante siliconico per garantire la tenuta a infiltrazioni d'acqua e perdite d'aria;
11. Connessione degli elementi di rivestimento non strutturali in GFRC al telaio della cellula;
12. Connessione mediante viti di pannelli in alluminio per garantire una protezione al telaio strutturale della cellula;
13. Sigillatura mediante l'utilizzo di vernice in poliuretano espanso della zona di collegamento tra mock-up e camera di prova, al fine di evitare importanti perdite d'aria del sistema.

In conclusione, l'esplicitazione degli step consequenziali della fase preliminare di installazione del mock-up, ha condotto la trattazione a porre l'accento su alcune questioni che riguardano le lavorazioni effettuate nella camera di prova per definire il suo assetto che è fattore essenziale per l'installazione del mock-up [Fig. 7.11].



Difatti, queste operazioni richiedono un alto livello di controllo e verifiche in termini dimensionali per assicurare il corretto montaggio del mock-up e dovrebbero essere definite da linee guida standardizzate che indicano procedure di installazione, modifiche in itinere e attrezzature, vista la complessità che sta dietro al processo di design fino all'installazione di un mock-up in un laboratorio di prova. Per maggiore chiarezza sull'importanza di questa fase, si vuole precisare che il processo di installazione non è identico per ogni facciata continua da testare in laboratorio, in quanto dipende dalla tipologia di facciata continua, dalle sue caratteristiche dimensionali e tecnologiche, dalla sua configurazione geometrica (se è aggettante, curva, se presenta angoli o elementi come balconi), fattori che incidono sulla costruzione degli step sequenziali di installazione e sulla preparazione della camera di prova. Per questo motivo, per ogni test da condurre, bisogna sviluppare un programma ad hoc delle attività che consentono l'alloggiamento del mock-up nella camera di prova.
Dopo aver presentato la messa a sistema del mock-up nella camera di prova, gli step successivi sono indirizzati al secondo step della fase sperimentale della ricerca.
L'obiettivo è quello di testare le prestazioni del mock-up, identificando la procedura di prova più idonea a verificare il comportamento rispetto agli eventi estremi come temperature estreme e intensificazione delle precipitazioni e del carico da vento al fine di sviluppare un protocollo metodologico di testing di cambiamento climatico per la Regione del Mediterraneo. Il carattere sperimentale della ricerca risiede nella volontà di determinare sistemi performanti di involucro edilizio, mediante una lettura delle soglie prestazionali come strategia di risposta alle questioni climatico-ambientali.

Pertanto, definito l'apparato strumentale della sezione TCLab e l'assetto del mock-up nella camera di prova, i paragrafi che seguono sono rivolti alla descrizione della fase sperimentale della ricerca che prevede attività di testing sul mok-up, la cui misurazione delle prestazioni *reali* è strutturata sulla base di un protocollo metodologico di prova sperimentale, caratterizzato dalla simulazione degli effetti di cambiamento climatico per la Regione del Mediterraneo in linea con procedute normate americane.
Il protocollo metodologico approntato per la valutazione delle prestazioni del mock-up vuole essere uno strumento aggiornato di prova che consente il test di mock-up sollecitati da variabili di cambiamento climatico in continuo mutamento.

7.3 Verso la definizione della metodologia di prova per le azioni di testing

"Although thermal performance of the systems can be defined by simulation, real thermal performance of the system may vary with simulation results"[12]
[Yalaz, et al., 2018, p. 255]

Definiti l'assetto tipo-tecnologico del mock-up, gli strumenti e le attrezzature per condurre la verifica prestazionale nella sezione TCLab, l'attenzione si sposta sulla procedura di prova più idonea da adottare attraverso lo sviluppo di *ciclogrammi di prova* finalizzati al perseguimento degli obiettivi della ricerca. Questo intento deriva dal fatto che, le esperienze di testing effettuate in laboratorio (a cui si rimanda nel Cap. 5) su mock-di facciate continue attraverso *method statement* standardizzati in ambito americano o europeo, non riconducono le sollecitazioni esterne a variabili climatiche come quelle relative al cambiamento climatico. Riguardo a quest'ultimo aspetto, per approvare a livello prestazionale una facciata continua, deve essere sottoposta ad una sequenza standard di test rispetto protocolli normati UNI, AAMA e ASTM (Cfr. Cap. 5) e, come è noto, i test più comuni fanno riferimento al soddisfacimento di requisiti a perdite d'aria, infiltrazioni d'acqua e carichi strutturali.
Sebbene, l'innovazione tecnologica corrisponda all'applicazione di nuovi materiali nelle facciate continue, questa sembra non trovare riscontro in un aggiornamento della normativa in particolare in ambito della valutazione delle prestazioni mediante attività di testing.

Fig. 7.11. Nella pagina accanto, Mock-up installato nella camera di prova

Come più volte sottolineato nel percorso di tesi dottorale, le prestazioni nel corso della vita dei sistemi di facciata continua sono uno degli attuali argomenti cruciali da indagare nella ricerca e nella pratica delle facciate [Yalaz, et al., 2018], in quanto gli studi in letteratura riferiti alle prestazioni a lungo termine non sono limitati e scarsamente indagate [Ilter, et al., 2015]. Le soglie di raggiungimento prestazionale sono obbligate da limiti normativi e classificazioni standard e, una volta che il prodotto (intendendo la facciata continua) viene installato e garantito per condizione d'uso di circa 20 anni, le sue performance non vengono di nuovo testate per validare il funzionamento complessivo del sistema e verificare che la classe prestazionale ottenuta in precedenza sia ancora la stessa.
Difatti, sempre in riferimento alle esperienze di testing condotte presso la sezione TCLab, si è dimostrato che i carichi variabili ripetuti del vento e le condizioni climatiche sono i fattori più significativi che influenzano le caratteristiche prestazionali dei materiali che costituiscono questi tipi di sistemi. In aggiunta, viste le principali problematiche delle facciate continue quali perdite d'aria e infiltrazione all'acqua, si vuole validare, attraverso il test sul mock-up ipotizzato, le schede costruite nell'ambito dei degradi delle facciate continue, se queste sono sottoposte ad eventi estremi di cambiamento climatico.
Questa tematica è stata indagata e discussa nel V capitolo (a cui si rimanda per ribadire alcuni concetti fondamentali), in cui si mette in evidenza la necessità di strutturare un protocollo metodologico di prova sperimentale che tenga conto della misurazione delle prestazioni delle facciate continue rispetto a specifiche sollecitazioni ambientali.

Pertanto, l'analisi sperimentale si spinge verso la verifica delle prestazioni del mock-up quando questo viene sottoposto agli effetti derivanti da eventi estremi di cambiamento climatico, che, come analizzato dallo stato dell'arte per la Regione del Mediterraneo, gli scenari di previsione climatica individuano l'intensificarsi di:
- *temperature estreme*: una maggiore radiazione solare che si traduce in livelli alti di temperatura superficiale esterna, combinata con la temperatura alta dell'aria esterna contribuisce all'intensificazione dei fenomeni di ondate e isole di calore;
- p*recipitazioni intense*: i cambiamenti dei modelli di precipitazione provocano fenomeni di inondazioni, bombe d'acqua e pluvial flooding;
- *vento estremo*: l'aumento della frequenza e dell'intensità degli eventi di vento forte aumenta il rischio di formazione di trombe d'aria e, se a questo impatto si aggiunge quello derivante dalle precipitazioni estreme, le conseguenze negative risultanti si verificano sotto forma di un altro tipo di eventi estremi quali gli uragani, Medicane per la Regione del Mediterraneo (Cfr. Cap. 2).

Per il mock-up da testare, significa verificare le prestazioni in relazione agli eventi estremi sopra riportati, in quanto questi possono incidere sul decadimento prestazionale, nello specifico:
- *temperature estreme*: possono provocare deformazioni termiche che causano malfunzionamenti in sigillanti, guarnizioni, causando perdite d'aria con possibile verifica di fenomeni di condensa;
- *precipitazioni intense*: possono provocare infiltrazioni d'acqua all'interno del mock-up e aumentare il numero di volte in cui i diversi componenti del mock-up quali, lastre di vetro e giunti possono subire bagnatura e essiccazione e aumentare così la penetrazione del gelo;
- *vento estremo*: potrebbe accelerare i meccanismi di danneggiamento, come lesioni o rotture, incidendo sulla diminuzione del livello prestazionale dei materiali e strutturale complessivo del mock-up, soprattutto se il carico da vento è in combinazione con una maggiore quantità e intensità di pioggia.

È su queste basi che viene strutturato il *protocollo metodologico* di prova per la verifica spe-

rimentale sul mock-up di facciata continua a cellula, inteso come ciclogramma di prova aggiornato in grado di leggere, in modo dinamico, le performance del mock-up analizzato associando i requisiti prestazionali all'evento estremo di cambiamento climatico della Regione del Mediterraneo. Trattandosi di un'attività sperimentale, la sequenza individuata delle prove che sono state effettuate sul mock-up è stata strutturata in concerto con il team della sezione TCLab e gli ingegneri e il manager dell'Azienda Cianciolo Group s.r.l.
Il paragrafo che segue presenta il protocollo metodologico che riporta la procedura di prova sviluppata su misura per il mock-up.

7.4 Il protocollo metodologico e sperimentale su 'misura' per il mock-up

Nell'ambito di questa ricerca, la definizione della procedura di prova proposta intende fornire informazioni sulle prestazioni del mock-up nelle condizioni di cambiamento climatico per la Regione del Mediterraneo.
L'obiettivo del protocollo metodologico, che rappresenta uno degli *output* della ricerca, è quindi quello di garantire una nuova lettura delle prestazioni del mock-up associando all'evento estremo di cambiamento climatico, la relativa procedura di prova.
Questo approccio vuole gettare le basi per la proposizione di nuove procedure di prove che possano descrivere in modo dinamico e reale le prestazioni delle facciate continue sollecitate da condizioni esterne variabili e sempre più intense. Quindi, una metodologia replicabile che consente di validare e, nell'ipotesi certificare il comportamento funzionale dei sistemi di facciata a lungo termine nell'ambito del cambiamento climatico, soprattutto per aree sensibili come quella del Mediterraneo.
Entrando nello specifico, i ciclogrammi di prova sono stati effettuati secondo una duplice modalità operativa che confluiscono nella sequenza strutturata delle procedure di testing del protocollo metodologico:
- in primo luogo, si applicano i *method statement standard* in riferimento alle norme in ambito americano per la determinazione delle prestazioni delle facciate continue, seguendo step rigorosi e eventualmente certificabili;
- in secondo luogo, attraverso azioni di carattere specificatamente sperimentale con *prove aggiuntive e sequenza di prova aggiuntiva*, ovvero azioni di testing che seguono le modalità di analisi e ricerca che hanno condotto l'individuazione di problematiche delle facciate continue rispetto a fenomeni di cambiamento climatico per la Regione del Mediterraneo.

Pertanto, in conformità ai method statement standard e in accordo allo scenario degli eventi estremi di cambiamento climatico per la Regione del Mediterraneo, il mock-up è stato studiato simulando le seguenti sollecitazioni esterne:
- *temperature estreme*: per simulare il fenomeno di ondate e isole di calore, la sperimentazione è stata effettuata sollecitando il mock-up a temperature ambientali elevate;
- *precipitazioni intense*: per simulare bombe d'acqua e pluvial flooding, la sperimentazione è stata effettuata mediante la riproduzione di un flusso d'acqua sulla facciata esterna del mock-up attraverso l'impianto sprinkler con ugelli calibrati. Sono state eseguite due simulazioni del getto d'acqua: la prima, in condizioni di assenza di vento ed esercitando una pressione positiva/negativa sulla facciata e la seconda simulazione effettuata in presenza di vento riprodotto con il ventilatore che arriva a simulare la presenza di un uragano;
- *vento estremo*: per simulare le diverse intensità del carico da vento, la sperimentazione è stata effettuata simulando un flusso di vento, secondo tre step: il primo riferito ad una leggera pressione di vento, il secondo in condizioni di servizio e il terzo in condizioni di sicurezza al fine di verificare il comportamento del mock-up ad una forte pressione.
Rispetto gli eventi estremi da simulare sul mock-up, il protocollo metodologico è strutturato secondo la seguente procedura di prova proposta:

PROTOCOLLO METODOLOGICO E SPERIMENTALE DI PROVA			
Fasi sperimentali	Evento estremo di cambiamento climatico	Metodologia di prova adottata	Limiti di accettazione dei risultati
I fase (aggiuntiva rispetto procedure standard)			
	Temperature estreme: a: stress agenti ambientali	Registrazione temperature e umidità nei 25 giorni dopo l'installazione	Nessun danno visibile o cambiamento materico
II fase (aggiuntiva rispetto procedure standard)			
Prova n°1	Vento estremo: b: stress - bassa pressione	Precarico: ASTM E330-02:2010 (1245 Pa)	Nessun risultato richiesto
Prova n°2	Vento estremo: c: stress - bassa pressione	Infiltrazioni all'aria: ASTM E 283-04:2012 (150 Pa)	0,06 cfm/sq.ft (uguale a 1,07 $m^3/h*m^2$)
Prova n°3	Precipitazioni intense: d: stress - assenza di vento	Tenuta all'acqua in regime statico: ASTME331-00:2009 (400 pa)	Nessuna infiltrazione d'acqua incontrollata
Prova n°4	Precipitazioni intense: e: stress - presenza di vento	Tenuta all'acqua in regime dinamico: AAMA 501.1-05-00:2007 (48,28 km/h)	Nessuna infiltrazione d'acqua incontrollata
III fase (procedura di prova standard con prove aggiuntive)			
(aggiuntiva)	Temperature estreme: f: stress agenti ambientali	Registrazione temperature e umidità nei 10 giorni dopo la II fase sperimentale	Nessun danno visibile o cambiamento materico
Prova n°5	Vento estremo: 1° Step: media pressione	Infiltrazioni all'aria: ASTM E 283-04:2012 (300 Pa)	0,06 cfm/sq.ft (uguale a 1,07 $m^3/h*m^2$)
Prova n°6	Precipitazioni intense: 1° Step: assenza di vento	Tenuta all'acqua in regime statico: ASTME331-00:2009 (720 Pa)	Nessuna infiltrazione d'acqua incontrollata
Prova n°7	Precipitazioni intense: 2° Step: presenza di vento	Tenuta all'acqua in regime dinamico: AAMA 501.1-05-00:2007 (110 km/h)	Nessuna infiltrazione d'acqua incontrollata
Prova n°8 (aggiuntiva)	Vento estremo: 2° Step: alta pressione	Resistenza al carico da vento (carico di progetto): ASTM E 330-02:2010 (1242 Pa–2490 Pa)	Nessuna rottura delle lastre di vetro o deformazioni > a L/500 (limite richiesto dagli ing. dell'Az. Cianciolo)
Prova n°9	Vento estremo: 1° Step: media pressione	Ripetizione infiltrazioni all'aria: ASTM E 283-04:2012 (300 Pa)	0,06 cfm/sq.ft (uguale a 1,07 $m^3/h*m^2$)
Prova n°10	Precipitazioni intense: 1° Step: assenza di vento	Ripetizione tenuta all'acqua in regime statico: ASTME331-00:2009 (720 Pa)	Nessuna infiltrazione d'acqua incontrollata
Prova n°11	Precipitazioni intense: 2° Step: presenza di vento	Ripetizione tenuta all'acqua in regime dinamico: AAMA 501.1-05-00:2007 (110 km/h)	Nessuna infiltrazione d'acqua incontrollata
Prova n°12 (aggiuntiva)	Vento estremo: 3° Step: forte pressione	Resistenza al carico da vento (carico di sicurezza): ASTM E 330-02:2010 (1867 Pa – 3735 Pa)	Nessuna rottura delle lastre di vetro o deformazioni > a L/500 (limite richiesto dagli ing. dell'Az. Cianciolo)
IV fase (aggiuntiva rispetto procedure standard)			
(aggiuntiva)	Temperature estreme: g: stress termico	Registrazione temperature e umidità nei 2 giorni dopo la III fase sperimentale	Nessun danno visibile o cambiamento materico
Prova n°13 (aggiuntiva)	Temperature estreme: Cicli differenziali di temperatura	Cicli termici: AAMA 501.5:2007 (3 cicli termici 80°C/-15°C)	Nessun danno permanente dovuto a espansione e contrazione
V fase (aggiuntiva rispetto procedure standard)			
	'Riposo' del mock-up per 1 giorno	Nessun test effettuato prima di procedere alla ripetizione della sequenza di prova da n°9 a 12	Nessun risultato richiesto
Prova n°14	Vento estremo: 1° Step: media pressione	Ripetizione infiltrazioni all'aria: ASTM E 283-04:2012 (300 Pa)	0,06 cfm/sq.ft (uguale a 1,07 $m^3/h*m^2$)
Prova n°15	Precipitazioni intense: 1° Step: assenza di vento	Ripetizione tenuta all'acqua in regime statico: ASTME331-00:2009 (720 Pa)	Nessuna infiltrazione d'acqua incontrollata
Prova n°16 (aggiuntiva)	Precipitazioni intense: 2° Step: presenza di vento	Ripetizione tenuta all'acqua in regime dinamico: AAMA 501.1-05-00:2007 (110 km/h)	Nessuna infiltrazione d'acqua incontrollata
Prova n°17 (aggiuntiva)	Vento estremo: 3° Step: forte pressione	Resistenza al carico da vento (carico di sicurezza): ASTM E 330-02:2010 (1867 Pa – 3735 Pa)	Nessuna rottura delle lastre di vetro o deformazioni > a L/500 (limite richiesto dagli ing. dell'Az. Cianciolo)

Come si evince dalla tabella, per tentare di valutare le prestazioni a lungo termine del mock-up sottoposto ad eventi estremi di cambiamento climatico, si è proceduto a stressare il mock-up prima di svolgere la sequenza di prove standard.
Per questi motivi, il protocollo metodologico e sperimentale può essere considerato come un'estensione della procedura di prova standard che, oltre a contenere test obbligatori come la valutazione delle perdite d'aria e infiltrazioni all'acqua, prevede test aggiuntivi come il carico dinamico del vento e i cicli termici al fine di simulare i cambiamenti climatici e mostrare il comportamento prestazionale del mock-up.
Questa modalità di approccio al testing è dettata proprio dalla flessibilità del protocollo, ideato e strutturato sulla base che le facciate continue devono garantire il loro funzionamento in risposta a condizioni climatiche estreme.

Nello specifico, le attività di testing, condotte nel periodo estivo, tra luglio e agosto 2022, sono state caratterizzate da 5 fasi sperimentali:
- *I fase*: questa condizione è stata simulata proprio per avvalorare le problematiche che le sollecitazioni esterne possono causare sul mock-up; in particolare ci si riferisce allo stress termico che potrebbe causare guasti ai giunti o alle sigillature, visto che le sequenze di prove sul mock-up sono state condotte nel periodo estivo.
Per validare questa fase, si è costruito un diario giornaliero, in cui riportare la temperatura e l'umidità relativa dell'aria esterna. Si vuole mettere in evidenza che, in alcuni giorni di luglio si sono registrate temperature intorno ai 30°C con un'umidità relativa intorno al 65%.
Questa fase è stata condotta per i 25 giorni dopo l'installazione. Questa fase viene qui considerata aggiuntiva in quanto non è prevista da procedure standard;

- *II fase*: il mock-up è stato soggetto a condizioni di stress di vento estremo, applicando una bassa pressione di sollecitazione e di precipitazioni intense sottoponendolo a flussi d'acqua, in modo tale da verificare eventuali infiltrazioni d'acqua e perdite d'aria.
Si vuole precisare che, in questa sequenza di prove, il mock-up è stato sollecitato a pressioni di prova e velocità del vento più basse rispetto a quelle stabilite per la III fase sperimentale (di cui si darà specifica successivamente).
Difatti, la sequenza di prova da 1-4 rappresenta con la I fase sperimentale le condizioni ex ante necessarie per ipotizzare e quindi validare le prestazioni a lungo termine del mock-up sottoposto a sollecitazioni ambientali esterne. Sebbene la sequenza di prova da 1-4 sia validata come procedura standard, qui la II fase viene considerata aggiuntiva in quanto non è prevista in un method statement standard;

- *III fase*: condotta dopo 10 giorni dalla fase precedente, ipotizzando ancora una volta il mock-up soggetto a temperature alte in condizioni di esercizio. Nei 10 giorni, sono state registrate temperature che superavano i 35°C con un'umidità relativa intorno al 72%.
La sequenza di prova 5-12 rispecchia la sequenza di prove standard in ambito americano per la verifica delle prestazioni delle facciate continue, in particolare per permeabilità all'aria, tenuta all'acqua (in regime statico e dinamico), la prova aggiuntiva del carico da vento e le ripetizioni per validare le prestazioni raggiunte. Si precisa che per questa sequenza di prove, il mock-up è stato sollecitato con pressioni di prova e velocità del vento più alte rispetto a quelle stabilite per la II fase sperimentale.
Questa scelta ha l'obiettivo di studiare il comportamento prestazionale del mock-up sollecitandolo con diverse pressioni e velocità del vento e deriva dal fatto che, nelle condizioni di vita utile-di esercizio del mock-up sarà sottoposto a differenti carichi e sollecitazioni ambientali;

- *IV fase*: nella penultima fase sperimentale, il mock-up è stato sottoposto ad un ulteriore

stress termico utilizzando la camera termica (80°C, - 15°C, con 3 cicli da 8 ore) per testare il suo comportamento alle temperature estreme. Sebbene, questa fase sia in sequenza rispetto la procedura di prova della III fase sperimentale, si vuole sottolineare che, nell'ambito dei ciclogrammi di prova normati in ambito americano, questa prova non viene considerata obbligatoria per certificare la prestazione termica delle facciate continue.
Il protocollo metodologico ha previsto in aggiunta questa prova, al fine di validare le condizioni di performance a lungo termine del mock-up, considerandola come test necessario per gli obiettivi della sperimentazione. Difatti, attraverso questo test, si vuole valutare possibili effetti dannosi derivanti dai cicli termici della facciata esterna del mock-up, in riferimento a perdite d'aria e infiltrazioni d'acqua, determinate nella fase successiva;

- *V fase*: la scelta di effettuare altri test sul mock-up, dopo averlo stressato ad un range di temperature elevate risiede nell'obiettivo di analizzare in termini reali le sue prestazioni ad impatti di cambiamento climatico, che saranno sempre più frequenti e intensi.
In questa ultima fase sperimentale, la ripetizione della sequenza delle prove 9-12 (aggiuntiva rispetto a procedure standard) attraverso la simulazione di un ulteriore sollecitazione ai fenomeni di precipitazioni intense e carico da vento contribuiscono alla verifica prestazionale del mock-up in riferimento alla sua capacità di mantenere e gestire le sue caratteristiche performanti e adattive agli impatti da eventi estremi.
Si vuole precisare che la norma sui cicli termici AAMA 501.5:2007 prevede che dopo lo stress termico, siano ripetuti i test di infiltrazione all'aria e tenuta all'acqua in regime statico. Tuttavia, per gli obiettivi della sperimentazione, oltre a queste due prove, sono stati condotti anche i test di tenuta all'acqua in regime dinamico e il carico da vento, considerandoli entrambi prove aggiuntive.

La trattazione che segue presenta la fase di verifica mediante l'esplicitazione dei risultati ottenuti dalla fase sperimentale.

7.5 L'applicazione del protocollo metodologico e sperimentale: La misurazione 'reale' delle performance del mock-up (in regime di cambiamento climatico per l'Area Mediterranea)

Definita la metodologia di prova, attraverso la costruzione del protocollo metodologico e sperimentale, si riportano le attività di testing che supportano la fase di verifica delle prestazioni del mock-up. Nello specifico, per ogni fase sperimentale, vengono descritte le prove condotte sul mock-up e i risultati ottenuti.

I fase
Per la specifica della I fase, è stato associato come evento di cambiamento climatico, le temperature estreme.
Come specificato sopra, questa fase non è supportata da specifiche normative di riferimento, ma si è resa necessaria a valle delle analisi condotte sui degradi delle facciate continue (Cfr. Cap. 5) causate da uno stress derivante da temperature estreme.
In particolare, si vuole verificare se, dopo la fase d'installazione, il mock-up, potesse subire dei malfunzionamenti negli elementi di tenuta quali sigillanti e guarnizioni. (Si specifica che non viene considerato il fenomeno di invecchiamento dei materiali per le tempistiche dettate dalla ricerca stessa).
Difatti, in questa I fase di verifica sperimentale che viene anche considerata come step di assestamento del mock-up nella camera di prova, il mock-up si simula in condizioni di esercizio per un tempo pari a 25 giorni consecutivi, sottoponendolo a temperature e umidità relativa ambientali che vengono giornalmente registrate.

Il prospetto indica che in alcuni giorni di luglio si sono registrate temperature intorno ai 30°C con un'umidità relativa intorno al 65%. Questa prova è stata considerata di tipo visivo, poiché non si caratterizza da misurazioni effettive utilizzando specifica strumentazione.
A conclusione dei giorni stabiliti, l'ispezione visiva condotta sul mock-up non ha evidenziato particolari problematiche sugli elementi di tenuta e sulle sigillature tra il mock-up e la camera di prova. Al contempo, si è notato che la temperatura superficiale delle porzioni opache costituite dai pannelli in GFRC di colore scuro fosse elevata rispetto alla temperatura ambientale esterna. Difatti, attraverso l'utilizzo di una termo-camera, si è ritenuto necessario misurare la temperatura dei pannelli di colore scuro. Con una temperatura ambientale di 32°C rilevata alle ore 14:00, la temperatura sui pannelli è risultata essere pari 38°C.
Sebbene, i pannelli in GFRC sono ad una distanza pari a 50 mm dal telaio della cellula e costituiscono quindi un'intercapedine d'aria ventilato, la temperatura rilevata su queste superfici, potrebbe essere considerata come un indicatore di amplificazione degli impatti (Cfr. Cap. 3) quali isole e ondata di calore, in quanto la temperatura ambientale potrebbe aumentare a causa della presenza di questi elementi di finitura a cui si combina l'aumento dell'umidità dell'aria esterna. L'amplificazione degli impatti declinata nella presente ricerca in '*Building envelope versus Climate change*', può essere qui validata, con particolare attenzione al controllo del flusso termico, che per il mock-up determina un aumento della temperatura superficiale degli elementi in GFRC per irraggiamento solare diretto che è maggiore rispetto alla temperatura dell'aria esterna. Attraverso questa I fase, si può evidenziare un primo risultato di verifica prestazionale del mock-up, che denuncia una possibile variazione del materiale dei pannelli opachi, per evitare il possibile rischio di fenomeni indesiderati causati dalla variabile climatica della temperatura.

II fase
La II fase, iniziata 25 giorni dopo rispetto la I fase in cui il mock-up si è specificato essere in condizioni di stress termico ambientale, è caratterizzata da una serie di prove effettuate seguendo procedure normate in ambito americano, al fine di testare le prestazioni del mock-up, quando questo viene sottoposto a condizioni di vento (bassa pressione) e a fenomeni di precipitazioni sia in assenza che in presenza di vento.
Sebbene questa sequenza di prove non viene presa in considerazione nei method statement standard come sequenza obbligatoria da rispettare per la verifica prestazionale delle facciate continue, questa attività, per la fase di verifica sperimentale, ha l'obiettivo di simulare e mettere quindi in condizioni di stress il mock-up, prima della III fase, considerata come sequenza di prova canonica rispetto alla normativa americana di riferimento.
La rilevanza di questa II fase è dettata dal fatto che le prestazioni del mock-up devono essere studiate in condizioni di sollecitazioni di cambiamento climatico che variano nel tempo e che caratterizzano, in termini di durabilità e in un'ottica di adaptive e climate resilient, le prestazioni a lungo termine del mock-up stesso.
Qui di seguito, si riporta la sequenza di prova (in ordine cronologico) effettuata sul mock-up.

Prova n. 1) Precarico
Il test è stato eseguito in conformità alla procedura di prova definita dallo standard ASTM E330-02:2010. Il mock-up è stato sollecitato ad una pressione differenziale positiva e negativa pari al 50% del carico di vento previsto, pari a 26 psf 1245 pa.
Questo test, che precede la sequenza di prove, ha la sola funzione di assestare gli elementi di tenuta delle cellule che costituiscono il mock-up, come i giunti e le guarnizioni.

Prova n. 2) Infiltrazioni all'aria
La simulazione del flusso d'aria è stata condotta attraverso il test seguendo la specifica

normativa ASTM E 283-04:2012. La prova consiste nella misurazione della permeabilità all'aria del mock-up, verificando l'insorgenza di perdite d'aria quando è sottoposto a pressioni differenziali positive/negative. In questo caso, si è concordato di effettuare il test ad una bassa pressione di vento pari a 150 Pa (3,13 psf).
La prova si è articolata secondo tre step differenti, ognuno dei quali secondo la medesima sequenza di seguito riportata: si è proceduto con la misurazione della permeabilità all'aria della camera di prova, sottoponendo quindi il mock-up a pressioni differenziali positive definite dopo la totale sigillatura degli elementi di tenuta, ovvero i giunti; successivamente, dopo aver rimosso completamente la sigillatura, si è proseguito con la misurazione della permeabilità complessiva del mock-up e della camera di prova. L'ultimo step è consistito nella determinazione della permeabilità del mock-up e della camera di prova.
- *Pressione positiva*: I parametri ambientali del laboratorio registrati durante la prova a pressione positiva sono stati: Temperatura (24,7°C), Umidità relativa (55,1%) e Pressione atmosferica (100,1 kPa). La permeabilità all'aria a pressione positiva del mock-up è risultata pari a 0,0041 CFM x ft2, inferiore al limite indicato nelle specifiche normative pari a 0,06 CFMx ft^2.
- *Pressione negativa*: I parametri ambientali del laboratorio registrati durante la prova a pressione positiva sono stati: Temperatura (27,8°C), Umidità relativa (56,1%) e Pressione atmosferica (100,11 kPa). La permeabilità all'aria a pressione negativa applicata sul mock-up è risultata pari a 0,0028 CFM x ft^2, inferiore al limite indicato nelle specifiche normative pari a 0,06 CFM x ft^2.
Per una lettura più specifica, in tabella [Tab. 1] sono riportati i risultati di prova ottenuti.

Risultati test n°2	Pressioni di prova	Infiltrazioni d'aria		
	Pa-psf	m^3/h	CFM	CFMxft^2
Pressione	150 Pa - 3,13	5,4	0,0032	0,06
Depressione	150 Pa - 3,13	3,2	0,0019	0,06

Tab. 1. Valori riferiti alla prova di permeabilità all'aria con pressione di prova a 150 Pa. Estrapolazione dati a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

A queste pressioni di prova (positive e negative) stabilite che rappresentano un flusso di vento a bassa pressione, il mock-up non ha evidenziato particolari perdite da mettere a rischio le prestazioni complessive del sistema.

Prova n. 3) Tenuta all'acqua in regime statico
Questa prova fa riferimento alla misurazione delle prestazioni del mock-up con una simulazione della precipitazione in condizioni di assenza di vento. La prova è stata eseguita in conformità alla norma ASTM E 331-00:2009.
Sulla facciata esterna è stata erogata una quantità d'acqua costante e una contemporanea applicazione di una pressione positiva di prova a condizioni di seguito definite, durante la quale devono essere registrate eventuali infiltrazioni di acqua. L'erogazione del flusso d'acqua è stata eseguita alla pressione statica di 400 Pa (8,35 psf) per un tempo pari a 15 minuti. La quantità d'acqua fissata da normativa a 3.4 l/min m2 è stata erogata attraverso la griglia di sprinkler con ugelli calibrati posizionata parallelamente al piano della facciata esterna del mock-up.
I parametri ambientali del laboratorio registrati durante questa prova sono stati: Temperatura (27,7°C), Umidità relativa (63,5%) e Pressione atmosferica (100,07 kPa).
La prova si è conclusa al settimo minuto di erogazione della quantità d'acqua, poiché è stata individuata un'infiltrazione proveniente dal collegamento inferiore della cellula n. 1 e da quello superiore della cellula n. 4 (Cfr. Cap. 6). L'ispezione ha infatti rilevato un piccolo foro nel sigillante siliconico, che ha provocato l'infiltrazione d'acqua all'interno del sistema.

La funzione di tenuta all'acqua del sigillante siliconico è venuta meno in quanto il foro che si è creato è la conseguenza diretta della non adeguata posa in opera degli elementi di tenuta o di un non avvenuto corretto indurimento del sigillante.
I guasti nella sigillatura con effetti di perdita nelle prestazioni del mock-up, determinano un maggiore controllo nell'installazione per gestire un flusso d'acqua indesiderato che, se non risolto, potrebbe comportare un degrado ai materiali che costituiscono il telaio della cellula. Il guasto è stato corretto mediante l'applicazione di un ulteriore strato di silicone tra i telai della cellula inferiore e superiore.

Prova n. 4) Tenuta all'acqua in regime dinamico
Rispetto alla prova precedente, la simulazione della precipitazione avviene in condizioni dinamiche e quindi, in presenza di una pressione del vento.
Il test è stato eseguito in riferimento alla norma AAMA 501.1-05-00:2007 e consiste nell'erogazione di una quantità d'acqua costante e uniforme sulla superficie esterna del mock-up e nella contemporanea applicazione di una pressione dinamica, durante la quale vengono registrate eventuali infiltrazioni di acqua.
I parametri ambientali del laboratorio registrati durante questa prova sono stati: Temperatura (28,3°C), Umidità relativa (59,5%) e Pressione atmosferica (101,14 kPa).
Entrando nello specifico della prova, al costante flusso d'acqua (erogato tramite impianto sprinkler con ugelli calibrati) viene aggiunta la velocità del vento generata dal ventilatore. La velocità del vento è stata stabilita di 30 mph (48,28 km/h) per un tempo pari a 15 minuti. Al termine dei 15 minuti, è stata constatata un'infiltrazione di acqua tra la prima cellula inferiore e la trave verticale sinistra in acciaio che costituisce la struttura portante e il perimetro del mock-up (descritto precedentemente).
In questo caso, la problematica può essere dovuta ad un malfunzionamento dei giunti di dilatazione (che oltre a caratterizzare la tenuta all'aria e all'acqua, devono garantire un minimo movimento del sistema) tra la cellula e la trave. In aggiunta, da un'attenta ispezione salendo al terzo piano all'interno della camera di prova, è stata individuata una porzione del telaio della quinta cellula bagnata. Il filo d'acqua dal telaio superiore a quello inferiore si è ipotizzato essere causato da un difetto della guarnizione di tenuta del sistema di drenaggio tra la quinta e la sesta cellula; la guarnizione, difatti, non tagliata correttamente, potrebbe non aver garantito il corretto allontanamento dell'acqua nella parte esterna del mock-up, causando di conseguenza una bagnatura del giunto tra le due cellule.
In aggiunta, il vortice di pioggia e vento che si è creato nell'angolo tra la superficie trasparente e i pannelli opachi sporgenti in GFRC potrebbe aver innescato l'infiltrazione dell'acqua all'interno del sistema sebbene i pannelli presentino un adeguato scolo delle acque da precipitazione. Per correggere i guasti individuati e evitare il ripetersi di eventuali infiltrazioni, è stata applicata guaina espandente nello spazio corrispondente al giunto delle due cellule e chiuso mediante sigillante siliconico.
Questa prova ha messo in evidenza che ad una bassa velocità del vento, il mock-up è stato caratterizzato da deficit prestazionali, i cui danni potrebbero amplificarsi se le guarnizioni non sono correttamente posizionate e sigillate.

III fase
La III fase sperimentale rappresenta una procedura di prove completa per la verifica prestazionale del mock-up, in cui si simulano le sollecitazioni riferite a precipitazioni intense e carico da vento. Questa fase è iniziata 10 giorni dopo rispetto la conclusione della fase precedente, per sottoporre di nuovo il mock-up a sollecitazioni climatiche ambientali come la temperatura dell'aria, definita come uno stress climatico nelle reali condizioni di esercizio del mock-up. Nei 10 giorni, come già descritto, sono state registrate temperature dell'aria che superavano i 35°C con un'umidità relativa intorno al 72%.

Dopo aver controllato (tramite ispezione visiva sia all'esterno del mock-up che all'interno) giunti, guarnizioni e sigillature e aver constatato nessun difetto, si è proceduto ad effettuare la sequenza di prova (nel protocollo metodologico i test corrispondono dal n°5 al n°12). Come detto precedentemente, le procedure delle prove effettuate sono le stesse (infiltrazioni d'aria e tenuta all'acqua in regime statico e dinamico) della II fase sperimentale con l'aggiunta del test per verificare la prestazione del mock-up al carico da vento in condizioni di esercizio e di sicurezza e la ripetizione delle prove all'aria e all'acqua per validare le prestazioni ottenute.
Tuttavia, le pressioni di prova e le velocità rispetto ai carichi da vento sono state stabilite a livelli più alti rispetto i test condotti nella fase precedente, proprio per analizzare il mock-up dal punto di vista del suo comportamento adattivo a differenti intensità di sollecitazioni ambientali di cambiamento climatico, riferite a precipitazioni intense e vento estremo. Come per la II fase, di seguito, sono riportate le attività di testing (5-12) riferite alla sequenza di prova condotte sul mock-up.
(Per semplicità di esposizione e per evitare ripetizioni, le procedure di prova rispetto a infiltrazioni all'aria e tenuta all'acqua in regime statico e dinamico si intendono assodate).

Prova n. 5) Infiltrazioni all'aria
La prova per la determinazione di eventuali perdite d'aria, è stata condotta seguendo la procedura normata ASTM E 283-04:2012 e secondo l'articolazione dei tre step differenti (discussi al punto della prova 2). Il mock-up è stato sollecitato da pressioni di prova positive e negative pari a 300 Pa (6,24 psf, quindi il doppio rispetto il medesimo test condotto nella II fase sperimentale di pressione pari a 150 Pa-3,13 psf). La figura sottostante riporta l'assetto sperimentale del mock-up sottoposto a prova [Fig.7.12].



Fig. 7.12. Assetto sperimentale del mock-up sottoposto a prova di permeabilità all'aria

- *Pressione positiva*: I parametri ambientali del laboratorio registrati durante la prova a pressione positiva sono stati: Temperatura (25,7°C), Umidità relativa (54,3%) e Pressione atmosferica (100,29 kPa). La permeabilità all'aria a pressione positiva del mock-up è risultata pari a 0,0041 CFM x ft^2, inferiore al limite indicato nelle specifiche normative pari a 0,06 CFM x ft^2.
- *Pressione negativa*: I parametri ambientali del laboratorio registrati durante la prova a pressione negativa sono stati: Temperatura (26,4°C), Umidità relativa (53,6%) e Pressione atmosferica (101,13 kPa). La permeabilità all'aria a pressione negativa applicata sul mock-up è risultata pari a 0,0028 CFM x ft^2, inferiore al limite indicato nelle specifiche normative pari a 0,06 CFM x ft^2.
Per una lettura più specifica, in tabella [Tab. 2] sono riportati i risultati di prova ottenuti.

Risultati test n°5	Pressioni di prova	Infiltrazioni d'aria		
	Pa-psf	m^3/h	CFM	CFMxft^2
Pressione	300 Pa - 6,24	3,6	0,0041	0,06
Depressione	300 Pa - 6,24	2,5	0,0028	0,06

Tab. 2. Valori riferiti alla prova di permeabilità all'aria con pressione di prova a 300 Pa. Estrapolazione dati a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Come si evince dai valori riportati, il mock-up ha avuto un comportamento positivo e flessibile rispetto la simulazione della sollecitazione del flusso di vento ad una media pressione.

Prova n. 6) Tenuta all'acqua in regime statico
Per simulare le precipitazioni intense in condizioni di assenza di vento, il test è stato eseguito in conformità alla norma
ASTM E 331-00:2009. Il mock-up è stato sottoposto ad un'erogazione del flusso d'acqua per un tempo pari a 15 minuti ad una pressione di prova stabilita a 720 Pa (15 psf) di valore maggiore rispetto ai 400 Pa (8,35 psf) della prova svolta nella II fase sperimentale.
I parametri ambientali del laboratorio registrati durante questa prova sono stati: Temperatura (28,3°C), Umidità relativa (52,4%) e Pressione atmosferica (100,09 kPa).
Al 15° minuto, è stata identificata sul perimetro esterno appena sotto il giunto centrale della cellula, nello specifico tra il collegamento tra del telaio della cellula e la trave portante perimetrale. Sebbene, una differenza di pressione può spingere l'acqua attraverso qualsiasi piccola via di fuga, la causa dell'infiltrazione è derivata da una adesione non adeguata del sigillante, compromettendo la tenuta all'acqua del sistema. La perdita è stata riparata con l'applicazione di un nuovo strato di sigillante, dopo aver asciugato la zona per evitare che il silicone non aderisse bene con la conseguenza di determinare un'ulteriore perdita.
Attraverso questa prova, si può dedurre che il mock-up in condizioni di precipitazioni di media intensità e senza carico da vento, dimostra un basso livello di capacità di risposta adattiva.

Prova n. 7) Tenuta all'acqua in regime dinamico
La simulazione delle precipitazioni intense in condizioni di vento estremo, viene effettuata seguendo la procedura di prova AAMA 501.1-05-00:2007.
I parametri ambientali del laboratorio registrati durante questa prova sono stati: Temperatura (28,2°C), Umidità relativa (51,8%) e Pressione atmosferica (100,70 kPa).
Il mock-up è stato sottoposto al flusso d'acqua costante per un tempo pari a 15 minuti e con una velocità del vento stabilita a 68,46 mph (110 km/h) rispetto ai 30 mph (48,28 km/h) del medesimo test condotto nella fase precedente.
Le condizioni simulate in questa prova, potrebbero corrispondere ad un fenomeno di me-

dicane di media intensità [Fig. 7.13]. Tuttavia, il mock-up non ha presentato alcuna infiltrazione all'acqua, gestendo quindi positivamente questo evento estremo imposto.
La motivazione della risposta positiva prestazionale del mock-up deriva anche dalle correzioni effettuate durante le prove precedenti che hanno permesso di sigillare ulteriormente alcuni punti deboli del mock-up e, che hanno permesso al tempo stesso di evitare di danneggiare altre parti del sistema. Inoltre, la pressione generata dal ventilatore, posto ad una distanza di 400 mm dal mock-up (da normativa), fa disperdere il flusso d'acqua sulla facciata evitandone l'accumulo anche negli angoli che si creano tra i pannelli sporgenti in GFRC.
Ciò nonostante, il dilavamento di questa quantità d'acqua attraverso i pannelli in GFCR e il sistema di drenaggio delle varie cellule (che hanno il compito di allontanare l'acqua all'esterno del mock-up) potrebbe creare un innesco del fenomeno del pluvial flooding, determinando dei possibili problemi in termini di smaltimento delle acque da precipitazioni.
Attraverso questa prova, si intende esplicitare la questione derivante dalle analisi dello stato dell'arte, sull'amplificazione degli impatti di cambiamento climatico degli involucri edilizi, declinata nella presente ricerca in 'Building envelope *versus* Climate change'.
Sebbene il mock-up abbia risposto positivamente alla combinazione di precipitazione e vento, si vuole specificare che in un progetto di facciate continue, si deve tenere conto dell'assetto del contesto di ubicazione per il corretto smaltimento delle acque meteoriche, evitando l'accumulo indesiderato ed è inoltre necessario un adeguato sistema di drenaggio che può gestire un controllo del flusso d'acqua anche in condizioni estreme.



Fig. 7.13. Assetto sperimentale del mock-up sottoposto a prova di tenuta all'acqua in regime dinamico

Prova n. 8) Resistenza al carico da vento (carico di progetto)
La simulazione di un'alta intensità del carico da vento, è stata effettuata mediante la procedura di prova dettata dalla norma ASTM E 330-02:2010.
Il test consiste nell'applicazione di una pressione di prova positiva e negativa alla quale vengono effettuate misurazioni e controlli per verificare che sotto questi effetti, il mock-up presenti una deformazione ammissibile, conservando le caratteristiche prestazionali.
Per validare la prova, il mock-up non deve consentire alcuna rottura delle lastre di vetro o deformazioni superiori a L/500 (nessun elemento deve avere un assetto permanente superiore allo 0,2% della luce - limite restrittivo richiesto dagli ingegneri dell'Azienda Cianciolo).
La prova si articola in due step: il primo corrisponde alla valutazione della deformazione a pressione negativa e positiva al 50% del carico di progetto, mentre nel secondo step la deformazione è calcolata al 100% del carico del vento proiettato.
Per misurare le deformazioni sono stati stabiliti i punti del mock-up su cui applicare i sensori che leggono gli spostamenti durante questa prova. I punti scelti rappresentano le condizioni per caratterizzare la prestazione allo spostamento puntuale del mock-up.
Per maggiore chiarezza si riporta lo schema del posizionamento dei 12 sensori [Fig. 7.14].

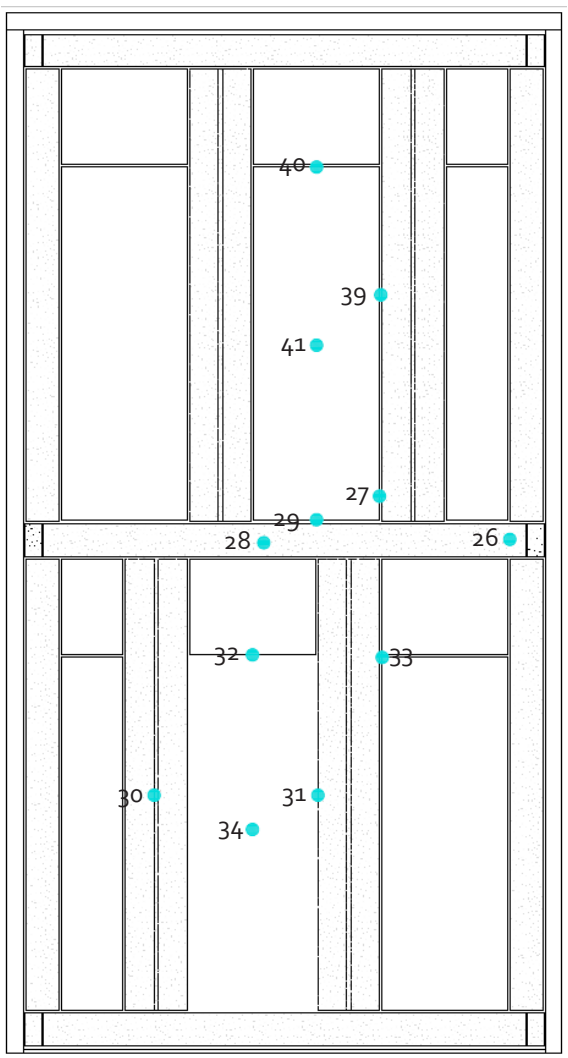


Fig. 7.14. Schema posizionamento sensori (vista interna)

I parametri ambientali del laboratorio registrati durante questa prova sono stati: Temperatura (27,9°C), Umidità relativa (61,08%) e Pressione atmosferica (100,39 kPa).
Dopo aver resettato i sensori per la misurazione degli spostamenti frontali, il mock-up è stato sottoposto a pressioni di prova crescenti a velocità non superiori a 100 Pa/s incrementalmente fino alla pressione di 1244 Pa (26 psf), che rappresenta il 50% del carico di progetto con registrazione al raggiungimento della pressione degli spostamenti frontali dei punti caratteristici del mock-up. Riportata la pressione a 0 Pa e attesa stabilizzazione, sono state misurate e registrate le deformazioni frontali residue.
La sequenza analoga è stata ripetuta per la pressione di prova pari a 2489 Pa (52 psf), che rappresenta il 100% del carico di progetto.
Nelle tabelle [Tabb. 4, 5], vengono riportati i soli valori puntuali (espresse in mm) delle deformazioni misurate dai singoli sensori a pressione positiva e pressione negativa.

Tab. 4. Deformazioni frontali rispetto i punti dei sensori a pressione positiva (unità di misura= mm). Estrapolazione dati a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Tab. 5. Deformazioni frontali rispetto i punti dei sensori a pressione negativa (unità di misura= mm). Estrapolazione dati a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Risultati test n° 8: Pressione positiva												
Sensori n°	26	27	28	29	30	31	32	33	34	39	40	41
Pressione positiva Pa												
1245	-6,43	-9,10	-7,74	-8,53	-14,01	-12,46	-9,29	-9,26	-15,05	-10,85	-4,35	-15,06
0	-0,40	-0,41	0,04	-0,32	-0,62	-0,46	-0,10	-0,12	-0,31	-0,22	-0,08	-0,71
2490	-21,12	-22,45	-18,94	-22,37	-32,07	-29,58	-24,86	-24,57	-34,82	-25,25	-16,99	-32,58
0	-1,45	-1,46	-1,00	-1,12	-2,05	-1,82	-1,46	-1,25	-1,90	-1,44	-0,94	-2,24

Risultati test n° 8: Pressione negativa												
Sensori n°	26	27	28	29	30	31	32	33	34	39	40	41
Pressione positiva Pa												
1245	5,07	6,46	7,82	7,15	12,16	13,55	9,37	10,04	16,16	10,46	5,36	16,74
0	0,27	0,31	0,34	0,31	0,53	0,58	0,10	0,13	0,34	0,22	0,12	0,76
2490	22,90	24,64	22,55	22,33	25,63	31,71	23,35	25,47	36,58	29,42	18,75	33,76
0	1,52	1,55	1,43	1,42	1,89	1,93	1,37	1,45	1,98	1,58	1,03	2,28

I risultati del test condotto in condizioni di vento di alta intensità dimostrano un comportamento alla deformazione accettabile del mock-up.
Conclusa la prova di deformazione con esito positivo, sono state ripetute le prove di infiltrazione all'aria e di tenuta all'acqua in regime statico e dinamico per confermare le prestazioni ottenute. Prima di procedere con i test, sono stati rimossi dal mock-up i pannelli di finitura in GFRC, per garantire una buona ispezione esterna per eventuali perdite d'aria e infiltrazioni all'acqua e verificare con più accuratezza, visti gli stress e le sollecitazioni simulate e subìte dal mock-up, le sigillature dei giunti, le guarnizioni e gli elementi di tenuta.

Prova n. 9) Ripetizione: Infiltrazioni all'aria
La ripetizione della prova per confermare le prestazioni alla permeabilità all'aria è stata eseguita secondo norma ASTM E 283-04:2012. La pressione di prova positiva e negativa rispetto alla quale il mock-up è stato sollecitato è pari a 300 Pa (6,24 psf).
- *Pressione positiva*: I parametri ambientali del laboratorio registrati durante la prova a pres-

sione positiva sono stati: Temperatura (27,6°C), Umidità relativa (69,1%) e Pressione atmosferica (100,58 kPa). La permeabilità all'aria a pressione positiva del mock-up è risultata pari a 0,014 CFM x ft^2, inferiore al limite indicato nelle specifiche normative pari a 0,06 CFM x ft^2.
- *Pressione negativa*: I parametri ambientali del laboratorio registrati durante la prova a pressione negativa sono stati: Temperatura (28,2°C), Umidità relativa (66,1%) e Pressione atmosferica (100,73 kPa). La permeabilità all'aria a pressione negativa applicata sul mock-up è risultata pari a 0,009 CFM x ft^2, inferiore al limite indicato nelle specifiche normative pari a 0,06 CFM x ft^2.
Per una lettura più specifica, in tabella [Tab. 6] sono riportati i risultati di prova ottenuti.

Risultati test n°9	Pressioni di prova	Infiltrazioni d'aria		
	Pa-psf	m^3/h	CFM	CFMxft^2
Pressione	300 Pa - 6,24	12,9	0,014	0,06
Depressione	300 Pa - 6,24	8,3	0,009	0,06

Tab. 6. Valori riferiti alla ripetizione della prova di permeabilità all'aria con pressione di prova a 300 Pa. Estrapolazione dati a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Come si evince dai valori riportati, il mock-up conferma una risposta positiva alla permeabilità all'aria, qui intensa come risposta adattiva alla sollecitazione di un flusso di vento ad una media pressione.

Prova n. 10) Ripetizione: Tenuta all'acqua in regime statico
Il test, eseguito in riferimento alla procedura normativa ASTM E 331-00:20, è stato condotto alla pressione stabilita di 720 Pa (15 psf), durante il quale è stato erogato un flusso d'acqua costante sulla facciata del mock-up per 15 minuti.
I parametri ambientali del laboratorio registrati durante questa prova sono stati: Temperatura (26,64°C), Umidità relativa (67,87%) e Pressione atmosferica (100,49 kPa).
La prova ha dato esito positivo [Fig. 7.15], in quanto non si sono verificate infiltrazioni d'acqua visibili, configurando un assetto adattivo del mock-up per le precipitazioni in assenza di vento imposte.



Fig. 7.15. Mock-up sottoposto a ripetizione di tenuta all'acqua in regime statico

Prova n. 11) Ripetizione: Tenuta all'acqua in regime dinamico
La ripetizione per confermare la prestazione del mock-up ad una sollecitazione combinata di precipitazioni e vento, è stata eseguita in linea alla procedura della norma AAMA 501.1-05-00:2007.
I parametri ambientali del laboratorio registrati durante questa prova sono stati: Temperatura (26,8°C), Umidità relativa (65,3%) e Pressione atmosferica (100,45 kPa).
Il test dinamico, condotto attraverso il ventilatore che genera una forte pressione sul mock-up ad una velocità del vento di 68,46 mph (110 km/h), non ha rilevato alcuna problematica significativa rispetto alle infiltrazioni d'acqua, per cui, si considera un funzionamento flessibile del mock-up rispetto alla sollecitazione di cambiamento climatico simulata, che potrebbe corrispondere ad un medicane (uragano) con velocità pari a 100 km/h.

Concluso in modo positivo - seppur con qualche deficit - lo step relativo alle ripetizioni delle prove (infiltrazioni d'aria, tenuta all'acqua in regime statico e dinamico), è stato effettuato sul mock-up, il test per la resistenza al vento in condizioni di sicurezza, che rappresenta l'ultima prova della sequenza stabilita per la III fase sperimentale.

Prova n. 12) Resistenza al carico da vento (carico di sicurezza)
Il test, condotto in conformità alla norma ASTM E 330-02:2010, è stato articolato in due step: il primo corrisponde alla valutazione della deformazione a pressione negativa e positiva al 75% del carico di progetto pari a 1867,5 Pa (39 psf), mentre nel secondo step la deformazione è calcolata al 150% del carico del vento proiettato, corrispondente a 3735 Pa (78 psf). Durante questa prova, il mock-up non deve consentire alcuna rottura delle lastre di vetro o deformazioni superiori a L/500 (nessun elemento deve avere un assetto permanente superiore allo 0,2% della luce).
I parametri ambientali del laboratorio registrati durante questa prova sono stati: Temperatura (27,91°C), Umidità relativa (61,08%) e Pressione atmosferica (100,39 kPa).
Nelle tabelle seguenti [Tabb. 7, 8], vengono riportati i soli valori puntuali delle deformazioni misurate dai singoli sensori a pressione positiva e pressione negativa.

Tab. 7. Deformazioni frontali rispetto i punti dei sensori a pressione positiva (carico di sicurezza; unità di misura= mm). Estrapolazione dati a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Tab. 8. Deformazioni frontali rispetto i punti dei sensori a pressione negativa (carico di sicurezza; unità di misura= mm). Estrapolazione dati a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Risultati test n° 12: Pressione positiva												
Sensori n°	26	27	28	29	30	31	32	33	34	39	40	41
Pressione positiva Pa												
1867	-10,96	-15,24	-9,84	-9,67	-23,97	-22,31	-15,52	-13,85	-27,00	-17,19	-13,02	-23,61
0	-0,49	-0,55	-0,43	-0,42	-1,73	-1,13	-0,60	-0,59	-2,24	-1,07	-0,45	-1,25
3735	-26,57	-28,24	-21,61	-26,60	-43,76	-43,21	-30,32	-28,05	-42,44	-29,32	-22,96	-41,73
0	-2,06	-2,09	-1,07	1,19	-2,71	-2,63	-2,15	-2,06	-3,61	-2,04	-1,33	-3,86

Risultati test n° 12: Pressione negativa												
Sensori n°	26	27	28	29	30	31	32	33	34	39	40	41
Pressione positiva Pa												
1867	10,52	13,89	10,63	10,76	21,95	20,84	15,07	14,48	26,19	18,16	14,78	23,82
0	0,62	0,85	0,55	0,61	1,54	1,49	0,68	0,64	2,06	1,23	0,53	1,31
3735	26,75	29,16	25,31	27,39	45,32	41,12	36,92	35,55	46,02	36,81	25,58	44,78
0	1,80	1,93	1,35	1,42	2,43	2,59	2,33	2,19	4,16	2,46	1,64	4,05

IV fase
Dopo due giorni di assestamento del mock-up, in cui si sono registrate temperature dell'aria intorno ai 36°C e i 37°C, si avvia la IV fase di sperimentazione che prevede la verifica delle prestazioni del mock-up simulando condizioni estreme di temperatura, mediante l'utilizzo della camera termica. Questa prova è stata aggiunta nella sequenza di prove previste nel protocollo metodologico, in quanto dagli scenari di previsione futuri delle temperature, come messo in evidenze dalle analisi dello stato dell'arte sul cambiamento climatico della Regione del Mediterraneo (Cfr. Cap. 3), si rileva un innalzamento della temperatura prolungamento nelle diverse stagioni dell'anno.
Si specifica che per validare gli effetti termici sul mock-up, deve essere stato sottoposto ai test sulla permeabilità all'aria e alla tenuta all'acqua. Il superamento di questo test, può essere considerato come una condizione necessaria e sufficiente al fine di validare le prestazioni a lungo termine del mock-up che, per la ricerca, significa mantenere un buon livello di risposta adattiva e flessibile (adaptive e climate resilient) alle sollecitazioni dovute agli eventi estremi di cambiamento climatico per la Regione del Mediterraneo.

Prova n. 13) Cicli termici
La prova è stata eseguita in conformità alla norma AAMA 501.5:2007. Il test consiste nel sollecitare il mock-up con cicli di temperatura differenziale positiva/negativa rispetto a quella ambientale. I cicli termici sono condotti per valutare la capacità del sistema a mantenere caratteristiche prestazionali accettabili dopo essere stato sottoposto a stress termici. Condizioni estreme che non possono essere ottenute mediante i tradizionali metodi di calcolo della radiazione infrarossa; tuttavia questo test consente di ottenere un'elevata temperatura dell'aria, e quindi di ottenere misurazioni reali del comportamento termico (temperature estreme) del mock-up.
I parametri ambientali del laboratorio registrati durante questa prova sono stati: Temperatura (24,51°C), Umidità relativa (65,06%) e Pressione atmosferica (100,03 kPa).
Entrando nello specifico della prova effettuata attraverso l'utilizzo della camera termica[33], che viene apposta sulla facciata esterna del mock-up, quest'ultimo è stato sottoposto a 3 cicli termici. Ogni ciclo termica ha la durata di 8 ore e consiste nel sollecitare la facciata esterna del mock-up da una temperatura variabile tra gli 80°C (alta temperatura) e i -15°C (bassa temperatura), mantenendo una temperatura costante interna di 24°C.
La temperatura elevata è ottenuta attraverso un sistema di 24 lampade ad infrarossi, da 120 kW totali, che scaldano il mock-up tramite irraggiamento, simulando così la radiazione solare. Il raffreddamento invece è raggiunto da un sistema di refrigerazione con aero-evaporatore della potenza frigorifera di 11 kW.
Prima dell'inizio del primo ciclo termico, la facciata esterna del mock-up viene pre-condizionata, per portarla ad una temperatura di 24°C e mantenuta per un'ora.
Effettuato il raffreddamento, inizia il primo ciclo termico, la cui durata è stata così mantenuta, in accordo alla normativa di riferimento:

a) durante la prima ora, la temperatura ambiente di 24°C è aumentata alle condizioni di temperatura stabilite di 80°C. Il riscaldamento è stato mantenuto per circa due ore;

b) inizio della discesa della temperatura da 80°C a 24°C in un'ora;

c) raggiungimento della temperatura da 24°C -15°C in un'ora e mantenimento del raffreddamento per circa due ore;

d) regolazione della temperatura di 24°C in un'ora.
Questo ciclo è stato ripetuto per 3 volte.

Il grafico [Fig. 7.16] riporta le fasi relative al raggiungimento del riscaldamento (80°C) e del raffreddamento (-15°C) nel periodo di tempo di 8 ore.

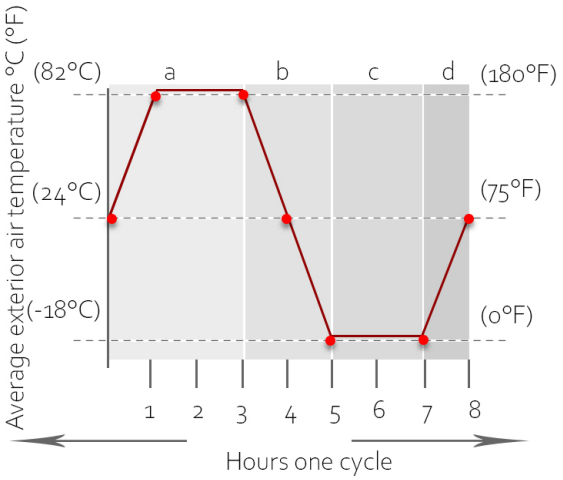
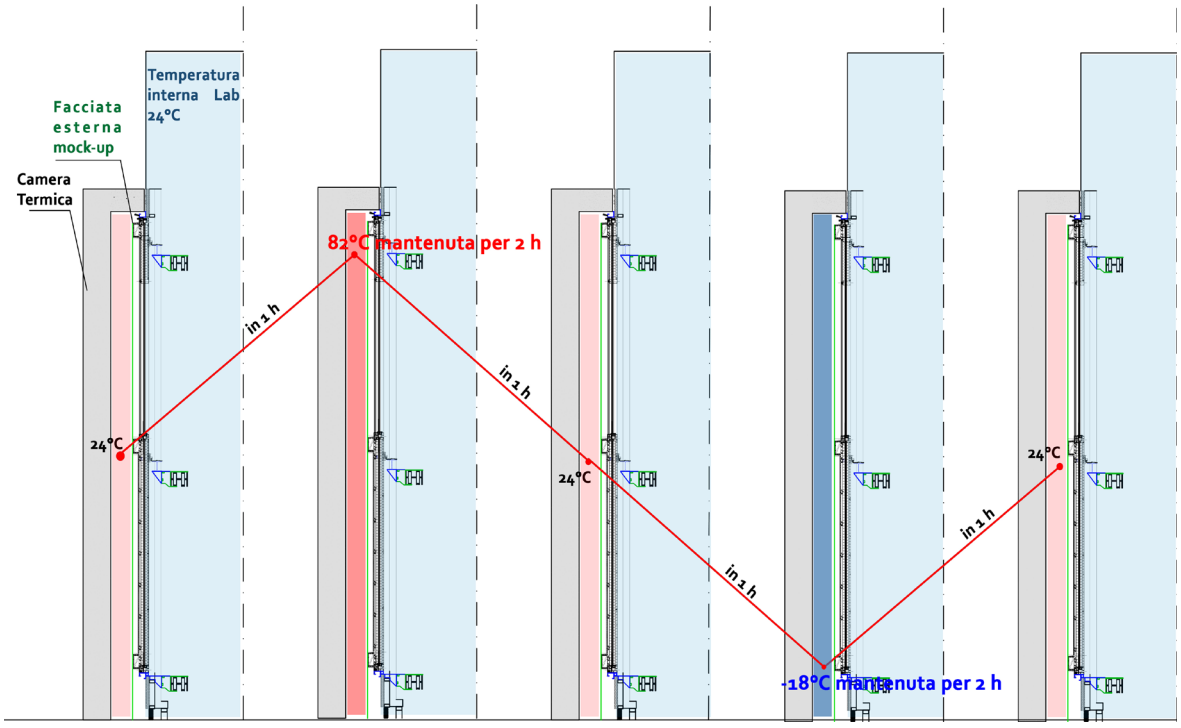


Fig. 7.16. Cicli termici: temperature di raffreddamento e riscaldamento del mock-up in 8h. Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Per una migliore comprensione delle diverse temperature che sollecitano la facciata esterna del mock-up, si riporta uno schema semplificativo [Fig. 7.17]:

Fig. 7.17. Cicli termici: temperature di raffreddamento e riscaldamento sulla facciata esterna del mock-up in 8h. Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo



Conclusi i cicli termici, il mock-up è stato sottoposto ad un'ispezione di tipo visivo per verifi-

care che non si siano verificati cedimenti e fallimenti nei giunti di tenuta dei vetri, nelle sigillature e nelle guarnizioni. Il test ha messo in evidenza un piccolo cedimento nella sigillatura del giunto di collegamento tra le cellule centrali superiore e inferiore.
Questo guasto è stato subito risolto attraverso l'applicazione di uno strato di guaina sigillante e apposizione di sigillante siliconico. Un altro guasto è stato riscontrato nella guarnizione di tenuta tra la quinta e la sesta cellula, deficit già messo in evidenza nella prova n. 4 di tenuta all'acqua in regime dinamico. Sebbene la guarnizione fosse stata ripristinata per procedere alla sequenza delle prove, questa non ha retto ad una temperatura alta.
Non sono state riscontrate altre distorsioni o incrinature negli elementi di tenuta all'aria e all'acqua del mock-up, configurando un comportamento positivo ad un range di temperature molto elevate. La simulazione delle sollecitazioni termiche estreme ha permesso di identificare e validare ulteriormente che i principali fallimenti delle facciate continue sono dovuti ai componenti che hanno il ruolo di barriera agli agenti atmosferici.
Sebbene si siano riscontrato dei deficit prestazionali, questi guasti, secondo la normativa non sono danni permanenti in quanto non hanno amplificato il danno a livello strutturale, nè compromesso il cedimento delle cellule e la sicurezza complessiva del sistema.
Quindi si può dedurre che l'assetto del mock-up testato presenta un alto livello di resistenza allo stress termico. Da sottolineare che la maggior parte dei componenti utilizzati nel sistema ha risposto positivamente in quanto sono stati in grado di resistere ai movimenti termici senza cedimenti e rotture. Tuttavia, i requisiti prestazionali del mock-up devono essere validate dopo le prove di infiltrazione all'aria e alla tenuta all'acqua in regime statico, a cui vengono aggiunte i test di tenuta all'acqua in regime dinamico e al carico da vento.

V fase
L'avvio dell'ultima fase sperimentale si è concretizzata dopo un giorno di assestamento del mock-up, durante il quale è stata ispezionata la struttura portante e l'intelaiatura delle cellule effettuando così un controllo qualitativo del mock-up prima di procedere con la sequenza delle prove. Questa fase vuole contribuire a verificare il mantenimento delle caratteristiche prestazionali del mock-up, sottoposto ad un'ulteriore step di sollecitazione agli eventi estremi di precipitazioni intense e carico da vento.
I test che sono stati effettuati riguardano la ripetizione alla permeabilità all'aria, tenuta all'acqua in regime statico e dinamico e resistenza al carico da vento in condizioni di sicurezza.

Prova n. 14) Ripetizione: Infiltrazioni all'aria
La ripetizione per verificare eventuali infiltrazioni all'aria è stata effettuata ad una pressione di di prova positiva e negativa pari a 300 Pa (6,24 psf), sempre in riferimento alla norma ASTM E 283-04:2012.

- *Pressione positiva*: I parametri ambientali del laboratorio registrati durante la prova a pressione positiva sono stati: Temperatura (29,2°C), Umidità relativa (65,3%) e Pressione atmosferica (101,21 kPa). La permeabilità all'aria a pressione positiva del mock-up è risultata pari a 0,017 CFM x ft^2, inferiore al limite indicato nelle specifiche normative pari a 0,06 CFM x ft^2.

- *Pressione negativa*: I parametri ambientali del laboratorio registrati durante la prova a pressione negativa sono stati: Temperatura (28,9°C), Umidità relativa (65,8%) e Pressione atmosferica (101,04 kPa). La permeabilità all'aria a pressione negativa applicata sul mock-up è risultata pari a 0,010CFM x ft^2, inferiore al limite indicato nelle specifiche normative pari a 0,06CFM x ft^2.

Per una lettura più specifica, in tabella [Tab. 9] sono riportati i risultati di prova ottenuti.

Risultati test n°14	Pressioni di prova	Infiltrazioni d'aria		
	Pa-psf	m^3/h	CFM	$CFMxft^2$
Pressione	300 Pa - 6,24	14,8	0,017	0,06
Depressione	300 Pa - 6,24	9,2	0,010	0,06

Tab. 9. Valori riferiti alla ripetizione della prova di permeabilità all'aria con pressione di prova a 300 Pa, effettuata dopo i cicli termici. Estrapolazione dati a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Sebbene i risultati riflettano un aumento dei valori rispetto alle prove precedenti, il test ha confermato le prestazioni alla permeabilità all'aria del mock-up, visto che i valori sono (anche se di poco) sotto i limiti normativi. Questo aspetto sottolinea la capacità del mock-up a gestire, attraverso la sua componentistica, un ulteriore sollecitazione ad un flusso del vento di media pressione, dopo un carico termico molto elevato.

Prova n. 15) Ripetizione: Tenuta all'acqua in regime statico
La simulazione delle precipitazioni in assenza di vento è stata condotta mediante la ripetizione del test eseguito in riferimento alla procedura normativa ASTM E 331-00:20. Come da norma, la facciata esterna del mock-up è stata sollecitata ad un getto di acqua costante per 15 minuti alla pressione di di 720 Pa (15 psf).
I parametri ambientali del laboratorio registrati durante questa prova sono stati: Temperatura (28,3°C), Umidità relativa (67,12%) e Pressione atmosferica (100,63 kPa).
La ripetizione della prova alla tenuta all'acqua in regime statico, ovvero in condizioni di assenza di vento, ha rilevato un'infiltrazione d'acqua nella zona tra il telaio inferiore della prima cellula e la trave perimetrale. La causa è dovuta ad un guasto nella sigillatura che ha creato un piccolo spazio, attraverso il quale l'acqua è riuscita a incanalarsi all'interno del mock-up.
Questo guasto, forse inevitabile, viste le sollecitazioni termiche a cui è stato sottoposto il mock-up, rileva l'importanza delle attività di testing come verifica del comportamento di tipo adattivo del mock-up rispetto a variabili climatiche in continuo mutamento.
Prima di procedere con la ripetizione del test di tenuta all'acqua in regime dinamico, il guasto è stato corretto mediante l'applicazione di sigillante siliconico, dopo l'avvenuta asciugatura della zona bagnata.

Prova n. 16) Ripetizione: Tenuta all'acqua in regime dinamico
Sempre in riferimento alla procedura di prova stabilita dalla norma AAMA 501.1-05-00:2007, si è riprodotta la sollecitazione combinata dell'effetto del vento e delle precipitazioni, simulando così un medicane con velocità pari a 100 km/h.
I parametri ambientali del laboratorio registrati durante questa prova sono stati: Temperatura (28,3°C), Umidità relativa (67,1%) e Pressione atmosferica (100,53 kPa).
La ripetizione del test, caratterizzata dalla riproduzione di una forte pressione sul mock-up ad una velocità del vento di 68,46 mph (110 km/h), non ha evidenziato alcun cedimento e deficit nell'assetto del sistema del mock-up. Questo risultato positivo ha confermato il comportamento funzionale flessibile del mock-up rispetto alla simulazione dell'evento estremo di cambiamento climatico.

Prova n. 17) Resistenza al carico da vento (carico di sicurezza)
La ripetizione di questo test è stata intesa come una sfida nel misurare le prestazioni del mock-up, dopo che questo sia stato sollecitato a temperature estreme, precipitazioni intense e vento con velocità pari a 100 km/h.
Si vuole sottolineare che i possibili guasti e fallimenti negli elementi di tenuta come giunti, guarnizioni sono dovute alle simulazioni ripetute degli stress dovuti agli effetti di cambia-

mento climatico, che potrebbero causare un deficit a livello strutturale, se le deformazioni superassero la soglia limite. Il test di resistenza al carico del vento in condizioni di sicurezza, secondo la norma ASTM E 330-02:2010, è stato articolato in due step (stessa modalità e carichi della prova n°12): il primo corrisponde alla valutazione della deformazione a pressione negativa e positiva al 75% del carico di progetto pari a 1867,5 Pa (39 psf), mentre nel secondo step la deformazione è calcolata al 150% del carico del vento proiettato, corrispondente a 3735 Pa (78 psf). Il mock-up, sottoposto a questi carichi, non deve subire rotture, incrinature che possono compromettere la sicurezza complessiva del sistema.
Inoltre, come già specificato, le deformazioni non devono essere superiori a L/500 (nessun elemento deve avere un assetto permanente superiore allo 0,2% della luce).
I parametri ambientali del laboratorio registrati durante questa prova sono stati: Temperatura (28,4°C), Umidità relativa (67%) e Pressione atmosferica (100,47 kPa).

Per facilitare la lettura delle deformazioni del mock-up, nelle tabelle seguenti [Tabb. 10, 11], vengono riportati i soli valori puntuali delle deformazioni misurate dai singoli sensori a pressione positiva e pressione negativa.

Tab. 10. Deformazioni frontali rispetto i punti dei sensori a pressione positiva (carico di sicurezza-ripetizione). Estrapolazione dati a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Risultati test n° 17: Pressione positiva												
Sensori n°	26	27	28	29	30	31	32	33	34	39	40	41
Pressione positiva Pa												
1867	-11,18	-15,54	-10,04	-9,86	-24,45	-22,76	-15,83	-14,13	-27,54	-17,53	-13,28	-24,08
0	-0,50	-0,56	-0,44	-0,43	-1,76	-1,15	-0,61	-0,60	-2,28	-1,09	-0,46	1,28
3735	-27,10	-28,80	-22,04	-27,13	-44,64	-44,07	-30,93	-28,61	-43,29	-29,91	-23,42	-42,56
0	-2,10	-2,13	-1,09	-1,21	-2,76	-2,68	-2,19	-2,10	-3,68	-2,08	-1,36	-3,94

Tab. 11. Deformazioni frontali rispetto i punti dei sensori a pressione negativa (carico di sicurezza-ripetizione). Estrapolazione dati a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Risultati test n° 17: Pressione negativa												
Sensori n°	26	27	28	29	30	31	32	33	34	39	40	41
Pressione positiva Pa												
1867	10,73	14,17	10,84	10,98	22,39	21,26	15,37	14,77	26,71	18,52	15,08	24,30
0	0,63	0,87	0,56	0,62	1,57	1,52	0,69	0,65	2,10	1,25	0,54	1,34
3735	27,29	29,74	25,82	27,94	46,23	41,94	37,66	36,26	46,94	37,55	26,09	45,68
0	1,84	1,97	1,38	1,45	2,48	2,64	2,38	2,23	4,24	2,51	1,67	4,13

I valori riportati nelle tabelle rilevano uno spostamento nelle deformazioni leggermente più alto di quello misurato nella prova n°12. Ciò è dovuto alle diverse e frequenti sollecitazioni che il mock-up ha dovuto subire al fine di verificare la sua reale risposta prestazionale agli effetti del cambiamento climatico.
Tuttavia, le deformazioni (riportate in tabelle) calcolate rispetto allo spostamento frontale si attestano al di sotto della soglia consentita, confermando la capacità del mock-up a resistenza ad un carico da vento estremo.
L'ispezione di tipo visivo non ha evidenziato alcun danneggiamento agli elementi di tenuta del sistema, sebbene questi siano stati ripetutamente sollecitati a condizioni ambientali estreme.

Concluse le attività di testing, che caratterizzano le 5 fasi di verifica sperimentale della ricerca, si è costruito un quadro di sintesi, inteso come strumento di lettura delle prestazioni del mock-up evidenziando le sue potenzialità e i fallimenti rispetto agli effetti simulati di cambiamento climatico.

Il paragrafo che segue sostanzia i risultati ottenuti dalla procedura di prova proposta che rappresenta il corpus dei test del protocollo metodologico e sperimentale.

7.5 Quadro di sintesi prestazionale del mock-up

La costruzione di un quadro di sintesi sulle prestazioni del mock-up rappresenta un output della fase di verifica sperimentale della ricerca, che vede dapprima la sistematizzazione dei dati ottenuti dalle attività di testing condotte sul mock-up rispetto a eventi estremi di cambiamento climatico, al fine di poter trarre delle osservazioni conclusive, anche per le prospettive future della ricerca, sullo sviluppo di procedure di prova che possano valutare le prestazioni dei sistemi di facciata continua per ottenere verifiche prestazionali sempre più realistiche, in linea con le strategie di adattamento per i cambiamenti climatici.
Al fine di facilitare la lettura dei dati dei test condotti, si riporta la strutturazione del quadro di sintesi sulle caratteristiche prestazionali del mock-up, oggetto della sperimentazione effettuata attraverso una metodologia di prova costruita su misura, che ha messo in evidenza i deficit critici che sono legati a sollecitazioni climatiche reali.
Il quadro di sintesi può essere considerato come un rapporto di natura tecnica che riporta, per ogni prova effettuata, la sollecitazione simulata, la metodologia normata riprodotta associando il conseguente risultato raggiunto.
Quest'ultimo, oltre ad essere descritto, è corredato da un riepilogo delle prestazioni apponendo un simbolo identificativo per ogni prova superata V e fallita X [Tab. 12].

In ragione dello svolgimento delle fasi sperimentali, dichiarate nel protocollo metodologico e presentate nel quadro di sintesi, si ritiene necessario fare alcune considerazioni sulle prestazioni del mock-up raggiunte a fronte della simulazione di eventi estremi di temperature, precipitazioni e vento, imposti per caratterizzare la sua capacità di risposta prestazionale.

Nello specifico:

Temperature estreme

Il mock-up è stato sottoposto a 3 cicli termici con variazione della temperatura tra 80°C e i -15°C. Questo test, condotto per simulare il fenomeno di ondate e isole di calore, ha comportato un piccolo cedimento nella sigillatura del giunto di collegamento tra le cellule centrali superiore e inferiore che è stato subito corretto mediante l'applicazione del sigillante siliconico. Tuttavia, il guasto puntuale che ha riportato il mock-up non ha compromesso le prestazioni complessive del sistema, configurando così una risposta positiva allo stress termico. Questo aspetto positivo prestazionale di risposta del mock-up può trovare riscontro nell'attività di simulazione condotta tramite il software parametrico Grasshopper, che ha evidenziato temperature superficiali accettabili del mock-up a sollecitazioni esterne a temperature più basse tra i 31 e i 33°C (impostate per gli scenari rispettivamente di Spagna e Italia) rispetto quelle specificate dalla normativa (80°C/-15°C).
Si intende precisare che, gli elementi che garantiscono una tenuta agli agenti atmosferici, se sottoposti ad aumenti di temperatura, subiscono delle alterazioni più o meno importanti e, uno degli aspetti da tenere in considerazione, è l'utilizzo di materiali con un'alta resistenza termica che possano garantire sia prestazioni di tenuta e sia movimenti consentiti dovuti alle dilatazioni termiche.

Tab. 12. Nella pagina seguente: quadro di sintesi dei test svolti. Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

QUADRO DI SINTESI				
Evento estremo	Riferimento normativo	Metodologia di prova	Risultati	Riepilogo
Temperature estreme: ondate di calore e isole di calore	AAMA 501.5:2007 Test Method for Thermal Cycling of Exterior Walls	Il mock-up è stato sottoposto a 3 cicli differenziali di temperatura (riscaldamento e raffreddamento) da 80°C a -15°C (prova n°13)	Cedimenti nella sigillatura e nella guarnizione, tuttavia l'esposizione del mock-up ad un range di temperature elevate non ha evidenziato alcun danneggiamento all'assetto tecnologico, configurando una risposta flessibile alla sollecitazione indotta	Prova n°13 V
Precipitazioni intense: in condizioni di assenza di vento (bombe d'acqua, pluvial flooding)	ASTME331-00:2009 Standard Test Method for Water Penetration of Exterior Windows, Skylights, Doors, and Curtain Walls by Uniform Static Air Pressure Difference	Il mock-up è stato sottoposto ad un flusso d'acqua costante di 3.4 l/min m2 per un tempo pari di 15 minuti a pressioni di prova: - 400 Pa (prova n°3) -720 Pa (prove n°6, 10, 15)	Le infiltrazioni d'acqua (prove n°3, 6, 10) a differenti pressioni di prova, causate da guasti nel sistema della sigillatura dei giunti in alcuni punti del mock-up, non hanno compromesso le prestazioni complessive del sistema, evidenziando la capacità del mock-up a gestire la sollecitazione derivante da precipitazione intensa	Prova n°3 X Prova n°6 X Prova n°10 X Prova n°15 V
Precipitazioni intense: in condizioni di presenza di vento (medicane di 100 km/h)	AAMA 501.1-05-00:2007 Water Penetration of Windows, Curtain Walls and Doors Using Dynamic Pressure	Il mock-up è stato sottoposto al flusso d'acqua costante per un tempo pari a 15 minuti e con una velocità del vento stabilita di: - 30 mph (48,28 km/h) (prova n°4) - 68,46 mph (110 km/h) (prove n°7, 11, 16)	Le infiltrazioni d'acqua (prova n°4) risolte con l'applicazione di sigillante siliconico hanno determinato, nei test di simulazione di un uragano, un comportamento positivo e adattivo del mock-up che non ha evidenziato alcun deficit prestazionale	Prova n°4 X Prova n°7 V Prova n°11 V Prova n°16 V
Vento estremo: - bassa pressione - media pressione	ASTM E 283-04:2012 Standard Test Method for Determining Rate of Air Leakage Through Exterior Windows, Curtain Walls, and Doors Under Specified Pressure Differences Across the Specimen	Il mock-up è stato sollecitato da pressioni di prova positive e negative pari a: - 150 Pa (prova n°2 – bassa pressione) - 300 Pa (prove n°5, 9, 14 – media pressione)	I test condotti hanno rilevato perdite d'aria al di sotto dei limiti normativi, sottolineando la capacità del mock-up a gestire, attraverso la sua componentistica, la sollecitazione da vento di bassa e media pressione	Prova n°2 V Prova n°5 V Prova n°9 V Prova n°14 V
Vento estremo: - bassa pressione (precarico) - alta pressione (carico di progetto) - forte pressione (carico di sicurezza)	ASTM E330-02:2010 Standard Test Method for Structural Performance of Exterior Windows, Doors, Skylights and Curtain Walls by Uniform Static Air Pressure Difference	Il mock-up è stato sottoposto a pressioni di prova positive e negative: - al 50% del carico di progetto, 1245 Pa (prova n°1 - bassa pressione) - al 50% e al 100% del carico di progetto, 1245 Pa e 2490 Pa (prova n°8- alta pressione) - al 75% e al 150% del carico di sicurezza, 1867 Pa e 3735 Pa (prove n° 12, 17 – forte pressione)	Il mock-up, rispetto alla sollecitazione del carico da vento a differenze di pressioni positive e negative, non ha evidenziato rotture alle lastre di vetro, né deformazioni frontali superiori al valore limite, rilevando una risposta flessibile del sistema alla simulazione del fenomeno di vento estremo	Prova n°1 V Prova n°8 V Prova n°12 V Prova n°17 V

Precipitazioni intense

Per simulare bombe d'acqua e pluvial flooding, il mock-up è stato sottoposto a flussi d'acqua costante sia in condizioni di presenza di vento sia in condizioni di assenza di vento.
I risultati dei test rilevano per ambedue le modalità (n° prove: 3, 4, 6) che, il continuo impatto della combinazione precipitazione e vento causa una significativa perdita delle prestazioni, in termini di infiltrazioni all'acqua, considerate nelle condizioni di esercizio del mock-up.
Le ispezioni hanno rilevato che gli elementi di tenuta, come giunti, guarnizioni e sigillature, devono essere adeguatamente applicati e posizionati, per evitare che le infiltrazioni d'acqua possano causare danni più gravi a livello strutturale.
Come specificato nel Cap. 5, una corretta posa in opera del sistema e, in particolare degli elementi che realizzazione il sistema di tenuta agli agenti atmosferici è fondamentale nella valutazione delle prestazioni delle facciate continue. È stato stabilito che la quantità di acqua infiltrata non mostra una correlazione con il differenziale di pressione sul sistema, il che indica che la forza che causa l'infiltrazione di acqua potrebbe essere anche dovuta alla pressione idrostatica esercitata dal film di acqua della rete sprinkler.
Ciò rileva l'importanza di adottare la simulazione dal vero, ovvero attività di testing in regime simulato, in quanto si può determinare il comportamento prestazionale dei sistemi di facciata continua a pressioni e depressioni che avvengono realmente nell'ambiente esterno. Si può affermare che il tasso di infiltrazione è diventato stazionario molto rapidamente, ma questi test palesano che i canali di condensazione/acqua devono essere ben progettati in accordo con l'intensità di pioggia annuale del contesto di riferimento.
Inoltre, si deve tenere conto dell'assetto del contesto di ubicazione per il corretto smaltimento delle acque meteoriche, evitando l'accumulo indesiderato che potrebbe amplificare il fenomeno del pluvial flooding. I guasti che si sono messi in evidenza durante questi test sono stati risolti mediante apposizioni di strati di guaine espandenti e sigillanti siliconici che hanno permesso nella sequenza delle ripetizioni delle prove (n° 10, 11) di non determinare alcuna infiltrazione all'acqua.
Difatti, la velocità rispetto alla quale si è simulato il flusso di vento è pari a 100 km/h, rappresentando un impatto da medicane (uragano), non ha causato danni evidenti al sistema.
Sebbene durante le ripetizioni (n° 10, 11) non sono state individuate infiltrazioni d'acqua, la ripetizione n° 15, tenuta all'acqua in regime statico (in assenza di vento), ha messo in evidenza un fallimento nella sigillatura nella zona tra il telaio inferiore della prima cellula e la trave perimetrale, che ha creato un'infiltrazione all'interno del mock-up.
Questa problematica è dovuta alle continue sollecitazioni che hanno dovuto sopportare gli elementi di tenuta, in particolare dopo che il mock-up è stato sottoposto ai cicli termici.
Tuttavia, si può affermare che l'assetto tecnologico del mock-up ha garantito una risposta positiva nella capacità di gestire eventi estremi di cambiamento climatico, considerando il fatto che i guasti avuti non hanno condizionato il livello di sicurezza dell'intero sistema.

Vento estremo

La simulazione dell'effetto del carico da vento sul mock-up è stata condotta a differenti pressioni di prova, proprio per studiare il comportamento dinamico e strutturale del mock soggetto a basse, medie, alte e forti pressioni.
I diversi scenari hanno messo in evidenza la capacità del mock-up di mantenere il suo funzionamento fino ad una forte pressione di prova, considerata in condizioni di sicurezza di 3735 Pa. Il mock-up, rispetto alla sollecitazione dinamica indotta, non ha evidenziato rotture alle lastre di vetro, né deformazioni frontali superiori al valore limite, rilevando una risposta flessibile del sistema al carico da vento.
Il carattere sperimentale della ricerca, definito dalla conduzione delle attività di testing sul mock-up della tipologia di facciata continua a cellula, ha consentito di ottenere informazioni reali rispetto la sua capacità di risposta prestazionale nei differenti scenari di eventi

estremi analizzati quali, temperature, precipitazioni e vento a cui viene aggiunta la combinazione precipitazione-vento, simulando così gli uragani che si formano nel Mediterraneo, i cosiddetti medicane.
In primo luogo si vuole evidenziare che i risultati dei test condotti validano come problematica più ricorrente dei sistemi di facciata continua, l'infiltrazione all'acqua, dovuta nella maggior parte dei casi a difetti negli elementi di tenuta quali giunti, guarnizioni e sigillature.
Rispetto le considerazioni sopra riportate, si può dedurre che il mock-up, pur subendo infiltrazioni d'acqua e ottenendo valori di deformazione poco al sotto delle soglie limite, ha una risposta prestazionale flessibile ai ripetuti eventi estremi cui è stato sottoposto.
Questo aspetto viene sottolineato dal fatto che le varie prove condotte sono state effettuate a differenti pressioni di prova e velocità del vento proprio per validare in termini di condizioni reali le prestazioni a lungo termine del mock-up rispetto a continue e variabili sollecitazioni climatiche.
Pertanto, si può concludere che, la rilevanza dei risultati ottenuti deriva dalla sequenza di prova stabilita che costituisce il *protocollo metodologico e sperimentale*.

7.7 Valutazioni critiche: attività di simulazione 'versus' attività di testing

La fase sperimentale della ricerca che ha condotto alla verifica prestazionale del mock-up sottoposto ad eventi estremi di cambiamento climatico è il risultato dei due step relativi alle attività di simulazione e alle attività di testing.
Al fine di mettere in rilievo i risultati raggiunti da queste attività che imprimono alla ricerca un carattere sperimentale, sembra utile fare alcune considerazioni che rispecchiano gli esiti della ricerca stessa.
Attraverso le attività simulazione (discusse nel capitolo precedente, Cfr. Cap. 6) condotte costruendo il mock-up utilizzando il software parametrico Grasshopper, si è analizzato il comportamento termico prestazionale simulando due scenari climatici di temperatura in ambito Mediterraneo quali, Italia e Spagna. Dalla simulazione è emerso che per ambedue gli scenari, il mock-up rileva un comportamento positivo rispetto ai valori della temperatura superficiale esterna, mentre per la temperatura superficiale interna, i valori risultano elevati, provocando un discomfort nello spazio interno (effetto indesiderato).
Da ciò si rileva che, sebbene le cellule del mock-up siano costituite da lastre di vetro isolanti e con valori di trasmittanza idonei - le cui caratteristiche sono state calcolate mediante software e secondo metodi di calcolo europeo e americano – le loro prestazioni rispetto alla variabile climatica della temperatura sono da considerarsi negative, non risultato in grado di gestire l'apporto termico.
Tuttavia, a causa dei limiti del software in termini di valutazione complessive delle prestazioni del mock-up (ad esempio ci si riferisce al fatto che non è possibile studiare il mock-up sottoposto a stress termici e pressioni del vento), la sola temperatura superficiale, non può essere considerata un indicatore robusto che può indicare la risposta prestazionale del mock-up in regime di cambiamento climatico. In aggiunta, sul software non è consentito settare parametri di temperatura di picco (ad esempio simulare il comportamento del mock-up a 80°C/-15°C come avvenuto per il testing) e da ciò deriva l'impossibilità di un diretto confronto dei risultati tra attività simulative con quelle di testing.
Sebbene la simulazione tramite software sia uno strumento validato nella progettazione climatico-ambientale al fine di conoscere le condizioni ambientali di un contesto in cui si dovrà inserire un involucro edilizio, ai fini degli obiettivi della ricerca, la simulazione non è risultata sufficiente a valutare le prestazioni del mock-up se sottoposto a diverse sollecitazioni climatiche. Uno dei limiti alla valutazione mediante simulazione è il fatto che non si possono riprodurre gli eventi estremi di cambiamento climatico che, per la ricerca sono: temperature estreme, precipitazioni intense e carico da vento.

Questo aspetto si ripercuote sulla difficoltà a determinare il comportamento di risposta del mock-up rispetto a stress esterni. Per questi motivi, è stato necessario affiancare alle attività di simulazione (solo a livello termico) quelle relative al testing.
Dalla simulazione, si è passati a ricreare in laboratorio gli eventi estremi di cambiamento climatico, rafforzando così la fase sperimentale e di verifica della ricerca.
Per fornire un'adeguata risposta prestazionale flessibile del mock-up rispetto ai fenomeni analizzati, il *passo* fondamentale è stato la strutturazione di una nuova metodologia di prova che ha portato alla strutturazione del protocollo metodologico e sperimentale, attraverso il quale è stato possibile misurare "dal vero" e definire le prestazioni a lungo termine del mock-up sottoposto a condizioni climatiche estreme.
Dai risultati dei test condotti, si è rilevato un comportamento flessibile del mock-up rispetto alla riproduzione di eventi estremi e, allo steso tempo, hanno messo in evidenza come le infiltrazioni d'acqua, in particolare dopo il test alla resistenza del carico da vento, sia una delle problematiche più ricorrenti di questi sistemi.
Un aspetto rilevante da sottolineare, in linea con i risultati della simulazione, riguarda il test sui cicli termici. Sebbene il mock-up, abbia risposto positivamente - nonostante cedimenti su guarnizioni e sigillature che però non hanno compromesso a livello strutturale le condizioni del sistema - uno stress derivante dalle temperature estreme può provocare un innalzamento della temperatura superficiale esterna ed interna del mock-up.

In termini di deficit prestazionale, questo apporto termico ha due conseguenze negative: una è il discomfort che si crea nello spazio indoor, l'altra fa riferimento al possibile innesco di isola di calore e ondate di calore, soprattutto se la temperatura dell'aria esterna è molto elevata. La combinazione della temperatura esterna e la temperatura superficiale esterna ed interna rappresenta una condizione da tenere in considerazione nella progettazione dei sistemi di facciata continua, visto che le lastre di vetro sono la componente in percentuale maggiore e da cui dipendono le caratteristiche complessive di tipo termico. Attraverso questa problematica rilevata, si è validato come il controllo del flusso termico e luminoso è un aspetto fondamento per il raggiungimento di requisiti prestazionali in termini *adattivi* e rispondenti al clima. Un'ipotesi, come possibile sviluppo futuro della ricerca, per ovviare questa problematica e quindi, elaborare una risposta adattiva del mock-up rispetto alla sollecitazione estrema della temperatura, potrebbe essere l'interposizione tra le due lastre di vetro di uno *smart materials* (tra quelli individuati e analizzati nel Cap. 4) che sia in grado di gestire l'apporto termico.

In ragione dei risultati raggiunti dalla fase di sperimentazione, si può dedurre che non si può demandare alla sola attività di simulazione la verifica prestazionale per verificare il funzionamento adattivo del mock-up sottoposto ad eventi estremi di cambiamento climatico.
I software di simulazione possono essere intesi come strumenti di supporto alla progettazione ambientale-climatica, i cui risultati devono essere sempre verificati in regime reale. Per questi motivi, le attività di testing costituiscono un valore aggiunto alla ricerca in quanto contribuiscono a misurare la risposta reale del mock-up, attraverso sequenze di prova *irrobustite* da prove aggiuntive che riproducono sul mock-stesso, sollecitazioni estreme di cambiamento climatico. Queste fanno riferimento sia ad effetti singoli come temperature estreme, precipitazioni intense e carico dal vento ma anche effetti combinati di precipitazione-vento, riproducendo in tal modo, l'evento estremo dell'uragano, ovvero il medicane in ambito Mediterraneo.

Conclusioni

Ai fini delle prime considerazioni per l'avanzamento della conoscenza, sembra utile met-

tere in rilievo che i risultati raggiunti nella comprensione dei fenomeni di cambiamento climatico per la Regione del Mediterraneo sono il frutto delle attività di simulazione ma in particolare delle attività di testing, caratterizzate dalla strutturazione di una *metodologia di prova adattiva*, implementando la sequenza di prove standard in ambito americano.
Considerando che le procedure di prova standard forniscono un'indicazione dei sistemi di facciata continua solo nel momento in cui è nuova di zecca, si deduce che nel processo di testing in ambito normativo, dovrebbero essere sviluppate procedure di prova più realistiche, che tengano conto degli effetti di cambiamento climatico, attraverso diverse ripetizioni delle sollecitazioni, al fine di misurare la resistenza reale e flessibile, provando così a determinare le prestazioni a lungo termine dei sistemi di facciata continua.
Prove come aria e acqua da sole, non possono essere considerate esaustive nella definizione di un funzionamento, in termini di flessibilità, adattività e durabilità, che possa garantire la risposta prestazionale viste le continue sollecitazioni estreme.
Adeguare gli standard delle procedure di testing a procedure che prendano in considerazione il rapporto tra sistema tecnologico e sistema ambientale (interazione tra edificio-contesto), è una questione molto complessa.
Questo scenario delineato dagli step operativi della ricerca ha determinato l'individuazione di criteri di performance che dovrebbero essere presi in considerazione nella determinazione della resistenza dei sistemi di facciata continua a eventi che diventeranno sempre più intensi e frequenti. In particolare, ci si riferisce allo stress indotto dalle temperature e dal vento che possono causare significative carenze legate alle infiltrazioni all'acqua.
Nel protocollo metodologico e sperimentale, l'implementazione delle prove da carico da vento e i cicli termici hanno rappresentano dei validi test per mettere in discussione il livello prestazionale dell'intero sistema e per comprendere criticità e deficit che possono derivare da ripetuti stress dinamici, considerandoli come reali effetti che il mock-up può subire durante la sua vita utile. Difatti, la fatica del mock-up a rispondere in modo flessibile ai ripetuti test, durante la procedura di prova proposta, mette in evidenza l'esigenza di uniformare i protocolli di testing, per ottenere risultati soddisfacenti sulle prestazioni di durata dei sistemi di facciata continua.
I *criteri prestazionali* rappresentati dai test termici e del vento hanno un ruolo significativo nel comprendere le prestazioni di tenuta dei sistemi di facciata continua agli agenti atmosferici. Questo aspetto se da un lato può mettere in crisi i risultati delle prestazioni che derivano da procedure di testing e il processo di design che deve tenere in considerazioni gli effetti climatici, dall'altro il processo di testing può essere definito come *strumento adattivo* capace di misurare le reali prestazioni dei sistemi di facciata continua se implementato e adattato con procedure di prova che riproducono eventi estremi di cambiamento climatico. In ragione delle questioni rilevate, il protocollo metodologico e sperimentale rappresenta un output della ricerca, portando all'elaborazione di una metodologia di testing dinamica *implementabile* e *replicabile*, in grado di supportare in modo efficace la complessa lettura definita dalla relazione 'Building envelope *versus* Climate change'.

In conclusione, la fase sperimentale, che rappresenta il momento cardine della ricerca e supportata dal rigore metodologico, ha consentito di rispondere alle problematiche messe in evidenza dall'analisi dello stato dell'arte sulla difficoltà di misurare le prestazioni di risposta flessibile dei sistemi di facciata continua rispetto a sollecitazioni dinamiche esterne in continuo mutamento.
Se a questo aspetto, si aggiungono i fallimenti e i degradi delle facciate continue dovuti ai frequenti impatti di cambiamento climatico (Cfr. Cap. 5), il protocollo metodologico –attraverso la strutturazione di una sequenza di prove ad hoc - può essere inteso come uno strumento di valutazione *adattiva* utile a conoscere ex ante le possibili problematiche, con la possibilità di attuare delle azioni progettuali correttive.

Inquadramento della III Parte della Ricerca all'interno del *Technology Readness Levels* TRLs

Tra le chiavi di lettura fondamentali della ricerca, il Technology Readness Levels TRLs si distingue per indicare il livello di maturazione tecnologica dello stato dell'arte e del processo tecnologico impiegato al fine di raggiungere gli obiettivi della ricerca.
L'ultima parte della tesi dottorale, definita dai capitoli 6 e 7, descrive la fase sperimentale e di verifica condotta sul mock-up, attraverso azioni di simulazione e di testing.
Le attività della ricerca finalizzate alla verifica prestazionale del mock-up soggetto ad eventi estremi per la Regione del Mediterraneo, hanno condotto allo sviluppo di una procedura di prova sperimentale per misurare il funzionamento flessibile e adattivo delle facciate continue in regime di cambiamento climatico. Viene raggiunto così l'obiettivo della ricerca, inquadrato a rafforzare e avanzare la conoscenza nello studio analitico delle nuove prestazioni degli involucri edilizi, in particolare dei sistemi di facciata continua.
Sebbene il processo metodologico della ricerca abbia portato alla costruzione di un mock-up di facciata continua della tipologia a cellula da caratterizzare a livello prestazionale in ambiente simulato e in laboratorio, l'*output della ricerca* è rappresentato dall'implementazione di ciclogrammi di prova, attraverso la costruzione del *protocollo metodologico e sperimentale* nell'ambito di attività di testing.
In questo senso, il processo tecnologico che conduce al raggiungimento dell'obiettivo della ricerca viene inquadrato all'interno del TRL 3 *Experimental proof of concept* (Prova sperimentale del concetto) [Fig. 1], poichè si considerano attività perliminari quelle condotte attraverso le attività di simulazione che hanno sottolineato l'individuazione della criticità a formulare una procedura di prova valida che potesse verificare le prestazioni reali del mock-up. Il risultato della ricerca applicata trasferito nel livello di maturità tecnologica, considerando il protocollo metodologico e sperimentale, può essere letto nel TRL 3, in quanto la sua efficacia è stata testata preliminarmente attraverso le prove condotte sul mock-up in laboratorio.
Questo aspetto che getta le basi per una *mission innovata* all'interno dell'analisi e delle verifiche prestazionali dei sistemi di facciata continua, coinvolge in tal modo, il settore della Ricerca e dello Sviluppo a codificare nuovi criteri e requisiti da mettere in campo nei processi di costruzione tecnologica dei nuovi involucri che sono proiettati a rispondere in modo positivo alle variabili climatiche.
Per questo motivo, al fine di dimostrare la reale efficacia del protocollo nella misurazione e nella previsione del comportamento delle facciate sottoposte ad eventi estremi, risulta necessario coinvolgere progettisiti e stakeholder del settore per garantire, al contempo, risultati tangibili e col massimo impatto, tecnologico e prestazionale.

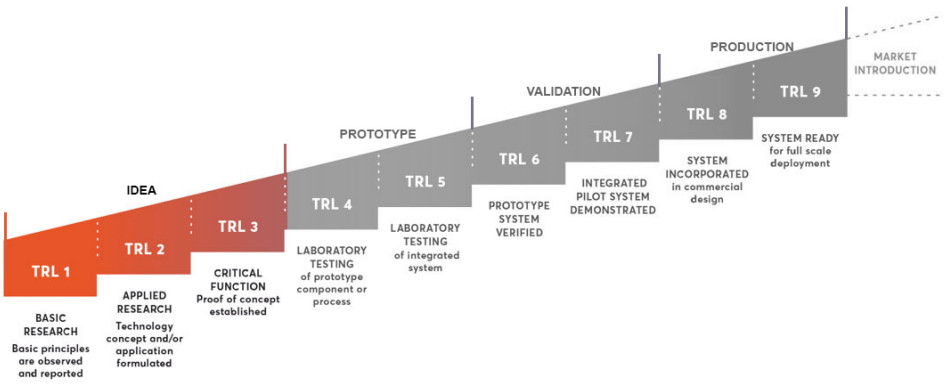


Fig. 1. TRL 3 Experimental proof of concept

Note

1. "Data la crescente complessità e varietà dei sistemi di involucro edilizio, la valutazione delle loro prestazioni attraverso test di mock-up è fondamentale per garantire le prestazioni durante la vita utile dell'edificio". Behr, R. A. (Ed.). (2009). *Architectural glass to resist seismic and extreme climatic events*. Woodhead Publishing ISBN 978-1-84569-369-5 (cit. pag. 247)

2. È evidente la necessità di sviluppare involucri innovativi la cui risposta prestazionale sia misurabile e certificabile, in rapporto agli scambi di flusso tra l'edificio e il suo contesto, per cui il ruolo degli strumenti di rilevazione fenomenologica e delle attività di testing assumono particolare rilevanza. In questo quadro si colloca il TestLab TestRoom TestCell incentrato su due livelli di testing: la certificazione da standard unificati e la sperimentazione applicata. Milardi, M. (2015). Strumenti e protocolli per il testing avanzato nelle attività di ricerca. TestLab TestRoom TestCell. In Lauria, M. & Trombetta, C. (eds). *Building Future Lab. Ricerca sperimentale per la Sostenibilità nel Settore delle Costruzioni.* pp. 223-225, (cit. p. 224). Maggioli Editore. Rimini.

3. La sezione del TCLab non è l'unica sezione operativa del BFL, in quanto questo progetto parte dal presupposto che la costruzione del futuro passi attraverso l'opportunità di superare il metodo tradizionale di trasferimento delle esperienze costruttive per realizzare un trasferimento di tecnologie e competenze basato sulla sperimentazione innovativa. Il progetto propone tecnologie all'avanguardia ed è suddiviso nelle seguenti sezioni: Le sezioni operative sono fortemente correlate tra loro e prevedono test dinamici relativi all'Energia Sostenibile e all'Ambiente, test sui componenti, attraverso il sottosistema "TEST MAT&COM, test sull'involucro edilizio attraverso il "TEST LAB", la "TEST CELL" e la "TEST ROOM", sui sistemi morfologici attraverso il "TEST DIMORAProject&Co", sui sistemi strutturali attraverso il "TEST DINAMICA" ed edifici in uso attraverso il "TEST MOBILE", gli edifici in condizioni estreme, ovvero con le fondazioni sull'acqua, sono testati attraverso il "TEST WATER" che completa la definizione di Laboratorio cognitivo.

4. Attraverso i fondi '*PON Call no. 254/Ric. 2011 Progetti di Potenziamento Strutturale*' è stato costruito il laboratorio di ricerca permanente Building Future Lab presso l'Università Mediterranea di Reggio Calabria, con afferenza al Dipartimento di Architettura e Territorio dArTe. L'esperienza che il progetto del Laboratorio Building Future Lab - BFL propone, si colloca nel particolare ambito della ricerca applicata relativo al testing avanzato. Testing che, attraverso i vari laboratori in cui il BFL è suddiviso, consente di sperimentare, nonché certificare, nuovi approcci e sistemi tecnici per l'edificio sostenibile del futuro, in grado di far fronte ai cambiamenti climatici in atto.

5. La Sezione TCLab – cuore della struttura laboratoriale del BFL – è progettate con un duplice obiettivo: l'uno, di testare le reali risposte prestazionali delle facciate secondo le normative internazionali più specifiche, rispetto ad eventi estremi; l'altro di verificare, secondo gli stessi requisiti normativi o approcci in regola d'arte, chiusure verticali, orizzontali, coperture, serramenti, materiali edili, in grado di garantire livelli accettabili di sicurezza rispetto ai flussi - in particolare quelli ambientali - che si relazionano con l'involucro edilizio.

6. Dal dicembre del 2019 il TCLab ha ottenuto la Certificazione di Qualità ISO 9001-2015 per il campo di applicazione: Attività di sperimentazione, ricerca e certificazione sugli involucri edilizi (IAF 34, N. IT296047-1). Inoltre, da ottobre 2020, fa parte di un Partenariato di 38 Centri di Ricerca europei che ha avuto accesso ai finanziamenti di un bando Horizon 2020, con il Progetto *Metabuilding Labs, Metaclustered, SME-oriented European Innovation Test Bedfor the Building Envelope materials insustrial sector using a harmonised and upgraded technical framework and living LABS*, che vede come capofila l'Istituto di Reicerca Nobateck Inef4.

7. Per approfondimenti specifici alle attrezzature e alle strumentazioni si consigliano i seguenti riferimenti:
- Trombetta, C. & Milardi, M. (2015). BUILDING FUTURE Lab.: a great infrastructure for testing. *Energy procedia*, n. 78, pp. 657-662. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.053;
- Lauria, M. & Trombetta, C. (2015). *Building Future Lab. Ricerca sperimentale per la Sostenibilità nel Settore delle Costruzioni*. Maggioli Editore. Rimini.

8. L'apparecchiatura per il controllo della permeabilità all'acqua di campioni di facciate di edifici, progettata dai Professori C. Trombetta, M. Milardi e M. Rossetti viene identificata nel brevetto US 10379025B2 come: *apparecchiatura per il controllo della permeabilità all'acqua* di campioni di facciate di edifici comprendente un telaio su un lato del quale è fissato un campione della facciata da testare e una griglia sulla quale sono montati ugelli che sono predisposti spruzzi d'acqua sul provino di facciata da testare, caratterizzati dal fatto che detta apparecchiatura è dotata di un sistema di movimentazione della griglia da una postazione di lavoro posta di fronte al provino di facciata da testare testato ad una posizione di riposo posizionata dietro il telaio dalla parte opposta a quella su cui si trova il campione e che la griglia sulla quale sono predisposti gli ugelli scorre su elementi del telaio posti ad una distanza prefissata dal campione da testare. Per ulteriori informazioni, è possibile consultare il deposito del brevetto al seguente link: https://patents.google.com/patent/US10379025B2/en Accessed: 7 dicembre 2022

9. AAMA 501.5-07: Test Method for Thermal Cycling of Exterior Wall. La norma specifica un approccio standardizzato per il test del ciclo termico di giunti, ancoraggi e altri componenti di pareti esterne.

10. "La tecnologia di installazione, le procedure di sicurezza e la garanzia di qualità dipendono non solo dal tipo di edificio e dal sistema utilizzato, ma anche dalle buone pratiche e dalle tradizioni della regione e dell'impresa di facciate coinvolta nella costruzione". Trifonova, R. (2016). Unitized Curtain Walls Installation and Some Health and Safety Aspects. *3rd International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering*, 3-BCCCE, 19-21 May 2016. pp. 190-199 (cit. pag. 198). Epoka University, Tirana, Albania. Online avaible at: oai:dspace.epoka.edu.al:1/1562 Accessed: 20 dicembre 2022

11. Il posizionamento da destra verso sinistra viene stabilito in base alla posizione di un operatore che sta all'interno della camera di prova; per un operatore all'esterno di questa, l'alloggiamento delle singole cellule avviene invece da sinistra verso destra.

12. "Sebbene le prestazioni termiche dei sistemi possano essere definite mediante simulazione, le prestazioni termiche reali del sistema possono variare con i risultati della simulazione". Yalaz, E. T., Tavil, A. U., & Celik, O. C. (2018). Lifetime performance evaluation of stick and panel curtain wall systems by full-scale testing. Construction and Building Materials, 170,

pp. 254-271, (cit. pag. 255). DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.061

13. La camera termica della sezione TCLab del BFL è in grado di raggiungere temperature che variano in un range da -15(+3) a +85(+3) °C. Il sistema di riscaldamento è stato realizzato un impianto a matrice di 24 lampade ad infrarossi, da 120 kW totali. L'impianto è dotato di sistema di controllo regolabile da 0 a 100% della potenza delle lampade. La disposizione delle stesse, in blocchi di 6 disposte su 4 fasce orizzontali, permette di scaldare in modo selettivo diversi punti della camera, permettendo così di simulare situazioni particolari, come ad esempio il riscaldamento disomogeneo delle facciate causato da zone di sole e coni di ombra. Per il raffreddamento la camera termica è stata dotata di un sistema di refrigerazione con aero-evaporatore della potenza frigorifera di 11 kW, in grado di raggiungere una temperatura minima di -15°C. Grazie alla possibilità di movimentazione, la camera permette di andare a testare campioni su differenti punti della facciata stessa. Inoltre, con la possibilità di regolare la potenza del riscaldamento delle differenti fasce del sistema, si rende possibile la simulazione di situazioni particolari, come ad esempio l'alternanza luce-ombra prodotta da edifici esistenti sulle facciate di cui i campioni sono oggetto di test.

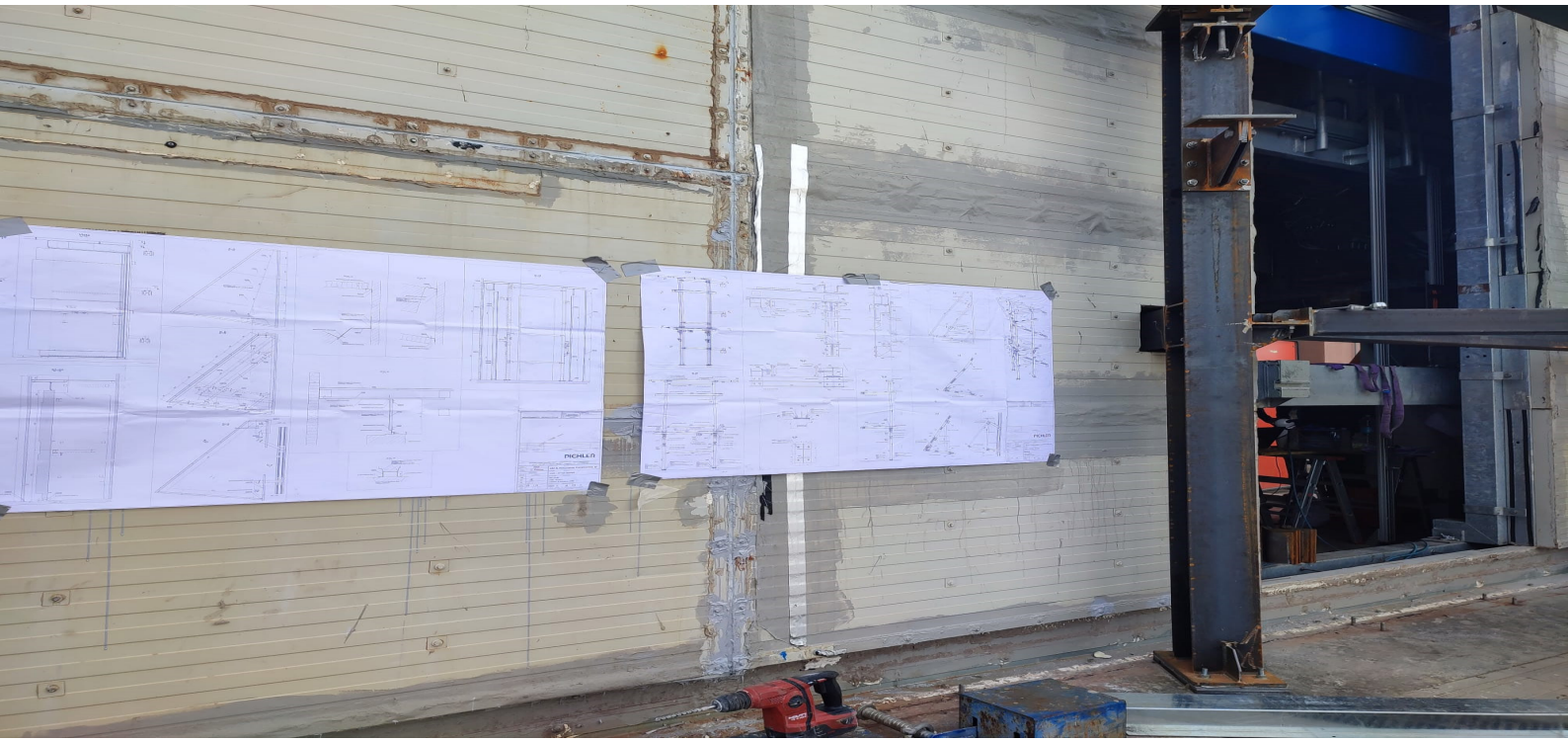
References

Behr, R. A. (Ed.). (2009). *Architectural glass to resist seismic and extreme climatic events*. Woodhead Publishing ISBN 978-1-84569-369-5 Cit. pag. 247.

Milardi, M. (2015). Strumenti e protocolli per il testing avanzato nelle attività di ricerca. TestLab TestRoom TestCell. In Lauria, M. & Trombetta, C. (eds). *Building Future Lab. Ricerca sperimentale per la Sostenibilità nel Settore delle Costruzioni*. pp. 223-225. Maggioli Editore. Rimini. Cit. p. 224.

Trifonova, R. (2016). Unitized Curtain Walls Installation and Some Health and Safety Aspects. *3rd International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering*, 3-BCCCE, 19-21 May 2016. pp. 190-199. Epoka University, Tirana, Albania. Online avaible at: oai:dspace.epoka.edu.al:1/1562 Accessed: 20 dicembre 2022 Cit. pag. 198.

Yalaz, E. T., Tavil, A. U., & Celik, O. C. (2018). Lifetime performance evaluation of stick and panel curtain wall systems by full-scale testing. *Construction and Building Materials*, 170, pp. 254-271. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.061 Cit. pag. 255.



PARTE QUARTA:
Discussione intorno alle conclusioni

Settori di innovazione per la ricerca e riferimenti

Conclusioni
Risultati ottenuti, limiti della ricerca e possibili prospettive future

La tesi di dottorato, dal titolo "*Valutazione prestazionale adattiva per gli involucri edilizi in regime di cambiamento climatico. Azioni di simulazione e testing su un mock-up di facciata continua*", qui presentata, potrebbe definirsi come lo 'studio dal vero' per la verifica prestazionale delle facciate continue rispetto ad eventi estremi di cambiamento climatico, attraverso la strutturazione di una *metodologia* replicabile e funzionale per prospettive future di ricerca.

L'iter scientifico, rappresentato dalle fasi consequenziali che costituiscono l'approccio metodologico approntato per le varie attività teoriche-applicative della ricerca, seppur apparentemente vasto nella trattazione, costituisce il percorso *obbligato* e, a volte *vincolato*, per tentare di esporre in modo completo, i risultati ottenuti, i limiti e gli sviluppi futuri della ricerca [Fig. 1] nell'ambito della tematica relativa all'innovazione tecnologica-prestazionale dell'involucro edilizio rispetto un contesto climatico in continuo mutamento.

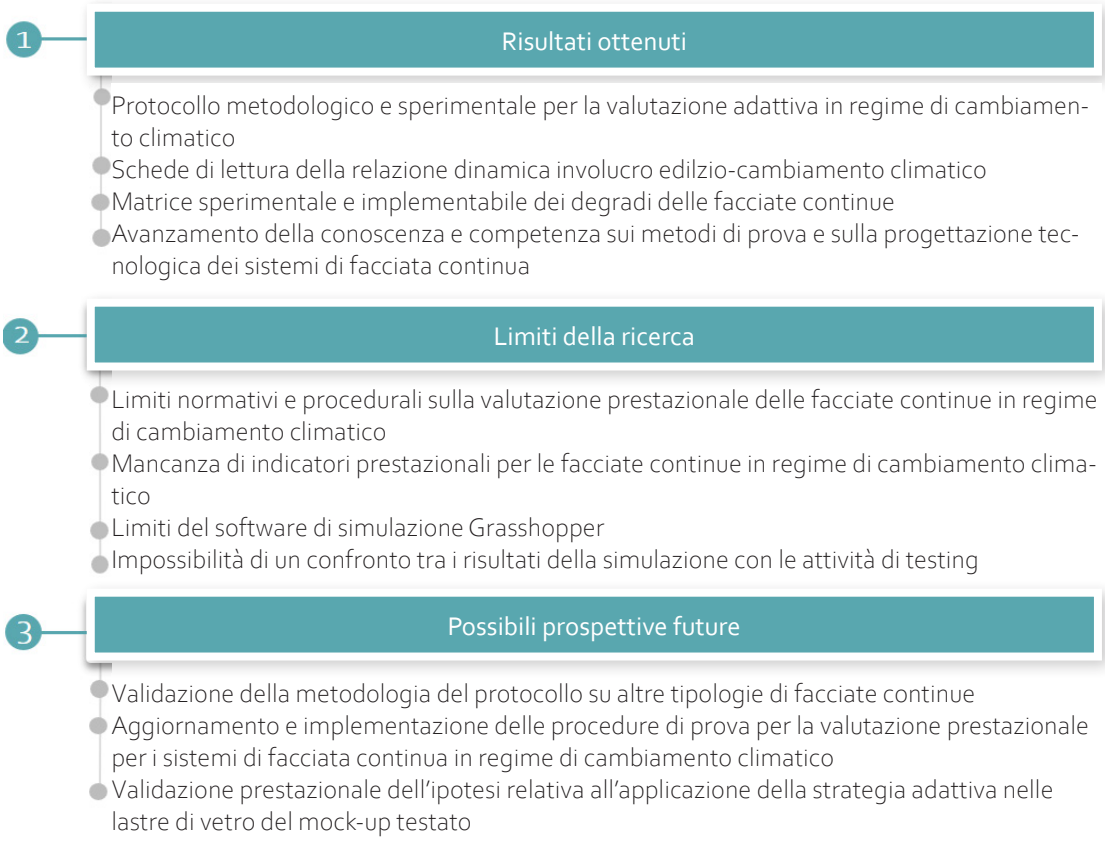


Fig. 1. Sintesi dei risultati ottenuti, dei limiti e delle possibili prospettive future della ricerca. Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

In questo contesto, risulta utile ripercorrere i risultati raggiunti e le criticità *incontrate* rispetto agli obiettivi prefissati della ricerca, ponendo l'attenzione su alcuni concetti fondamentali che potrebbero rappresentare spunti per nuove sfide nei processi di innovazione e di valutazione prestazionale dei sistemi di facciata continua.
Dall'analisi preliminare, avviata nella fase istruttoria della ricerca viene messo in evidenza come il settore delle costruzioni, sebbene risulti un fattore causale del cambiamento climatico, è chiamato a definire nuove soluzioni tecnologiche e sviluppare nuove metodologie operative, per contribuire in modo significativo ai processi di adattamento climatico, obiettivi prioritari degli assi strategici delle politiche europee.
L'indagine analitica sugli effetti del cambiamento climatico, negli scenari di previsione futuri, si è basata su una specifica area climatica, ovvero la Regione del Mediterraneo. Ciò è dovuto al fatto che, per indirizzare azioni progettuali e tecnologiche e metodi di valutazione prestazionale, è necessario conoscere il contesto ambientale-climatico di riferimento, oggi più che mai soggetto a variazioni repentine e intense.
Per questo motivo, lo studio sull'intensificazione degli eventi estremi, effettuato utilizzando software di simulazione, ha riguardato la penisola italiana e quella iberica, al fine di attuare un quadro di confronto e definire quali i sono i principali fenomeni che l'involucro edilizio e, in particolare le facciate, dovrà *subire*.
Gli scenari di previsione, sia per l'Italia che per la Spagna, rilevano che, temperature estreme, precipitazioni intense e vento estremo, saranno gli eventi di cambiamento climatico da considerare nei processi di progettazione e valutazione prestazionale degli involucri.
Ed è su questi tre principali fattori che sono calibrate le attività delle varie fasi della ricerca.
Questo aspetto, rilevante per le azioni della ricerca, individua nella complessa interazione *involucro edilizio-cambiamento climatico*, uno degli obiettivi finalizzati ad avanzare la conoscenza rispetto ai possibili inneschi di cambiamento climatico dovuti all'assetto prestazionale-tecnologico dell'involucro edilizio.
L'indagine dello stato dell'arte rileva infatti che i principali studi su questa tematica, si spingono sulla conoscenza degli effetti del cambiamento climatico sugli involucri edilizi e sull'individuazione di possibili soluzioni per mitigare questa problematica e non considerano come invece l'involucro possa amplificare gli effetti del cambiamento climatico, con la conseguente perdita in termini prestazionali per l'involucro.
Queste considerazioni rientrano in un'*innovata lettura dinamica* proposta dalla ricerca e definita con la declinazione "Building envelope *versus* Climate change", mettendo in evidenza la necessità di un'analisi accurata, quindi una corretta modalità di valutazione prestazionale degli involucri edilizi, che sia in grado di prevedere da un lato il livello di risposta ad un dato evento estremo o la sua amplificazione, dall'altro di mantenere la funzionalità e di limitare così il livello di decadimento prestazionale dell'intero sistema.
Questa considerazione, conduce la ricerca ad analizzare, nel campo dei componenti, sistemi e materiali che costituiscono l'involucro edilizio, i concetti di adattività che rappresentano una delle strategiche frontiere di innovazione tecnologica.
L'involucro, difatti, svincolandosi dalla funzione singola di barriera con l'ambiente esterno, è dotato di meccanismi che lo rendono *adattivo*, acquisendo così la capacità di gestire e mantenere il suo funzionamento prestazionale e reagire in modo positivo rispetto a sollecitazioni climatiche esterne. Non essendo uno degli obiettivi della ricerca quello di ampliare la trattazione sull'adattività degli involucri edilizi, l'analisi si restringe sull'individuazione di materiali innovativi quali gli *smart materials*, che non hanno bisogno di complessi meccanismi di attuazione per generare una risposta ad uno stress, in quanto la loro adattività è basata sulle capacità intrinseche del materiale di cui sono costituiti. Lo studio degli smart materials per la ricerca è considerato un supporto conoscitivo sulle attuali tendenze di innovazione degli involucri e un *input* per indirizzare future strategie di adattamento degli involucri in risposta agli eventi estremi messi in evidenza per la Regione del Mediterraneo.

Nel prosieguo dell'indagine analitica sull'adattività degli involucri edilizi, viene messo in evidenza un *limite* della ricerca stessa, in riferimento alla difficoltà di valutare le caratteristiche adattive. Queste, non essendo supportate da un apparato tecnico e normativo specifico, fanno riferimento alle prestazioni singole del componente adattivo e non alla completa messa a sistema che dovrebbe definire il carattere adattivo complessivo dell'involucro edilizio. Questa problematica si delinea dal fatto che le variabili che entrano in gioco nella valutazione prestazionale sono molteplici e diversificate tra loro ed hanno bisogno di specifici parametri, unità di misura per essere caratterizzate e, soprattutto, di strumentazioni e attrezzature, formule e metodologie idonee per misurarle. In aggiunta, se i componenti adattivi sono soluzioni per contrastare gli stress derivanti dal cambiamento climatico, appare indispensabile misurare e validare il loro funzionamento adattivo in relazione agli eventi estremi.

D'altro canto, questa *criticità* riscontrata ha rappresentato per la ricerca, un *punto di svolta* per la validazione delle azioni applicative intraprese successivamente nella fase sperimentale. L'attenzione si concentra sulle prestazioni delle facciate continue secondo due aspetti messi in evidenza dalla fase analitica:

- il primo fa riferimento al fatto che le superfici trasparenti sono considerate altamente vulnerabili agli impatti climatici, con la conseguente richiesta di un controllo del flusso termico e luminoso e di un controllo costante riferito a un flusso d'aria e d'acqua;

- il secondo aspetto specifica che le facciate continue sono il principale *elemento* su cui vengono applicate le tecnologie adattive per le quali si richiede lo sviluppo di tecniche di modellazione, simulazione e testing in modo tale da avere risultati prestazionali affidabili e condivisi dagli stakeholder del settore e della comunità scientifica.
La ricerca in oggetto si è posta quindi l'*obiettivo* di indagare nel campo delle facciate continue i possibili deficit e fallimenti che possono *subìre* a causa degli impatti di cambiamento climatico al fine di strutturare una metododologia applicativa per testare le reali performance quando queste sono sottoposte ad eventi estremi e, in particolare, verificare il loro comportamento prestazionale flessibile.

La motivazione che spinge l'indagine analitica ad avere come oggetto di studio le facciate continue si dispiega dal fatto che il settore della progettazione e produzione dei sistemi di facciata continua è in costante crescita e l'innovazione si spinge verso la realizzazione di forme sempre più complesse in linea con le richieste di nuovi requisiti prestazionali.
Oltre a ciò, la letteratura di settore mette in evidenza che vi sono pochi studi ed esperienze limitate che affrontano la tematica dei deficit e fallimenti prestazionali dovuti al cambiamento climatico.
Questa indagine ha portato allo sviluppo di una *matrice sperimentale* sui degradi delle facciate continue in riferimento agli eventi estremi analizzati individuando i seguenti criteri di prestazioni negative:
- *C.1_ Infiltrazioni d'acqua;*
- *C.2_ Perdite d'aria;*
- *C.3_ Degrado dei sigillanti e delle guarnizioni;*
- *C.4_ Degrado dei giunti di dilatazione.*

La matrice sperimentale è pensata come un possibile strumento implementabile e potrebbe costituire la base di un report tecnico quando si verificano le prestazioni delle facciate, e servire da supporto agli attori della progettazione, produzione e installazione per il corretto funzionamento dei sistemi di facciata continua.

Uno spunto per *prospettive future di sviluppo della ricerca*, può essere rappresentato dal fatto che la scheda può essere immessa in programma di modellazione come il BIM, fornendo le indicazioni dei degradi più ricorrenti delle facciate, mettendo anche in evidenza quali tipologie di prodotti quali sigillanti, guarnizioni falliscono più velocemente rispetto quanto indicato dalla produzione. In un software, la scheda potrebbe essere implementata con informazioni a livello dimensionale di una facciata continua, orientando la progettazione verso soluzioni ottimali che rispecchiano le azioni correttive proposte.
Indipendentemente dalla causa del fallimento, si mette in evidenza l'importanza dell'indagine attraverso attività di testing specifiche per ciascuna delle potenziali cause identificate al fine di dare una corretta misura delle prestazioni delle facciate continue.

Come è noto, le facciate continue, prime di essere immesse nel mercato produttivo, devono essere validate a livello prestazionale in termini di requisiti da asseverare e certificate mediante attività di prove normate, sia in ambito europeo che americano.
In generale, le prove principali sono relative all'infiltrazione all'aria e alla tenuta all'acqua in regime statico e, se richiesta in regime dinamico. Le prove di resistenza al carico da vento e a temperature elevate, ovvero i cicli termici, sono considerate prove aggiuntive rispetto i test standard sopra menzionati. Questo aspetto viene considerato un *limite* di tipo normativo e procedurale che ha consentito di avviare in maniera critica le successive azioni analitiche e sperimentali della ricerca.
Nello specifico, le attività di prova condotte su porzioni di facciate continue, detti mock-up, possono essere svolte sia in laboratori di prova specializzati (off-site) sia in cantiere (on-site). Dunque, l'opportunità di disporre di un laboratorio di testing avanzato, la Sezione TCLab del Building Future Lab, sembra essere un'occasione fertile per nuove sperimentazioni di processi e metodi al fine di raggiungere l'obiettivo di strutturare un'efficace metodologia che sia in grado di verificare il funzionamento prestazionale delle facciate continue rispetto agli eventi estremi analizzati per la Regione del Mediterraneo.
Per questi motivi, l'analisi sui possibili deficit effettuata su 4 mock-up di facciate continue (della tipologia a montanti e traversi e a cellula) si è avvalsa di un'indagine diretta sul campo ed è avvenuta tramite attività di prova, secondo procedure di prova normate, svolte in cantiere, grazie al supporto operativo dei tecnici specializzati del laboratorio IRCCOS s.r.l. dove si è svolto un periodo di stage, e presso la Sezione TCLab.
Il quadro prestazionale che ne risulta ha messo in evidenza che la principale causa di fallimenti prestazionali è l'infiltrazione d'acqua, che può essere causata da danneggiamenti ai componenti principali e *delicati* dei sistemi di facciata continua quali, giunti, guarnizioni e sigillature.
L'esperienza condotta ha permesso di maturare e avanzare le conoscenze sia sulla preparazione dei mock-up di facciata continua nelle condizioni di assetto per avviare le procedure di prova, sia di acquisire competenze sulle specifiche normative procedurali per l'esecuzione dei test e sulla redazione dei report tecnici che attestano i requisiti prestazionali delle facciate continue collegate alle prove effettuate.

Una *criticità* che viene riscontrata dalla conduzione delle attività di testing è che, seguendo procedure di prova in linea con la normativa di riferimento, queste non fanno riferimento ad un contesto climatico preciso e ai diversi effetti di cambiamento climatico, i cui impatti possono amplificare i danni sulle superfici esterne delle facciate continue.
Tuttavia, il superamento di questi test non assicura che le prestazioni di durata del sistema siano le stesse dei risultati del test, in quanto le prove vengono effettuate su porzioni di facciata continua in cantiere o su mock-up in laboratorio che sono stati costruiti per essere testati e non necessariamente installati.
Riprendendo le considerazioni analitiche definite dalla declinazione "Building envelope *ver-*

sus Climate change" - in cui le cui superfici esterne delle facciate continue sono maggiormente esposte alle sollecitazioni climatiche esterne e in grado di amplificare gli impatti che si generano in uno specifico contesto - lo studio della relazione che si instaura tra la facciata continua e il suo contesto di appartenenza porta quindi ad una revisione sistematica sulle modalità di misurazione e conseguente valutazione critica dei dati, spostando le questioni delle performance lontane dalle tradizionali proprietà fisiche e statiche delle facciate continue ad un discorso più ampio nella definizione di come queste realmente si comportano in regime di cambiamento climatico.
In ragione di quanto analizzato, si può denunciare che è il percorso della ricerca stesso a *dettare* le fasi sequenziali e metodologiche e di conseguenza le varie attività successive della ricerca. L'indagine condotta su facciate continue della tipologia unitized e styck system, mediante attività di testing e secondo le normative di prove europee e americane, pone le basi alle attività successive della ricerca, cioè quelle di affiancare o implementare alle procedure standard delle prove aggiuntive e delle modifiche rispetto alle soglie prestazionali garantite da normative, al fine di verificare e validare un alto livello di qualità prestazionale nelle condizioni di esercizio delle facciate continue in regime di cambiamento climatico, nello specifico per temperature estreme, precipitazioni intense e intensificazione del carico da vento.

Ai fini degli obiettivi della ricerca, l'analisi su un caso studio di facciata continua avvia la fase sperimentale della ricerca in modo tale da strutturare una procedura che possa guidare la verifica prestazionale delle facciate continue, sviluppando delle metodologie di prove ad hoc per misurare il loro funzionamento prestazionale di risposta flessibile e la resistenza delle facciate continue agli effetti derivanti dal cambiamento climatico per la Regione del Mediterraneo.
Il carattere sperimentale della ricerca è caratterizzato da un'attività di collaborazione sinergica con l'azienda *Cianciolo Group s.r.l.*, leader nella progettazione dei sistemi di facciata continua a livello internazionale, attraverso la quale è stato possibile avviare il processo di design che ha portato alla progettazione e alla costruzione di un mock-up di facciata continua della tipologia a cellula in scala 1:1, da caratterizzare a livello prestazionale secondo eventi estremi di cambiamento climatico per la Regione del Mediterraneo.
Il contributo dell'azienda nelle attività operative ed applicative della ricerca ha apportato un'influenza significativa e positiva sull'acquisizione di informazioni di base, dettagli specifici (a livello tecnologico-produttivo) e problematiche incidenti sulle facciate continue. In aggiunta, la continua interlocuzione tra l'azienda e la Sezione del laboratorio di prove TCLab ha avuto un effetto e quindi un *riverbero* importante e strategico sul processo delle attività e dei risultati stessi della ricerca.
Per queste ragioni, la specificità di questo lavoro dovrebbe facilitare la creazione di nuovi strumenti e processi progettuali che agiscano sull'ambiente costruito, affidando alla ricerca e alla progettazione (mondo accademico e mondo industriale) il compito di migliorare le prestazioni e la risposta degli involucri edilizi.
Nello specifico, la fase sperimentale condotta sul mock-up si costruisce secondo due approcci:
- il primo fa riferimento alla verifica prestazionale del mock-up mediante software di progettazione parametrica;
- il secondo si riferisce alle attività di testing condotte presso la Sezione TCLab.

La volontà di adottare ambedue gli approcci è dettata dal fatto che gli strumenti di simulazione e testing, oggi sempre più interconnessi, sembrano essere dei validi strumenti di misurazione di valutazione prestazionale in grado di prevedere ex-ante possibili deficit che possono compromettere il livello prestazionale dell'intero sistema.

Le attività di simulazione che caratterizzano la valutazione a livello termico del mock-up, sono state condotte attraverso il software parametrico Grasshopper di Rhinoceros.
L'analisi di simulazione ha messo in evidenza come le temperature superficiali interne ed esterne del mock-up, calcolate secondo gli scenari Italia e Spagna, risultano elevate e potrebbero causare non solo un discomfort interno ma anche un'amplificazione degli impatti derivanti da temperature estreme, come ondate e isole di calore. Questo fenomeno può essere innescato se già la temperatura dell'aria esterna è già elevata.
Tuttavia, la sola temperatura superficiale non può essere considerata un *indicatore robusto*, attraverso il quale caratterizzare in termini prestazionali il mock-up e questa *criticità* mette in evidenza i limiti dei software di simulazione nel verificare in termini reali le prestazioni del mock-up. Inoltre, i limiti critici sono legati alla fattibilità di non poter settare parametri climatici (ad esempio temperature esterne di picco superiori a quelle imposte dal software) che potrebbero dare informazioni aggiuntive *ex-ante* sulla risposta prestazionale del mock-up in scenari futuri di cambiamento climatico. Da ciò si deduce, l'impossibilità di un diretto confronto tra i dati risultanti le attività di simulazione con quelli derivanti dalle attività di testing, mettendo in evidenza la necessità di un up-grade delle funzionalità del software. Questo aspetto potrebbe incidere sulla corretta progettazione degli involucri edilizi e sugli eventuali deficit da prevenire, anche in termini di risparmio di risorse economiche.
Sebbene i software di simulazione siano dei validi strumenti per calcolare temperatura, direzioni del vento, questi non permettono di misurare le performance collegandole a variabili climatiche quali temperature estreme, precipitazioni intense e vento estremo che, per gli obiettivi della ricerca, rappresenta un *limite da superare*.
Questo limite viene superato attraverso le attività di testing condotte presso la Sezione TCLab, dotata di attrezzature e strumentazioni in grado di riprodurre sul mock-up eventi estremi di cambiamento climatico.
Rispetto tali considerazioni, il testing viene qui considerato come uno strumento di verifica in grado di indirizzare i risultati specifici della ricerca.
Partendo dalle considerazioni critiche messe in evidenza dagli step analitici condotti sui casi-studio di facciate continue, la ricerca si spinge sulla strutturazione di una metodologia procedurale di prova ad hoc per il mock-up, in grado di misurare le sue reali performance rispetto a sollecitazioni estreme come temperature estreme, precipitazioni intense e vento estremo.

Il *protocollo metodologico e sperimentale*, output della ricerca, che ne deriva per essere applicato al mock-up per la valutazione prestazionale, mette a sistema prove considerate standard dalla normativa in ambito americano e prove aggiuntive come la resistenza al carico da vento e i cicli termici.
Dalle attività di testing, infatti, è emerso che queste prove sono da considerarsi a tutti gli effetti *indicatori prestazionali* di cambiamento climatico per le facciate continue, e per questo motivo, non possono essere considerate prove aggiuntive ma potrebbero essere inglobate nelle procedure standard, per avere un chiaro quadro prestazionale e globale delle prestazioni di queste tipologie di involucri edilizi.
Questo *fattore risultante* per la ricerca, significa avanzare la conoscenza nell'ambito delle prestazioni delle facciate continue sottoposte ad eventi climatici estremi per verificarne il loro funzionamento di risposta flessibile e, al contempo, si mette in evidenza l'esigenza di aggiornare e implementare la normativa tecnica in materia sulla base di nuovi requisiti prestazionali imposti da fenomeni che diventeranno sempre più frequenti e intensi, rappresentando una *possibile linea di indagine futura per lo sviluppo della ricerca.*
Alla luce di tali considerazioni, le attuali tendenze del mercato delle facciate continue e dei serramenti (Cfr. Cap. 5) prevedono prospettive di crescita positiva, sottolineando l'esigenza di ottimizzarne la valutazione prestazionale poichè restano molteplici le variabili che en-

trano in gioco e che sono difficili da quantificare preventivamente. Il trend in positivo viene *assicurato* dalle continue richieste di testing e certificazione- in ambito nazionale e internazionale - su mock-up di facciate continue di diverse tipologie presso laboratori di prova specializzati (in questo caso si fa riferimento alla Sezione TCLab del BFL e IRCCOS s.r.l.)
Si intende in questo senso sottolineare che, la fase sperimentale e di verifica della ricerca vuole consolidare il rapporto tra mondo della ricerca con quello industriale per favorire l'attivazione di processi innovativi utili agli stakeholder del settore a sviluppare soluzioni tecnologiche in linea con i risultati della ricerca nell'ambito della relazione involucro edilizio-cambiamento climatico.

Per quanto concerne, i *risultati raggiunti* dalle attività di testing, in termini prestazionali del mock-up, si individua un comportamento flessibile del mock-up alle sollecitazioni estreme riprodotte. Tuttavia, un aspetto rilevante da sottolineare riguarda la prova dei cicli termici condotta sul mock-up. Questa ha messo in evidenza una criticità, ovvero che uno stress derivante dalle temperature estreme può provocare un innalzamento della temperatura superficiale esterna ed interna del mock-up, risultato in linea con le attività di simulazione tramite software. Visto che l'apporto termico degli attuali sistemi di facciata continua è nella maggior parte dei casi *regolato* dalle lastre di vetro, si ipotizza come possibile *sviluppo futuro della ricerca*, l'applicazione nell'intercapedine d'aria delle due lastre di uno smart material, in grado di controllare il flusso termico e luminoso, parametri che sono stati messi in evidenza dalla fase analitica della ricerca. Questa ipotesi di strategia adattiva potrebbe mitigare l'elevata temperatura superficiale esterna ed interna che si viene a creare, evitando di mettere a rischio l'equilibrio termico tra ambiente esterno ed interno.
Si delinea così una *traiettoria di ricerca futura* che deve essere in prima istanza, validata in termini geometrici e dimensionali e, in secondo luogo, analizzata attraverso un processo di verifica prestazionale. Difatti, il componente adattivo installato nel mock-up dovrà essere sottoposto allo stesso approccio di verifica utilizzato per il mock-up senza componente adattivo e che riguarda:
- attività di simulazione mediante software parametrico Grasshopper;
- attività di testing in laboratorio, mediante procedure di prova normate e sequenziali da protocollo metodologico,
al fine della misurazione della sua efficacia prestazionale, attuando un confronto delle prestazioni del mock-up senza e con il componente adattivo e, in ultimo, per una possibile fase di industrializzazione.

In conclusione, si intende esplicitare l'efficacia del protocollo metodologico e sperimentale come strumento in grado di verificare in termini reali le prestazioni del mock-up, se sottoposto a ripetute sollecitazioni estreme per la Regione del Mediterraneo e, in aggiunta, si esalta l'importanza delle attività di testing come *strumento di valutazione adattiva* e necessario per misurare le prestazioni a lungo termine dei sistemi di involucro, oggi più che mai sottoposte a variazioni di cambiamento climatico.
Questa affermazione intende rafforzare il concetto secondo il quale le procedure di prova dovrebbero essere *adattate* e articolate in base alla complessità dei sistemi da testare.
In questo contesto di attività sperimentale, il concetto di *adattività* - inteso come la possibilità di adeguare in modo flessibile i requisiti normativi a specifiche esigenze prestazionali-ambientali - qui associato e circoscritto alla metodologia di valutazione prestazionale sviluppata non è il solo a caratterizzarla bensì, si può ritenere che il protocollo può essere *implementabile* e *replicabile*.
Il primo concetto fa riferimento alla possibilità di includere nella procedura di prova, i test sismici per valutare la conformità prestazionale del mock-up di facciata continua alle sollecitazioni sismiche, visto l'alto grado di vulnerabilità della Regione del Mediterraneo.

Il secondo concetto fa riferimento alla caratteristica di replicabilità del protocollo metodologico, intesa come l'applicazione della medesima procedura di prova su altri mock-up di facciata continua per testare le loro performance tecnologiche, anche con piccoli accorgimenti e modifiche rispetto alle specifiche tecnologiche dei campioni da testare (viene ripreso in tal senso il concetto di adattività).
Questi aspetti tracciano il terreno per *futuri scenari di sperimentazione*.
Si può infatti ipotizzare di applicare la metodologia di prova su mock-up di facciata continua in relazione alla scalabilità di altre soluzioni tecnologiche: un'altra tipologia di sistema (montanti e traversi) o della stessa tipologia, a cellula, ma con diversa natura geometrica-dimensionale diversa.
Ad esempio nella fase *ex-post* della presente ricerca, si potrebbe testare il comportamento di una facciata continua con angolo di 90° - e verificare non solo le sue performance in regime di cambiamento climatico, ma la validità, in termini di metodologia, del protocollo su un altro caso studio e, quindi estendere ed implementare i risultati della presente ricerca.
La variazione geometrica potrebbe infatti influenzare i risultati ottenuti, poichè l'angolo di 90° potrebbe essere un punto critico del sistema dove si potrebbero verificare infiltrazioni d'acqua (anche se non è possibile stimare la componente di errore dovuta alla posa in opera di un ipotetico mock-up).
Due aspetti problematici da dover considerare e superare riguardano sia il test per la tenuta all'acqua in regime statico e sia il test dei cicli termici.
Come visto precedentemente (Cfr. Cap.7), per il test della tenuta all'acqua sotto regime statico, viene utilizzata una griglia sprinkler (dove sono posizionati gli ugelli per spruzzare acqua) che viene fatta scorrere sulla facciata del mock-up a somiglianza di una tapparella.
Tuttavia, se il mock-up da testare presenta un angolo di 90°C, la griglia sprinkler, per la sua natura geometrica-dimensionale, non può essere utilizzata e, per questo motivo, dovrà essere costruita un nuovo sistema sprinkler che si *adatta* alla nuova configurazione geometrica del mock-up da testare.
Stesse considerazioni valgono per la camera termica, apparecchiatura utilizzata per il test dei cicli termici. Difatti, la camera termica, per il suo corretto funzionamento, viene fatta scorrere su dei binari e apposta sulla facciata esterna del mock-up da testare. Quindi, per un mock-up con angolo di 90° occorrerà realizzare una nuova camera termica e progettare un sistema impiantistico da collegare a quello della camera esistente per ottenere i cicli di riscaldamento/raffreddamento della temperatura sul mock-up. Inoltre, essendo un sistema sperimentale, il raggiungimento della temperatura a +80°C/-15°C per i 3 cicli, dovrà essere monitorato tramite delle termocoppie applicate sulla facciata esterna del mock-up e collegate ad una centralina che registra i dati.
Queste considerazioni delineate per future prospettive di ricerca sperimentale, sottolineano, da un lato, l'esigenza di un continuo *adattamento* delle apparecchiature di testing per nuovi assetti tecnologici dei sistemi di facciata continua per un mercato in costante crescita, dall'altro l'importanza di ampliare e disseminare nella comunità scientifica nuove metodologie di valutazione prestazionale e supportare gli attori coinvolti nei processi di progettazione e certificazione. Questo aspetto porta ad esplorare ed indagare nuovi connotati tecnologici e prestazionali per sistemi di facciata continua in una realtà di processo e di produzione industriale che non solo sta caratterizzando l'innovazione degli ultimi anni ma, soprattutto, caratterizzerà quella dei prossimi decenni.
In ultima analisi e a sostanza di quanto detto sul p*ercorso della ricerca* che conduce alla fase sperimentale, si vuole mettere in evidenza come sia necessario da un lato, un aggiornamento delle procedure di prova, dall'altro un up-grade delle strumentazioni di rilevazione fenomenologica che consentano, vista la complessità tecnologica degli involucri edilizi e, nello specifico delle facciate continue, di *misurare il comportamento reale* in relazione ad un cambiamento, che non torna indietro; in questo caso, il cambiamento climatico.

Connessioni della ricerca al settore di Innovazione S3 Smart Specialization Strategy Calabria

Le attività teoriche ed applicative-operative, caratterizzanti il percorso di ricerca dottorale, hanno sviluppato interconnessioni con specifico riferimento alle tematiche delineate dalla *Smart Specialization Stategy S3* Calabria e agli obiettivi dell'area di innovazione *Edilizia Sostenibile*, che poggia le basi sull'individuazione di nuove tecnologie e materiali per la gestione di rischi ed emergenze, per l'efficientamento energetico con il fine ultimo di sviluppare un "sistema di edilizia sostenibile e innovativo". Il quadro generale evidenzia che il mercato delle costruzioni chiede alle imprese di considerare nuovi elementi di competitività, di innovazione e di tecnologie con performance più elevate rispetto ad un quadro normativo sempre più stringente. Di fronte alle problematiche energetiche ed ambientali, dovute in larga misura ai cambiamenti climatici, la ricerca indaga e approfondisce le tematiche legate ai nuovi requisiti prestazionali che l'involucro deve asseverare rispetto a contesti ambientali in continuo mutamento. Il contesto analizzato è quello della Regione del Mediterraneo, dove si intensificheranno i fenomeni relativi a innalzamento delle temperature, precipitazioni intense e intensificazione del carico da vento.
Difatti, in relazione ai cambiamenti climatici, alla crescita dell'attenzione dei professionisti per quanto riguarda le tematiche ambientali e all'evoluzione della normativa in materia di risparmio energetico e consumo di risorse, ha portato molti operatori del settore "ambiente-energia e costruzione", ad individuare proprio nell'*involucro edilizio* un elemento essenziale per il progetto ai fini della riduzione dei consumi energetici e delle strategie di adattamento e mitigazione ai cambiamenti climatici. L'esigenza di rispondere in modo adattivo e flessibile a sollecitazioni esterne, individua nell'involucro edilizio e, in particolare, nelle facciate continue, un elemento essenziale nella gestione di flussi energetici e materici.
È proprio questa esigenza che porta alla necessità di sviluppare sistemi di facciata che garantiscano prestazioni flessibili e adeguate alle condizioni climatiche esterne, soprattutto in un'area sensibile come quella della Regione del Mediterraneo.
Gli aspetti di connessione derivanti dai risultati della fase sperimentale della ricerca - collocati all'interno della traiettoria tecnologica e di sviluppo *Edilizia Sostenibile* - rappresentano dei punti di forza in una duplice chiave di lettura innovativa: il primo si riferisce all'utilizzo di software di simulazione, in coerenza con la tecnologia della strategia "*Software di ausilio alla progettazione. Misurazione fabbisogno energetico, programmazione dell'illuminazione, scambiatori di calore, ventilazione, simulazione ombreggiamento",* per lo studio analitico sul comportamento termico dell'involucro edilizio in modo tale da implementare l'utilizzo dei software nei processi di progettazione edilizia per definire soluzioni tecnologiche in coerenza con un contesto ambientale di riferimento; la seconda connessione si realizza attraverso la possibilità di trasferimento tecnologico rappresentata dalla Sezione TCLab del Building Future Lab, laboratorio che contribuisce al rafforzamento delle infrastrutture di ricerca sottolineato anche all'interno della Strategia S3.
Le attività di sperimentazione in laboratorio, oggi più che mai indispensabili per la filiera produttiva, sottolineano l'importanza di una corretta verifica delle prestazioni degli involucri edilizi al fine di assicurare una corretta gestione delle risorse energetiche e al, contempo, promuovere il monitoraggio e la manutenzione. Questi aspetti sono fondamentali per i sistemi abitativi mediterranei, considerati vulnerabili rispetto ad un contesto climatico variabile e in relazione a nuovi requisiti ambientali-energetici che gli stakeholder del settore devono recepire nei processi di innovazione tecnologica e prestazionale dell'involucro.
La ricerca, specificando i requisiti che l'involucro deve possedere e verificati tramite azioni operative e sperimentali in laboratorio, vuole rappresentare un input per lo sviluppo di nuove soluzioni tecnologiche e il trasferimento dei risultati nel settore delle costruzioni, settore cardine per la traiettoria di innovazione *Edilizia Sostenibile*.

Connessioni della ricerca al Progetto Metabuilding Labs (Horizon 2020)

La ricerca rintraccia aspetti di connessione all'interno del *Progetto Metabuilding Labs* di Horizon 2020, poichè la Sezione TCLab del BFL, dove è stata svolta la fase sperimentale e di verifica della ricerca, è uno dei 40 Partner individuati per la creazione della "*Rete Europea di stutture di prova e servizi di innovazione per le tecnologie e i prodotti nuovi per l'involucro edilizio*". Gli obiettivi del progetto intendono contribuire al miglioramento della qualità tecnica e ambientale nel settore delle costruzioni in Europa, facilitando, per il settore industriale, l'accesso a strutture laboratoriali e specializzate per la prototipazione, la verifica e la certificazione dei sistemi, componenti e materiali per l'involucro.

Per una maggiore esplicitazione dei concetti chiave di connessione tra ricerca e progetto, si riportano le Task dei WP coinvolte nella fase applicativa-sperimentale della ricerca:
- Per il WP6, la task coinvolta è *To6.03 "Envelope components development, prototypes and O3BET installation and testings"*: le attività sperimentali sono in diretta sinergia con questa task, in quanto sono state effettuate procedura di prova su un mock-up di faccita continua, che rappresenta uno dei sistemi più utilizzati nel mercato produttivo delle costruzioni, per validare le sue prestazioni a test normativi. Visto che l'obiettivo della Task è lo sviluppo di nuove soluzioni tecnologiche per l'involucro da testare in ambiente reale, anche attraverso ulteriori test per dimostrare pienamente le prestazioni delle tecnologie, questo risulta in linea con lo sviluppo della procedura di prova strutturata all'interno del protocollo metodologico e sperimentale.
L'individuazione degli indicatori delle prestazioni di resistenza al carico del vento e alle temperature estreme, attraverso il test dei cicli termici, intendono supportare lo sviluppo di nuovi requisiti prestazionali da testare per gli involucri edilizi al fine di massimizzare il controllo tecnologico-ambientale. In aggiunta, se si prende in considerazione il funzionamento adattivo dell'involucro di fronte agli impatti di cambiamento climatico, il protocollo acquista maggiore rilevanza, in quanto vengono gettate le basi per una procedura di prova che potrebbe essere validata in ambito normativo, per determinare le prestazioni a lungo termine degli involcri in relazione al clima che cambia;
- Per il WP8, la task coinvolta è *To8.01 "MBLabs approach to standardization, regulation across EU"*: secondo due risultanti. Il primo è in linea con lo scenario presentato nella task precedente sull'esigenza di aggiornare e standardizzare nuove procedure di prova in ambito tecnico-normativo e uniformare in tal modo, i test che vengono effettuati dai laboratori di prova specializzati e allinterno della rete Metabuildings Lab.
Il secondo si rintraccia nell'elaborazione della matrice sperimentale sui possibili deficit prestazionali delle facciate continue, che rappresenta una possibile guida di riferimento utile ai progettisti consentendo il supporto per il miglioramento della caratterizzazione tecnologica dei sistemi di involucro. Le indicazioni dei degradi più ricorrenti delle facciate, intendono mettere anche in evidenza quali tipologie di elementi e componenti, quali sigillanti, guarnizioni falliscono più velocemente rispetto quanto indicato dalla produzione, in modo tale da indirizzare una scelta tecnologica efficiente, che sarà successivamente testata nella sua messa a sistema, attraverso procedure di prove normate.

In ragione di quanto sopra riportato, le connessioni della ricerca al Progetto Metabuildings Labs, intendono supportare la condivisione dei risultati raggiunti in un più ampio scenario tecnico e scientifico, proponendo nuovi spunti di innovazione nel'ambito del testing.
In conclusione, si specifica che, i risultati (sottoforma di report tecnici) dell'attività sperimentale svolta in laboratorio in riferimento alle Task dei WP specifici, sono stati riportati all'interno della piattaforma del progetto denominata *Project Netboard*, di facile accesso ai vari Partner, al fine di attuare la disseminazione degli aspetti innovativi della ricerca.

Figg. pagina accanto:
- vista interna cellule;
- vista esterne cellule n. 1 e 2 piano primo;
- vista interna del mock-up nell'assetto di prova sperimentale di tenuta all'acqua dinamica;
- vista esterna del mock-up nell'assetto di prova sperimentale di tenuta all'acqua dinamica.








IT 14210 E
iteco

Bibliografia

Il percorso della ricerca è stato accompagnato da un'indagine bibliografica costante al fine di tracciare gli aspetti delle innovazioni tecnologiche rispetto l'involucro edilizio e aggiornare i rapporti e direttive specifiche in materia di clima e ambiente. Una parte dell'indagine bibliografica ha riguardato le prestazioni delle facciate continue e gli strumenti per le attività di simulazionee di testing, dovendo strutturare una metodologia di valutazione delle prestazioni del mock-up, in regime di cambiamento climatico.
Si è pensato di strutturare i riferimenti in tre sezioni, al fine di quadro bibliografico di facile consultazione:

1. *Riferimenti bibliografici*, suddividi per capitolo della tesi di dottorato e per tematica affrontata;
2. *Riferimenti sitografici*, rispetto a report, articoli scientifici e informazioni reperibili in rete;
3. *Riferimenti tecnico-normativi*, sui requisiti progettuali e sulle attività di testing delle facciate continue.

1. Riferimenti bibliografici

Capitolo 1 *Quadro di riferimento*_I cambiamenti climatici: cause, impatti e strategie di intervento

Cambiamenti climatici e Ere geologiche

Auchmann, R., Brönnimann, S., Breda, L., Bühler, M., Spadin, R., & Stickler, A. (2012). Extreme climate, not extreme weather: the summer of 1816 in Geneva, Switzerland. *Climate of the Past*, 8(1), pp. 325-335 DOI:10.5194/cp-8-325-2012

Bougleux, E. (2017). Incertezza e cambiamento climatico nell'era dell'Antropocene. *EtnoAntropologia*, 5(1), p. 79-94. ISSN 2284-0176

Burke, K. D., Williams, J. W., Chandler, M. A., Haywood, A. M., Lunt, D. J., & Otto-Bliesner, B. L. (2018). Pliocene and Eocene provide best analogs for near-future climates. P*roceedings of the National Academy of Sciences*, 115(52), pp. 13288-13293.ù

Mauelshagen, F. (2018). I cambiamenti climatici. Il caso della piccola era glaciale. Gnosis, *Rivista Italiana di intelligence*, Vol. 3, p. 67-75. Online: https://gnosis.aisi.gov.it/Gnosis/Rivista56.nsf/ServNavig/56-27.pdf/$File/56-27.pdf?openElement Consultato il: 5 marzo 2022

Orombelli, G. (2005). Cambiamenti climatici. *Geografia Fisica Dinamica Quaternaria*. Suppl. VII (2005), pp.15-24.

Schurer, A. P., Hegerl, G. C., Luterbacher, J., Brönnimann, S., Cowan, T., Tett, S. F., ... & Timmreck, C. (2019). Disentangling the causes of the 1816 European year without a summer. *Environmental Research Letters*, 14(9), 094019

Westerhold, T., Marwan, N., Drury, A. J., Liebrand, D., Agnini, C., Anagnostou, E., ... & Zachos, J. C. (2020). An astronomically dated record of Earth's climate and its predictability over the last 66 million years. *Science*, 369(6509), pp. 1383-1387.

Cambiamenti climatici e Fattore antropico

Beusch, L., Nauels, A., Gudmundsson, L., Gütschow, J., Schleussner, C. F., & Seneviratne, S. I. (2022). Responsibility of major emitters for country-level warming and extreme hot years. *Communications Earth & Environment*, 3(1), 1-7. DOI: 10.1038/s43247-021-00320-6

Galbiati, F. (2019). Incendi in Siberia e il concetto di "feedback climatico". *Icona Clima*, 01/08/2919. Online: https://www.iconaclima.it/salute-del-pianeta/temperature/incendi-in-siberia-e-il-concetto-di-feedback-climatico/ Consultato il: 29 novembre 2021

Harris, D. C. (2010). Charles David Keeling and the story of atmospheric CO2 measurements. *Analytical Chemistry*, Vol. 82, No. 19, October 1, 2010, pp. 7865–7870. DOI: 10.1021/ac1001492

Gethmann, C. F., Kamp, G., Knodt, M., Kröger, W., Streffer, C., von Storch, H., & Ziesemer, T. (2020). *Global Energy Supply and Emissions*. Springer International Publishing. ISBN: 978-3-030-55355-5

Liu, Z., Ciais, P., Deng, Z., Lei, R., Davis, S. J., Feng, S., ... & Schellnhuber, H. J. (2020). Near-real-time monitoring of global CO2 emissions reveals the effects of the COVID-19 pandemic. *Nature communications*, 11(1), pp. 1-12. DOI: 10.1038/s41467-020-18922-7

Liu, Z., Deng, Z., Zhu, B., Ciais, P., Davis, S. J., Tan, J., ... & Schellnhuber, H. J. (2022). Global patterns of daily CO2 emissions reductions in the first year of COVID-19. *Nature Geoscience*, 15(8), pp. 615-620. DOI: 10.1038/s41561-022-00965-8

Le Quéré, C., Jackson, R. B., Jones, M. W., Smith, A. J., Abernethy, S., Andrew, R. M., ... & Peters, G. P. (2020). Temporary reduction in daily global CO 2 emissions during the COVID-19 forced confinement. *Nature climate change*, 10(7), 647-653. DOI: 10.1038/s41558-020-0797-x

Nicolini, G., Antoniella, G., Carotenuto, F., Christen, A., Ciais, P., Feigenwinter, C., ... & Papale, D. (2022). Direct observations of CO2 emission reductions due to COVID-19 lockdown across European urban districts. *Science of the Total Environment*, 830, 154662. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154662

Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'neill, B. C., Fujimori, S., ... & Tavoni, M. (2017). The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. Global environmental change, 42, 153-168. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009

Wayne, G. P. (2014). Representative Concentration Pathways. *Skeptical science*, 24.

Wei, T., Wu, J., & Chen, S. (2021). Keeping track of greenhouse gas emission reduction progress and targets in 167 cities worldwide. *Frontiers in Sustainable Cities*, 3. DOI: 10.3389/frsc.2021.696381
Zucchetti, M. (2005). *L'origine antropica del cambiamento climatico*. Online: https://www.researchgate.net/profile/Massimo-Zucchetti-2/publication/293649261_L'origine_antropica_del_cambiamento_climatico/links/5733144a08ae298602dce068/Lorigine-antropica-del-cambiamento-climatico.pdf Consultato il: 20 gennaio 2022

Cambiamenti climatici e Report sui fondamenti scientifici

Arias, P. A., et alii (2021). Technical Summary. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC [Masson-Delmotte, V., et alii]. P. 63. Cambridge University Press, United Kingdom and New York. DOI:10.1017/9781009157896.002.

C3S. (2022). E*uropean State of the Climate 2021 Summary*. DOI: 10.21957/9d7g-hn83?

IPCC. (2013). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Accessed: 15 settembre 2021.

IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 151. ISBN 978-92-9169-143-2 Accessed: 7 maggio 2021

IPCC (2014). Annex II: Glossary [Mach, K.J., S. Planton and C. von Stechow (eds.)]. In: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. P. 118. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 117-130.

IPCC. (2021). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32. DOI: 10.1017/9781009157896.001. Accessed: 15 dicembre 2021

IPCC. (2022). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. DOI: 10.1017/9781009157926.001

IPCC. (2022). Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3–33, DOI:10.1017/9781009325844.001

IPCC (2022). Annex II: Glossary [Möller, V., R., van Diemen, J.B.R., Matthews, C., Méndez, S., Semenov, J.S., Fuglestvedt, A. Reisinger (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C., Roberts, M., Tignor, E.S., Poloczanska, K., Mintenbeck, A., Alegría, M., Craig, S., Langsdorf, S., Löschke, V., Möller, A., Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2897–2930. DOI: 10.1017/9781009325844.029

McKinsey & Company (2022). *Global Energy Perspective 2022*. Online: https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2022 Consultato il: 22 settembre 2022

NOAA. (2022). *State of the Climate: Monthly Global Climate Report for Annual 2021*. Published online January 2022, retrieved on October 3, 2022. Online: https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202113#ref Consultato il: 2 luglio 2022

Stocker, T. F., Clarke, G. K., Le Treut, H., Lindzen, R. S., Meleshko, V. P., Mugara, R. K., ... & Holtslag, A. A. M. (2001). Physical climate processes and feedbacks. In *IPCC, 2001: Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (pp. 417-470). Cambridge University Press.

United Nation General Assembly UNGA. (2016). *Report of the open-ended intergovernmental expert working group on indicators and terminology relating to disaster risk reduction*, pp. 1-41. UNGA, New York. 16-21184 (E) 091216 Consultato il: 9 ottobre 2022 United Nations Environment Programme (2021). Adaptation Gap Report 2020. Nairobi.

Online: https://www.unep.org/resources/adaptation-gap-report-2020 Consultato il: 23 aprile 2022

Climate Resilient Development e Adattamento climatico

Brooks, N., & Adger, W. N. (2005). Assessing and enhancing adaptive capacity. Adaptation policy frameworks for climate change: *Developing strategies, policies and measures*, pp. 165-181.

Kim, Y., Smith, J. B., Mack, C., Cook, J., Furlow, J., Njinga, J. L., & Cote, M. (2017). A perspective on climate-resilient development and national adaptation planning based on USAID's experience. *Climate and Development*, 9(2), 141-151. DOI: 10.1080/17565529.2015.1124037

Nik, V. M., Perera, A. T. D., & Chen, D. (2021). Towards climate resilient urban energy systems: a review. *National Science Review*, 8(3), nwaa134. DOI: 10.1093/nsr/nwaa134

Watkiss, P. (2015). *A review of the economics of adaptation and climate-resilient development*. Online: https://www.lse.ac.uk/GranthamInstitute/wp-content/uploads/2015/09/Working-Paper-205-Watkiss.pdf Consultato il: 23 aprile 2022

Werners, S. E., Sparkes, E., Totin, E., Abel, N., Bhadwal, S., Butler, J. R., ... & Tebboth, M. G. (2021). Advancing climate resilient development pathways since the IPCC's fifth assessment report. *Environmental Science & Policy*, 126, 168-176.DOI: 10.1016/j.envsci.2021.09.017

Direttive Europee e Adattamento climatico

European Environment Agency EEA (2013). *Executive summary IT. Adattamento al cambiamento climatico in Europa*. EEA Report No 3/2013, pp. 1-4. Onlive avaible at: https://www.eea.europa.eu/it/publications/adattamento-al-cambiamento-climatico-in Consultato il: 15 febbraio 2022

European Commission EC (2021). COMUNICAZIONE DELLA COMMISSIONE AL PARLAMENTO EUROPEO, AL CONSIGLIO, AL COMITATO ECONOMICO E SOCIALE EUROPEO E AL COMITATO DELLE REGIONI *Plasmare un'Europa resiliente ai cambiamenti climatici – La nuova strategia dell'UE di adattamento ai cambiamenti climatici.* Online: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=COM%3A2021%3A82%3AFIN Consultato il: 3 febbraio 2022

European Commission EC European Environment Agency EEA (2022). *Climate-ADAPT strategy 2022-2024 — Sharing knowledge for a climate-resilient Europe*. pp. 1-13. Online avaible at: https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/about/climate-adapt-strategy-2022-2024-final.pdf Consultato il: 18 settembre 2022

Framework Convention on Climate Change FCCC (2021). *Nationally determined contributions under the Paris Agreement. Revised synthesis report by the secretariat*. FCCC/PA/CMA/2021/8/Rev.1 pp. 1-42. United Nations. Consultato il: 9 ottobre 2022

Global Commission on Adaptation GCA. (2019). *Adapt Now: A Global Call for Leadership on Climate Resilience. Global Center on Adaptation and World Resources Institute*. Online: https://gca.org/wp-content/uploads/2019/09/GlobalCommission_Report_FINAL.pdf Consultato il: 13 giugno 2022

Organizzazione delle Nazioni Unite ONU (2015). *Risoluzione adottata dall'Assemblea Generale il 25 settembre 2015. Trasformare il nostro mondo: l'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile*. A/RES/70/1, pp. 1-35

Gestione dei rischi e Adattamento per i cambiamenti climatici

Budolfson, M., Dennig, F., Errickson, F., Feindt, S., Ferranna, M., Fleurbaey, M., ... & Zuber, S. (2021). Protecting the poor with a carbon tax and equal per capita dividend. *Nature Climate Change*, 11(12), pp. 1025-1026. DOI: 10.1038/s41558-021-01228-x

Eckstein, D., Künzel, V., & Schäfer, L. (2021). *Global climate risk index 2021. Who Suffers Most from Extreme Weather Events, 2000-2019*. Germanwatch e.V. ISBN 978-3-943704-84-6

Leone, M. F. (2020). Adattamento climatico e gestione del rischio. In: *Adattarsi al clima che cambia. Innovare la conoscenza per il progetto ambientale*. Lucarelli, M. T., Rigillo, M., Losasso, M., & Valente, R. (2020). Pp. 83-88. Maggioli Editore ISBN 8891643186

Mandaglio, M., Musarella, M. (2020). Indicatori di impatto. In Losasso, M., Lucarelli, M. T., Rigillo, M., & Valente, R. (a cura di) (2020). *Adattarsi al clima che cambia Innovare la conoscenza per il progetto ambientale*. pp. 71-76. ISBN 9788891643193

SNPA (2021). *Rapporto sugli indicatori di impatto dei cambiamenti climatici – Edizione 2021. Report SNPA 21/2021*. ISBN 978-88-448-1058-0

Resilienza e Adattamento per i cambiamenti climatici

AA.VV. (2014). L'adattamento per la città resiliente. Progetto BlueAp, Bologna e il cambiamento climatico. *Rivista EcoScienza*, Vol. 5/2014, pp. 75-93. Online: http://www.comune.bologna.it/sites/default/files/documenti/BlueAp.pdf Consultato il: 23 marzo 2021

C40 (2021). *C40 Annual Report 2021*. Online: https://www.c40.org/about-c40/ Consultato il: 11 ottobre 2022

Gancheva, M., O'Brien, S., Tugran, T., & Borrett, C. (2020). *Adapting to climate change: Challenges and opportunities for the EU local and regional authorities*. European Union. Pp. 1-107. ISBN: 978-92-895-1058-5; doi:10.2863/154554

Holling, C.S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual review of ecology and systematics*. Vol. 4, pp. 1-23. https://www.jstor.org/stable/2096802

Lucarelli, M. T., D'Ambrosio, V. & Milardi, M. (2017). Resilenza e adattamento dell'ambiente costruito. In Antonini, E., & Tucci, F. (eds). *Architettura, Città e Territorio verso la Green Economy*. (2017) Edizioni Ambiente, Milano. ISBN: 978-88-6627-216-8

Lucarelli, M. T. (2018). Verso una nuova centralità ecologica dell'ambiente costruito. *Eco Web Town*, (18), pp. 7-12. ISSN: 2039-2656

Lucarelli, M. T., & Rigillo, M. (2018). Resilienza e cultura tecnologica: la centralità del metodo. *Techne*, 15, pp. 60-64. DOI: 10.13128/Techne-23204

Maragno, D. (2018). I*ct, resilienza e pianificazione urbanistica: per adattare le città al clima*. 1-215. FrancoAngeli Editore. EAN: 9788891785374

Nelson, D. R., Neil Adger, W., & Brown, K. (2007). Adaptation to Environmental Change: Contributions of a Resilience Framework. *Annual Review of Environment and Resources*, 32:1, pp. 395-419. DOI: 10.1146/annurev.energy.32.051807.090348

Tucci, F. (2019). Inquadramento e approccio: cambiamenti climatici, strategie di adattamento e prospettive di resilienza nel futuro delle green city. In [Responsabile scientifico: Prof. Arch. Ph.D. Fabrizio Tucci, Gruppo di lavoro: Arch. Ph.D. Alessia Caruso, Arch. Ph.D. Gaia Turchetti con Arch. Ph.D. Valeria Cecafosso]. A*dattamento ai cambiamenti climatici di Architetture e Città 'Green' per migliorare la resilienza dell'Ambiente Costruito. Minacce, vulnerabilità, rischi, Assi strategici, indirizzi, azioni d'intervento*. pp. 5-13. Green City Network e Università Sapienza di Roma.

Progettazione architettonica e Adattamento per i cambiamenti climatici

Del Grosso, A. E., & Basso, P. (2010). Adaptive building skin structures. *Smart Materials and Structures*. 19(12). DOI: 10.1088/0964-1726/19/12/124011

Leone, M. F., & D'Ambrosio, V. (2019). *Progettazione ambientale per l'adattamento al Climate Change: Environmental design for Climate Change adaptation. Progettazione ambientale per l'adattamento al Climate Change*, 1-275. ISBN 978-88-8497-641-3

Magni, F. & Musco, F. (2016). Verso una città climate proof: strumenti e politiche innovative per il governo del territorio in uno scenario di cambiamento climatico. *Atti della XIX Conferenza Nazionale SIU. Cambiamenti, responsabilità e strumenti per l'urbanistica al servizio del Paese*. Catania, 16-18 giugno 2016. Planum Oublisher ISBN 97888992370 80

Milardi, M. (2017). Adaptive models for the energy efficiency of building envelopes. Journal of Technology Innovations in Renewable Energy, 6(4), pp. 108-117. DOI: https://doi.org/10.6000/1929-6002.2017.06.04.1

Milardi, M. (2021). Adattamento climatico e misurabilità. Un'esperienza di Reggio Calabria. In D'Ambrosio, V., & Rigillo, M. (a cura di) (2021). *Transizioni: conoscenza e progetto climate proof. Transizioni*, pp. 73-80. ISBN 978-88-8497-780-9

Milardi, M., Mandaglio, M., Grillo, E., Musarella, C., Sansotta, S., Tramonti, N., & Trombetta, C. (2021). Testing and experimentation on building envelope under climate change. *Proceedings of the CEES 2021 - International Conference on Construction, Energy, Environment and Sustainability* 12-15 October 2021, Coimbra, Portugal. Editor: Itecons. Online: http://hdl.handle.net/20.500.12318/111200 Consultato il: 5 febbraio 2022

Nebuloni, A. (2020). Il fattore tempo nel progetto delle architetture adattive. *TECHNE*, 20. pp. 98-105. DOI: 10.13128/techne-8148

Capitolo 2 *Condizioni climatiche di riferimento_* L'area Mediterranea: scenari climatici ed eventi estremi

Cambiamento climatico in Area Mediterranea

Cherif, S., Doblas-Miranda, E., Lionello, P., Borrego, C., Giorgi, F., Iglesias, A., Jebari, S., Mahmoudi, E., Moriondo, M., Pringault, O., Rilov, G., Somot, S., Tsikliras, A., Vila, M., & Zittis, G. (2020). Drivers of change. In: C*limate and Environmental Change in the Mediterranean Basin – Current Situation and Risks for the Future. First Mediterranean Assessment Report* [Cramer W, Guiot J, Marini K (eds.)] p.5. Union for the Mediterranean, Plan Bleu, UNEP/MAP. Marseille, France. pp. 128, in press.

García-Aristizábal, A. (2012). Cambiamento climatico: un clima di incertezza. *Ambiente Rischio Comunicazione,* Vol. 4. pp. 26-33.

Giorgi, F., & Lionello, P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and planetary change*, Vol. 63(2-3), pp. 90-104. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2007.09.005

Lionello, P., Abrantes, F., Congedi, L., Dulac, F., Gacic, M., Gomis, D., ... & Xoplaki, E. (2012). Introduction: Mediter-

ranean climate—background information. In *The climate of the Mediterranean region: From the past to the future*, pp. xxxv-xc. Elsevier Inc. DOI: 10.1016/B978-0-12-416042-2.00012-4

Lionello, P., Abrantes, F., Congedi, L., Dulac, F., Gacic, M., Gomis, D., Goodess, C., Hoff, H., Kutiel, H., Luterbacher, J., Planton, S., Reale, M., Schröder, K., Vittoria Struglia, M., Toreti, A., Tsimplis, M., Ulbrich, U., Xoplaki, E. (2012). Introduction: Mediterranean Climate—Background Information. In *The Climate of the Mediterranean Region. Elsevier*, Oxford. p. liii. DOI: 10.1016/B978-0-12-416042-2.00012-4.

Lionello, P., & Scarascia, L. (2018). The relation between climate change in the Mediterranean region and global warming. *Regional Environmental Change*, Vol. 18(5), pp. 1481-1493. DOI: 10.1007/s10113-018-1290-1

Lionello, P., & Scarascia, L. (2020). The relation of climate extremes with global warming in the Mediterranean region and its north versus south contrast. *Regional Environmental Change*, 20(1), pp. 1-16.

Nicholls, R. J., & Hoozemans, F. M. J. (1996). The Mediterranean: vulnerability to coastal implications of climate change. *Ocean & Coastal Management*, Vol. 31(2-3), pp. 105-132.

Thiébault, S., Moatti, J. (2016). *The Mediterranean Region under Climate Change. A Scientific Update: Abridged English/French Version*. New edition [online]. Marseille: IRD Éditions, 2016. (generated 29 janvier 2022). ISBN: 9782709922555. DOI: 10.4000/books.irdeditions.24549

Turley, C. M. (1999). The changing Mediterranean Sea—a sensitive ecosystem? *Progress in Oceanography*, Vol. 44(1-3), pp. 387-400. DOI: 10.1016/S0079-6611(99)00033-6

Hot spot mediterraneo

Cos, J., Doblas-Reyes, F., Jury, M., Marcos, R., Bretonnière, P. A., & Samsó, M. (2022). The Mediterranean climate change hotspot in the CMIP5 and CMIP6 projections. *Earth System Dynamics*, 13(1), pp. 321-340. DOI: 10.5194/esd-13-321-2022

Giorgi, F. (2006). Climate change hot-spots. *Geophysical research letters*, Vol. 33, L08707. DOI: 10.1029/2006GL025734

Tuel, A., & Eltahir, E. A. (2020). Why is the Mediterranean a climate change hot spot? *Journal of Climate*, Vol. 33(14), pp. 5829-5843. DOI: 10.1175/JCLI-D-19-0910.1

Rapporti sul cambiamento climatico nella Regione del Mediterraneo

Ali, E., Cramer, W., Carnicer, J., Georgopoulou, E., Hilmi, N.J.M., Le Cozannet, G., & Lionello, P. (2022). Cross-Chapter Paper 4: Mediterranean Region. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2233–2272, Doi:10.1017/9781009325844.021

CMCC (2019). *Climate Change in the Future, Fast Changing World. Strategic Plan 2019-2029*. pp.1-94. CMCC. Online: https://www.cmcc.it/it/chi-siamo/piano-strategico-2019-2029 Consultato il: 18 ottobre 2022

MedECC (2020). *Climate and Environmental Change in the Mediterranean Basin – Current Situation and Risks for the Future*. First Mediterranean Assessment Report [Cramer, W., Guiot, J., Marini, K. (eds.)] Union for the Mediterranean, Plan Bleu, UNEP/MAP, Marseille, France, pp. 632. ISBN: 978-2-9577416-0-1 / DOI: 10.5281/zenodo.4768833

MedECC (2020). Summary for Policymakers. In: *Climate and Environmental Change in the Mediterranean Basin – Current Situation and Risks for the Future.* First Mediterranean Assessment Report [Cramer W, Guiot J, Marini K (eds.)] Union for the Mediterranean, Plan Bleu, UNEP/ MAP, Marseille, France.

UNEP/MAP, & Plan Bleu (United Nations Environment Programme/Mediterranean Action Plan and Plan Bleu) (2020). *State of the Environment and Development in the Mediterranean: Summary for Decision Makers*. Nairobi. ISBN 978-92-807-3800-1

WMO (2021). *Mediterranean gripped by extreme heat, with new reported temperature record*. WMO. Online avaible at: https://public.wmo.int/en/media/news/mediterranean-gripped-extreme-heat-new-reported-temperature-record

Eventi estremi nella Regione del Mediterraneo

Alfieri, L., Burek, P., Feyen, L., & Forzieri, G. (2015). Global warming increases the frequency of river floods in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 19(5), pp. 2247-2260. DOI: 10.5194/hess-19-2247-2015

Benabdelouahab, T., Gadouali, F., Boudhar, A., Lebrini, Y., Hadria, R., & Salhi, A. (2020). Analysis and trends of rainfall amounts and extreme events in the Western Mediterranean region. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 141(1), pp. 309-320. DOI:10.1007/s00704-020-03205-4

Bethoux, J. P., Gentili, B., Raunet, J., & Tailliez, D. (1990). Warming trend in the western Mediterranean deep water. *Nature*, 347(6294), pp. 660-662. DOI: 10.1038/347660a0

Bonacci, O., & Vrsalović, A. (2022). Differences in Air and Sea Surface Temperatures in the Northern and Southern

Part of the Adriatic Sea. *Atmosphere*, Vol. 13(7), 1158. DOI: 10.3390/atmos13071158

Cavicchia, L., von Storch, H., & Gualdi, S. (2014). Mediterranean tropical-like cyclones in present and future climate. *Journal of Climate*, 27(19), pp. 7493-7501. DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00339.1

Cipolla, G., Francipane, A., & Noto, L. V. (2020). Classification of extreme rainfall for a Mediterranean region by means of atmospheric circulation patterns and reanalysis data. *Water Resources Management*, Vol.34(10), pp. 3219-3235. 10.1007/s11269-020-02609-1

Darmaraki, S., Somot, S., Sevault, F., Nabat, P., Cabos Narvaez, W. D., Cavicchia, L., ... & Sein, D. V. (2019). Future evolution of marine heatwaves in the Mediterranean Sea. *Climate Dynamics*, 53(3), pp. 1371-1392. DOI: 10.1007/s00382-019-04661-z

Forestieri, A., Caracciolo, D., Arnone, E. e Noto, LV (2016). Derivazione delle soglie di precipitazione per l'avviso di piena in un bacino siciliano utilizzando un modello idrologico. *Ingegneria di Procedia*, Vol. 154, pp. 818-825. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.413

Gaertner, M. Á., González-Alemán, J. J., Romera, R., Domínguez, M., Gil, V., Sánchez, E., ... & Nikulin, G. (2018). Simulation of medicanes over the Mediterranean Sea in a regional climate model ensemble: impact of ocean–atmosphere coupling and increased resolution. *Climate dynamics*, 51(3), pp. 1041-1057. DOI 10.1007/s00382-016-3456-1

Gaudioso, D. (2002). Cambiamenti Climatici, Eventi Meteorologici Estremi E Rischio Di Alluvioni. *Analysis*. N. 1+2/2002, pp. 1-4.

Gozzini, B. (2016). La tempesta di vento del 4-5 marzo 2015. *L'Italia Forestale e Montana*, 71(4), pp. 187-195. DOI: 10.4129/ifm.2016.4.01

Lange, M. A. (2020). Climate change in the Mediterranean: environmental impacts and extreme events. *IEMed: Mediterranean Yearbook*, pp. 30-45.

Peres, D. J., & Cancelliere, A. (2018). Analisi degli Impatti dei Cambiamenti Climatici sull'innesco di frane superficiali analysis of the impacts of Climate Change on shallow landslide triggering. *L'acqua*, pp. 71-82.

Pastor, F., Valiente, J. A., & Khodayar, S. (2020). A warming Mediterranean: 38 years of increasing sea surface temperature. *Remote sensing*, 12(17), 2687. DOI: 10.3390/rs12172687

Perkins-Kirkpatrick, S. E., & Lewis, S. C. (2020). Increasing trends in regional heatwaves. *Nature communications*, 11(1), 1-8. DOI: 10.1038/s41467-020-16970-7

Valisa, P. (2021). *I cicloni quasi tropicali nel Mediterraneo*. Online avaible at: https://www.astrogeo.va.it/statistiche/medicane.php Accessed 17 ottobre 2022

Vellinga, P. & van Verseveld, W. J. (2000). *Cambiamenti climatici ed eventi meteorologici estremi*. WWF-World Wide Fund For Nature. Gland, Svizzera.

Zittis, G., Hadjinicolaou, P., Almazroui, M., Bucchignani, E., Driouech, F., El Rhaz, K., ...& Lelieveld, J. (2021). Business-as-usual will lead to super and ultra-extreme heatwaves in the Middle East and North Africa. *npj Climate and Atmospheric Science*, 4(1), pp. 1-9. DOI: 10.1038/s41612-021-00178-7

Proiezioni cambiamento climatico nella Regione del Mediterraneo

Al Sayah, M. J., Abdallah, C., Khouri, M., Nedjai, R., & Darwich, T. (2021). A framework for climate change assessment in Mediterranean data-sparse watersheds using remote sensing and ARIMA modeling. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 143(1), pp. 639-658. Doi 10.1007/s00704-020-03442-7

Cubasch, U., Meehl, G. A., Boer, G. J., Stouffer, R. J., Dix, M., Noda, A., ... & Yap, K. S. (2001). Projections of future climate change. In *Climate Change 2001: The scientific basis. Contribution of WG1 to the Third Assessment Report of the IPCC* (TAR), pp. 525-582. Cambridge University Press.

Nissan, H., Goddard, L., de Perez, E. C., Furlow, J., Baethgen, W., Thomson, M. C., & Mason, S. J. (2019). On the use and misuse of climate change projections in international development. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 10(3), e579. DOI: 10.1002/wcc.579

Zittis, G., Hadjinicolaou, P., Klangidou, M., Proestos, Y., & Lelieveld, J. (2019). A multi-model, multi-scenario, and multi-domain analysis of regional climate projections for the Mediterranean. *Regional Environmental Change*, Vol. 19(8), pp. 2621-2635. DOI: 10.1007/s10113-019-01565-w

Strategie per lo sviluppo sostenibile

Bleu, P. (2008). *Climate change and energy in the Mediterranean*. Regional Activity Center, Sophia Antipolis, Valbonne.

Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., Garrabou, J., Gattuso, J. P., Iglesias, A., ... & Xoplaki, E. (2018). Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. *Nature Climate Change*, Vol. 8(11), pp. 972-980. DOI: 10.1038/s41558-018-0299-2

ISTAT (2022). *Il benessere equo e sostenibile in Italia*. ISBN 978-88-458-2076-2

UNEP/MAP (2016). *Mediterranean Strategy for Sustainable Development 2016-2025*. Valbonne. Plan Bleu, Regional Activity Centre. ISBN 978-92-807-3576-5

Rapporti sul clima in Italia

Fioravanti, G., Fraschetti, P., Lena, F., Perconti, W., Piervitali, E., & Pavan Valentina (2022). Gli indicatori del clima in Italia nel 2021. Anno XVII. ISPRA, Stato dell'Ambiente, Vol. 98/2022, pp. 1-82. ISBN 978-88-448-1119-8

Fioravanti, G., Fraschetti, P., Lena, F., Perconti, W., & Piervitali, E. (2022). I normali climatici 1991-2020 di temperatura e precipitazione in Italia. ISPRA, Stato dell'Ambiente, Vol. 99/2022, pp. 1-29. ISBN 978-88-448-1120-4

ISPRA (2020). Gli indicatori del clima in Italia nel 2019. Anno XV, Stato dell'Ambiente Vol. 94/2020, pp. 1-74. ISBN978-88-448-0998-0

Legambiente (2021). Il clima è già cambiato. Le città e le reti di fronte alla sfida dell'adattamento climatico. Rapporto 2021 dell'Osservatorio di Legambiente CittàClima. (A cura di Zanchini, E., Nanni, G. & Minutolo, A.). Online: https://www.legambiente.it/wp-content/uploads/2021/11/Report-OsservatorioCittaClima2021.pdf Consultato il: 5 maggio 2022

Legambiente (2022). Il clima è già cambiato. Le città e le reti di fronte alla sfida dell'adattamento climatico. Rapporto 2021 dell'Osservatorio di Legambiente CittàClima. Legambiente. pp. 1-161.

Scenari di cambiamento climatico in Italia

Diffenbaugh, N. S., Singh, D., Mankin, J. S., Horton, D. E., Swain, D. L., Touma, D., ... & Rajaratnam, B. (2017). Quantifying the influence of global warming on unprecedented extreme climate events. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(19), 4881-4886. DOI: 10.1073/pnas.1618082114

Esposito, S., Beltrano, M. C., De Natale, F., Di Giuseppe, E., Iafrate, L., Libertà, A., Parisse, B., & Scaglione, M. (2015). *Atlante italiano del clima e dei cambiamenti climatici. Consiglio di ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria, Unità di ricerca per la climatologia e la meteorologia applicate all'agricoltura*. pp. 1-264. Roma (cit. p. 43) ISBN 978-88-97081-80-7

Fioravanti, G., Piervitali, E., Desiato, F., Perconti, W., & Fraschetti, P. (2013). Variazione e tendenze degli estremi di temperatura e precipitazione in Italia. *ISPRA, Stato dell'Ambiente*, Vol. 37/2013, pp. 1-60. ISBN 978-88-448-0599-9

Koseki, S., Mooney, P. A., Cabos, W., Gaertner, M. Á., de la Vara, A., & González-Alemán, J. J. (2021). Modelling a tropical-like cyclone in the Mediterranean Sea under present and warmer climate. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(1), pp. 53-71. DOI: 10.5194/nhess-21-53-2021.

Raymond, C., Matthews, T., & Horton, R. M. (2020). The emergence of heat and humidity too severe for human tolerance. *Science Advances*, 6(19), eaaw1838. DOI: 10.1126/sciadv.aaw1838

Reale, M., Cabos Narvaez, W. D., Cavicchia, L., Conte, D., Coppola, E., Flaounas, E., ... & Somot, S. (2022). Future projections of Mediterranean cyclone characteristics using the Med-CORDEX ensemble of coupled regional climate system models. *Climate Dynamics*, 58(9), 2501-2524. DOI: 10.1007/s00382-021-06018-x

Sørland, S. L., Brogli, R., Pothapakula, P. K., Russo, E., Van de Walle, J., Ahrens, B., ... & Thiery, W. (2021). COSMO-CLM regional climate simulations in the Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX) framework: a review. *Geoscientific Model Development*, 14(8), 5125-5154. DOI: 10.5194/gmd-14-5125-2021

Spano D., Mereu V., Bacciu V., Marras S., Trabucco A., Adinolfi M., Barbato G., Bosello F., Breil M., Chiriacò M. V., Coppini G., Essenfelder A., Galluccio G., Lovato T., Marzi S., Masina S., Mercogliano P., Mysiak J., Noce S., Pal J., Reder A., Rianna G., Rizzo A., Santini M., Sini E., Staccione A., Villani V., Zavatarelli M., 2020. *Analisi del rischio. I cambiamenti climatici in Italia*. DOI: 10.25424/CMCC/ANALISI_DEL_RISCHIO

WWF (2016). *"Scenari per l'italia" il paradosso climatico degli estremi opposti nel futuro dell'italia*. [A cura del gruppo di lavoro coordinato da Paola Mercogliano del Centro Euromediterraneo per i Cambiamenti climatici (CMCC)]. Online: https://wwfit.awsassets.panda.org/downloads/report_scenari_italia_cmcc_2016.pdf Consultato il: 20 ottobre 2022

Scenari di cambiamento climatico in Spagna

AEMET (2021). *Informe sobre el estado del clima de España 2020 Resumen ejecutivo.* Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico Agencia Estatal de Meteorología Madrid, 2021. p.6. DOI. 10.31978/666-21-003-9

AEMET (2021). *Resúmenes anual climatológico 2021. Gobierno de España*, AEMET. Online: http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/resumenes_climat/anuales/res_anual_clim_2021.pdf Consultato il: 17 ottobre 2022

AEMET (2021). *Resumen anual climatologico 2021*. AEMET. pp.1-16. Online: https://www.aemet.es/es/noticias/2022/01/2021_resumen_climatico Consultato il: 22 ottobre 2022

Amblar, M. P., Casado Calle, M. J., Pastor Saavedra, M. A., Ramos Calzado, P., & Rodríguez Camino, E. (2017). *Guía*

de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR5. Online: https://adaptecca.es/sites/default/files/documentos/guia_escenarios_ar5.pdf Consultato il: 24 ottobre 2022

Cardoso Pereira, S., Marta-Almeida, M., Carvalho, A. C., & Rocha, A. (2020). Extreme precipitation events under climate change in the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology,* 40(2), pp. 1255-1278. DOI; 10.1002/joc.6269

Guerreiro, S. B., Kilsby, C. G., & Fowler, H. J. (2016). Rainfall in Iberian transnational basins: a drier future for the Douro, Tagus and Guadiana?. *Climatic Change*, 135(3), pp. 467-480. DOI: 10.1007/s10584-015-1575-z

Mestre Guillén, I., Casado Calle, M. J., & Rodríguez Camino, E. (2015). Tendencias observadas y proyecciones de cambio climático sobre España. *Impactos y Vulnerabilidad.* pp 87-98. Online: https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/cap2-tendenciasobservadasyproyeccionesdecambioclimaticosobreespana_tcm30-70204.pdf Consultato il: 24 ottobre 2022

Miró, J. J., Estrela, M. J., Caselles, V., & Gomez, I. (2018). Spatial and temporal rainfall changes in the Júcar and Segura basins (1955–2016): Fine-scale trends. *International Journal of Climatology*, 38(13), pp. 4699-4722. DOI: 10.1002/joc.5689

Romero, R., & Emanuel, K. (2017). Climate change and Hurricane-like extratropical cyclones: Projections for North Atlantic polar lows and medicanes based on CMIP5 models. *Journal of Climate,* 30(1), pp. 279-299. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0255.1

Sanz, M.J. & Galán, E. (2021). *Impactos y riesgos derivados del cambio climático en España 2021.* Oficina Española de Cambio Climático. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid.

Capitolo 3 *Il problema scientifico_* Cambiamenti climatici ed involucro edilizio

Implicazioni del cambiamento climatico sull'ambiente costruito

A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. pp. 2897–2930 (cit. p.2912). DOI:10.1017/9781009325844.02

Athanasopoulou, A., Sousa, M.L., Dimova, S., Rianna, G., Mercogliano, P., Villani, V., Croce, P., Landi, F., Formichi, P., Markova, J. (2020). *Thermal design of structures and the changing climate*, EUR 30302 EN. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020. ISBN 978-92-76-20776-4. DOI:10.2760/128894, JRC121351

De Lauretis, R., & Taurino, E. (2014). L'inventario nazionale delle emissioni: differenze tra inventari nazionali e inventari bottom-up, possibili sinergie e criticità. *ISPRA, Stato dell'Ambiente* 54/14. pp. 3-12. ISBN 978-88-448-0686-6

Grossi, C. M., Brimblecombe, P., & Harris, I. (2007). Predicting long term freeze–thaw risks on Europe built heritage and archaeological sites in a changing climate. Science of the Total Environment, 377(2-3), pp. 273-281. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.02.014

Howard, L. (1833). *The climate of London: deduced from meteorological observations made in the metropolis and at various places around it* (Vol. 3). Harvey and Darton, J. and A. Arch, Longman, Hatchard, S. Highley [and] R. Hunter.

IPCC (2022). Annex II: Glossary [Möller, V., R. van Diemen, J.B.R. Matthews, C. Méndez, S. Semenov, J.S. Fuglestvedt, A. Reisinger (eds.)]. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate* Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller,

Li, D. H., Yang, L., & Lam, J. C. (2012). Impact of climate change on energy use in the built environment in different climate zones–a review. *Energy*, 42(1), pp. 103-112. DOI: 10.1016/j.energy.2012.03.044

Markova, J. (2021). Design of Structures in the Changing Climate. *Proceedings of the 31st European Safety and Reliability Conference*. pp. 1101-1107. ISBN: 978-981-18-2016-8; doi:10.3850/978-981-18-2016-8 468-cd

MUR (2020). *Programma nazionale per la ricerca 2021-2027*. (Delibera n. 74/2020). p. 122. Online: https://www.mur.gov.it/it/aree-tematiche/ricerca/programmazione/programma-nazionale-la-ricerca Consultato il: 30 ottobre 2022

Myers, K. F., Doran, P. T., Cook, J., Kotcher, J. E., & Myers, T. A. (2021). Consensus revisited: quantifying scientific agreement on climate change and climate expertise among Earth scientists 10 years later. *Environmental Research Letters*, 16(10), 104030. DOI: 10.1088/1748-9326/ac2774

Newton, P., Hampson, K., & Drogemuller, R. (2009). T*echnology, design and process innovation in the built environment* (Vol. 10). Routledge. ISBN 10:0415462886

Roberts, S. (2008). Effects of climate change on the built environment. *Energy Policy*, 36(12), pp. 4552-4557. (cit. p. 4555). DOI: 10.1016/j.enpol.2008.09.012

Implicazioni del cambiamento climatico sugli involucri edilizi

Anthonia, A. N., Bello, Y. A., Macaulay, I. A., & Oliatan, O. M. (2021). Review of paradigm shift in building con-

struction occasioned by climage change. *Global Journal of Pure and Applied Sciences*, 27(2), pp. 253-262. DOI: 10.4314/gjpas.v27i2.17

Chalmers, P. (2014). *Cambio Climático: Implicaciones para los Edificios. Hallazgos Claves del Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. p.4. ECF, BPIE, GBPN, WBCSD, CJBS, CISL. Online: https://www.construction21.org/espana/articles/h/cambio-climatico-implicaciones-para-los-edificios-las-principales-conclusiones-del-ipcc.html Consultato il: 30 ottobre 2022

Crawley, D. B. (2003). Impact of climate change on buildings. In *Proceedings of the CIBSE/ASHRAE International Conference*. pp. 1-11.

Dernie, D., & Gaspari, J. (2015). Building envelope over-cladding: impact on energy balance and microclimate. *Buildings*, 5(2), pp. 715-735 (cit. p 717). DOI: 10.3390/buildings5020715

De Wilde, P., & Coley, D. (2012). The implications of a changing climate for buildings. *Building and environment*, 55, pp. 1-7. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.03.014

Laminou, L. M., Liu, Z. J., & Chen, X. H. (2019). Extreme events design and mitigation methods: A review. *Civil Engineering Journal*, 5(6), pp. 1424-1439. (cit. p. 1425). DOI: 10.28991/cej-2019-03091342

Lucon O., et al. (2014). Buildings. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

Mejorin, A., Miranda, W. D., & Trabucco, D. (2018). La resilienza del curtain wall ad eventi atmosferici eccezionali. *TECHNE: Journal of Technology for Architecture & Environment*, 15. pp. 323-330. DOI: 10.13128/Techne-22129

Mejorin, A., Trabucco, D., & Stelzer, I. (2019). Cyclone-Resistant Façades. *Chicago: Council on Tall Buildings and Urban Habitat*.

Nordvik, V., & Lisø, KR (2004). Un primer sull'economia degli edifici del cambiamento climatico. *Economia e gestione delle costruzioni*, 22 (7), 765-775. (cit, pag. 765). DOI: 10.1080/01446190420002132 56

Palla, A., Colli, M., Candela, A., Aronica, G. T., & Lanza, L. G. (2018). Pluvial flooding in urban areas: The role of surface drainage efficiency. *Journal of Flood Risk Management*, 11, S663-S676. DOI: 10.1111/jfr3.12246

Richardson, B. (2002). *Defects and Deterioration in Buildings: A Practical Guide to the Science and Technology of Material Failure*. Routledge. ISBN 9780203042748

Trabucco, D., Mejorin, A., Miranda, W., Nakada, R., Troska, C., & Stelzer, I. (2017). Cyclone resistant glazing solutions in the Asia-Pacific region: A growing market to meet present and future challenges. *Glass Performance Days 2017 Proceedings*, pp. 64-69.

Xu, P., Huang, Y. J., Miller, N., Schlegel, N., & Shen, P. (2012). Impacts of climate change on building heating and cooling energy patterns in California. *Energy*, 44(1), pp. 792-804. DOI: 10.1016/j.energy.2012.05.013

Yau, Y. H., & Hasbi, S. (2013). A review of climate change impacts on commercial buildings and their technical services in the tropics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 430-441. DOI: 10.1016/j.rser.2012.10.035

Zięba, Z., Dąbrowska, J., Marschalko, M., Pinto, J., Mrówczyńska, M., Leśniak, A., ... & Kazak, J. K. (2020). Built environment challenges due to climate change. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 609, No. 1, p. 012061). IOP Publishing. DOI: :10.1088/1755-1315/609/1/012061

Implicazioni del cambiamento climatico sui materiali da costruzione

Cavalagli, N., Kita, A., Castaldo, V. L., Pisello, A. L., & Ubertini, F. (2019). Hierarchical environmental risk mapping of material degradation in historic masonry buildings: An integrated approach considering climate change and structural damage. *Construction and Building Materials*, 215, pp. 998-1014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.204

Karagiannis, N., Karoglou, M., Bakolas, A., & Moropoulou, A. (2016). Effect of temperature on water capillary rise coefficient of building materials. *Building and Environment*, 106, pp. 402-408. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.07.008

Phillipson, M. C., Emmanuel, R., & Baker, P. H. (2016). The durability of building materials under a changing climate. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 7(4), pp. 590-599. DOI: 10.1002/wcc.398

Mukhopadhyaya, P., Kumaran, K., Normandin, N., & Goudreau, P. (2002). Effect of surface temperature on water absorption coefficient of building materials. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 26(2), pp. 179-195. DOI: 10.1177/0075424202026002974

Nijland, T. G., van Hees, R. P. J., Adan, O. C. G., & Etten, B. V. (2010). Evaluation of the effects of expected climate change scenarios for the Netherlands on the durability of building materials. In *Effect of climate change on built heritage, WTA-2010 colloquium*, Eindhoven, The Netherlands. (Bunnik, T., De Clercq, H., van Hees, R. P. J., Schellen, H. L., & Schueremans, L. Eds.) (2010). Vol. 34, pp. 33-44. WTA-Publications.

Implicazioni del microclima sugli involucri edilizi

Allegrini, J., Dorer, V., & Carmeliet, J. (2012). Influence of the urban microclimate in street canyons on the energy demand for space cooling and heating of buildings. *Energy and Buildings*, 55, 823-832. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.10.013

Cardinali, M., Pisello, A. L., Piselli, C., Pigliautile, I., & Cotana, F. (2020). Microclimate mitigation for enhancing energy and environmental performance of Near Zero Energy Settlements in Italy. *Sustainable Cities and Society*, 53, 101964. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101964

Jayyaratnam, K., Shilston, R., & Hackett, D. (2017). The use of CFD and wind tunnel testing in wind microclimate assessments. In Turrin, M., Peters, B., O'Brien, W., Stouffs, R., & Dogan, T. (Eds.) (2017). *Proceedings of the Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design 2017: SimAUD 2017*. pp. 317-326. Simulation Councils.

Naboni, E., Milella, A., Vadalà, R., & Fiorito, F. (2020). On the localised climate change mitigation potential of building facades. *Energy and Buildings*, 224, 110284. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110284

Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), pp. 1-24. DOI: 551 S24551.588.7

Rotach, M. W, & Calanca, P. (2003). Microclimate. In *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*. pp. 1301-1307. DOI: 10.1016/B0-12-227090-8/00225-6

Schettini, E., Blanco, I., Campiotti, C. A., Bibbiani, C., Fantozzi, F., & Vox, G. (2016). Green control of microclimate in buildings. *Agriculture and agricultural science procedia*, 8, pp. 576-582. DOI: 10.1016/j.aaspro.2016.02.078

Wong, S. L., Wan, K. K., Li, D. H., & Lam, J. C. (2010). Impact of climate change on residential building envelope cooling loads in subtropical climates. *Energy and Buildings*, 42(11), pp. 2098-2103. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.06.021

Impatti dell'involucro edilizio sul cambiamento climatico

Anukwonke, C. C., Tambe, E. B., Nwafor, D. C., & Malik, K. T. (2022). Climate Change and Interconnected Risks to Sustainable Development. In *Climate Change*, pp. 71-86. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-86290-9_5

ARUP (2018). *Cities Alive. Rethinking Cities in Arid Environments*. ARUP. Online: https://www.arup.com/perspectives/publications/research/section/cities-alive-cities-in-arid-environments Consultato il: 3 novembre 2022

EEA (2022). *Economic losses and fatalities from weather- and climate-related events in Europe*. Online: https://www.eea.europa.eu/publications/economic-losses-and-fatalities-from/economic-losses-and-fatalities-from Consultato il: 1 novembre 222

IEA (2022). *Building Envelopes*. IEA, Parigi. Online: https://www.iea.org/reports/building-envelopes, Licenza: CC BY 4.0 Consultato il: 4 novembre 2022

Mazzucchelli, E. S., Scrinzi, G., Pastori, S., Rigone, P., Lucchini, A., Trabucco, D., & Milardi, M. (2022). Extreme wind events and risk mitigation: overview and perspectives for resilient building envelopes design in the Italian context. *Documentation, Restoration and Reuse of Heritage*, pp. 617-626. ISBN 978-972-752-296-5.

Mehaoued, K., & Lartigue, B. (2019). Influence of a reflective glass façade on surrounding microclimate and building cooling load: Case of an office building in Algiers. *Sustainable Cities and Society,* 46, 101443. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101443

Nugroho, N. Y., Triyadi, S., & Wonorahardjo, S. (2022). Effect of high-rise buildings on the surrounding thermal environment. *Building and Environment,* 207, 108393. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108393

UNEP - United Nations Environment Programme (2021). *2021 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. Nairobi

Wonorahardjo, S., Sutjahja, I. M., Mardiyati, Y., Andoni, H., Achsani, R. A., Steven, S., ... & Tedja, S. (2022). Effect of different building façade systems on thermal comfort and urban heat island phenomenon: An experimental analysis. *Building and Environment*, 217, 109063. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109063

Yan, H., Shen, Q., Fan, L. C., Wang, Y., & Zhang, L. (2010). Greenhouse gas emissions in building construction: A case study of One Peking in Hong Kong. *Building and Environment*, 45(4), pp. 949-955. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.09.014

Misure per l'adattamento degli involucri edilizi

Ala-Juusela, M., Rehman, H. U., Hukkalainen, M., & Reda, F. (2021). Positive energy building definition with the framework, elements and challenges of the concept. *Energies,* 14(19), 6260. DOI: 10.3390/en14196260

IEA (2022). *Technology and Innovation Pathways for Zero-carbon-ready Buildings entro il 2030*, IEA, Parigi. Online: https://www.iea.org/reports/technology-and-innovation-pathways-for-zero-carbon-ready- edifici entro il 2030, Licenza: CC BY 4.0 Consultato il: 4 novembre 2022

Mercogliano, P. (2020). Cambiamento climatico. In *Adattarsi al clima che cambia. Innovare la conoscenza per il pro-*

getto ambientale. [a cura di Losasso, M., Lucarelli, M. T., Rigillo, M., Valente, R. (eds)]. pp. 31-40. Maggioli Editore, Rimini. ISBN 9788891643193

Milardi, M., Mandaglio, M., & Musarella, C. C. (2020). Cambiamento climatico. In *Adattarsi al clima che cambia. Innovare la conoscenza per il progetto ambientale*. [a cura di Losasso, M., Lucarelli, M. T., Rigillo, M., Valente, R. (eds)]. pp. 207-210. Maggioli Editore, Rimini. ISBN 9788891643193

Olivieri, F. (2022). Progettazione simbiotica per un ecosistema urbano resiliente. Symbiotic design for a resilient urban ecosystem. *AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design*, n. 11, 2022. pp. 40-49. ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X DOI: 10.19229/2464-9309/1132022

Pastori, S. & Mazzucchelli, E. S. (2022). Eventi climatici estremi e involucri resilienti. *NUOVA FINESTRA*, 495, pp. 42-50.

Stagrum, A. E., Andenæs, E., Kvande, T., & Lohne, J. (2020). Climate change adaptation measures for buildings—A scoping review. *Sustainability*, 12(5), 1721. DOI: 10.3390/su12051721

Shahin, H. S. M. (2019). Adaptive building envelopes of multistory buildings as an example of high performance building skins. *Alexandria Engineering Journal*, 58(1), pp. 345-352. DOI: 10.1016/j.aej.2018.11.013

Žigart, M., Lukman, R. K., Premrov, M., & Leskovar, V. Ž. (2018). Environmental impact assessment of building envelope components for low-rise buildings. *Energy*, 163, pp. 501-512. DOI: 10.1016/j.energy.2018.08.149

Zinn, J., & Fitzsimons, P. (2014). *Decision taking in times of uncertainty: Towards an efficient strategy to manage risk and uncertainty in climate change adaptation*. Victorian Centre for Climate Change Adaptation Research. ISBN: 978 0 7340 5014 4

Involucri edilizi e processi di testing

Knaack, U., Klein, T., Bilow, M., & Auer, T. (2014). *Façades: principles of construction*. Birkhäuser. ISBN 10 3764379626

Letchford, C., Lin, N., & Holmes, J. (2013). Windborne debris in horizontal winds and applications to impact testing. In *Advanced structural wind engineering*. pp. 197-215. Springer, Tokyo. DOI: 10.1007/978-4-431-54337-4_8

Milardi, M. (2021). Test, simulazioni, protocolli, attività on site e in laboratorio. In Bologna, R., Losasso, M., Mussinelli, E., & Tucci, F. (2021). *Dai distretti urbani agli eco-distretti. Metodologie di conoscenza, programmi strategici, progetti pilota per l'adattamento climatico*. pp. 53-60. Maggioli editore: Rimini, Italia. ISBN: 9788891643209 Online: http://hdl.handle.net/20.500.12318/79437 Consultato il: 1 novembre 2022

Milardi, M., Grillo, E., & Sansotta, S. (2021). Testing for adaptive envelope. *Quaderni SID (Sustainable Innovation Design)*, Vol. 3, 2021, Aracne Editrice. pp. 96-102. ISBN: 978-88-255-4040-6.

Lucarelli, M. T., Mandaglio, M., & Pennestrì, D. (2012). The building envelope between process and product innovation. *International Conference "Sustainable Environment in the Mediterranean Region: from Housing to Urban and Land Scale Construction"*, Naples 12-13-14 February 2012

Lucarelli, M. T., Milardi, M., Mandaglio, M., & Musarella, C. C. (2020). Macro phenomena vs micro responses. Multiscale approaches in the dynamic relationship between envelope and context. *AGATHÓN| International Journal of Architecture, Art and Design*, 7, pp. 26-33. DOI: 10.19229/2464-9309/732020

Capitolo 4 *Lo sfondo consolidato_* L'involucro edilizio: definizioni, prestazioni e requisiti

Involucro edilizio e prestazioni-requisiti

Banham, R. (1969). *Architecture of the Well Tempered Environment*. The Architectural Press, London The University of Chicago Press, Chicago. ISBN: 0 85139 074 9

D'Ambrosio Alfano, F., Dell'Isola, M., Palella, B., Riccio, G., & Russi, A. (2006). La misura della temperatura media radiante. In *61°Congresso Nazionale ATI*. pp. 285–290 ATI: Perugia, Italy

Davies, M. (1981). A Wall for all seasons. RIBA Journal, pp. 55-57. Atom Publishing, London, UK.

Eteghad, A. N., Guardiola, E. U., Raviz, S. R. H., & Aira, A. A. (2014). Reinterpretation of Energy Efficiency in Thomas Herzog's Architecture. *Journal of Engineering*, 2(2), pp. 85-102. DOI: 10.15640/jea.v2n2a8

Geissler, S., Österreicher, D., & Macharm, E. (2018). Transition towards energy efficiency: Developing the Nigerian building energy efficiency code. *Sustainability*, 10(8), 2620. DOI: 10.3390/su10082620

Hutcheon, N. B. (1963). Requirements for exterior walls. National Research Council of Canada Ottawa (Ontario) div of building research. *Canadian Building Digest*, 1963-12. DOI: 10.4224/40000881

Lionello, P., & Scarascia, L. (2020). The relation of climate extremes with global warming in the Mediterranean region and its north versus south contrast. *Regional Environmental Change*, 20(1), 1-16. DOI: 10.1007/s10113-020-01610-z

Mazzucchelli, E. S. (2013). *Edifici ad energia quasi zero*. Maggioli Editore. ISBN: 8838784531.

Milardi, M. (2015). *L'edificio risorsa: Caratteri e indicatori di eco-efficienza in edilizia*. Edizioni Nuova Cultura. ISBN: 8868125404

Milardi, M., Mandaglio, M., & Musarella, C. C. (2020). Involucro. In *Adattarsi al clima che cambia. Innovare la conoscenza per il progetto ambientale*. [a cura di Losasso, M., Lucarelli, M. T., Rigillo, M., Valente, R. (eds)]. pp. 145-150. Maggioli Editore, Rimini. ISBN 9788891643193

Passe, U., & Battaglia, F. (2015). *Designing spaces for natural ventilation: an architect's guide*. Routledge.

Rossetti, M. (2019). *L'involucro architettonico contemporaneo*. Maggioli Editore, Sant'Arcangelo di Romagna. ISBN: 8891634467

Scudo, G., & Rogora, A. (1998). L'involucro come regolatore dei flussi energetici. *Ambiente Costruito*, vol.1, Maggioli, Rimini.

Tucci, F., (2014). *Involucro, Clima, Energia. Qualità bioclimatica ed efficienza energetica in architettura nel progetto tecnologico ambientale della pelle degli edifici.* AltrAlineaEdizioni, Firenze. ISBN 978-88-98743-32-2

Involucro edilizio e innovazione tecnologica

Ascione, F., Bianco, N., Iovane, T., Mastellone, M., & Mauro, G. M. (2021). The evolution of building energy retrofit via double-skin and responsive façades: A review. *Solar Energy*, 224, pp. 703-717. DOI: 10.1016/j.solener.2021.06.035

Busa, L. (2006). Architettura e involucro. T*ecnologia dell'architettura: creatività e innovazione nella ricerca: Materiali del I Seminario OSDOTTA.* Viareggio, 14-16 settembre 2005 / a cura di Maria Antonietta Esposito. – Firenze: Firenze University Press, 2006 (DOTTA; 1), pp. 161-166. ISBN-10 88-8453-479-8 (online)

Candia, L. D., Rodríguez, A. S., Castro, N., Bazán, P. A., Ambrosi, V. M., & Díaz, F. J. (2018). Mejoras en maquinaria industrial con IoT: hacia la industria 4.0. In *XXIV Congreso Argentino de Ciencias de la Computación* (CACIC)(La Plata, 2018) Online: http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/73348 Consultato il: 11 novembre 2022

Conato, F., & Frighi, V. (2018). Il ruolo dell'innovazione nella definizione di nuovi paradigmi formali in Architettura. *TECHNE: Journal of Technology for Architecture & Environment,* 16, pp. 105-112. DOI: DOI: 10.13128/Techne-22965

European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Breque, M., De Nul, L., & Petridis, A. (2021). *Industry 5.0: towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*, Publications Office, 2021. Online: https://data.europa.eu/doi/10.2777/308407 Consultato il: 15 novembre 2022

Lucarelli, M. T. (2018). Verso una nuova centralità ecologica dell'ambiente costruito. *Eco Web Town*, Vol. II (18), 7-12. ISSN: 2039-2656. Online: http://www.ecowebtown.it/n_18/pdf/18_02.pdf Consultato il: 11 aprile 2022

Lucarelli, M. T., Milardi, M., Mandaglio, M., & Musarella, C. C. (2020). Macro phenomena vs micro responses. Multiscale approaches in the dynamic relationship between envelope and context. *AGATHÓN| International Journal of Architecture, Art and Design*, 7, 26-33. DOI: https://doi.org/10.19229/2464-9309/732020

Milardi, M. (2020). Integrated, Adaptive and Smart Envelope for Near Zero Energy Buildings. In *INTERNATIONAL SYMPOSIUM: New Metropolitan Perspectives*, pp. 2143-2149. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-48279-4_202

Romano, R. (2011). *Smart Skin Envelope: Integrazione architettonica di tecnologie dinamiche e innovative per il risparmio energetico* (p. 330). Firenze University Press.

Wyckmans, A. (2005). *Intelligent Building Envelopes. Architectural Concept & Applications for Daylighting Quality.* Norwegian University of Science and Technology – Faculty of Architecture and Fine Art, Trondheim, Norway, PhD Thesis. Online: https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20745928 Consultato il: 9 novembre 2022

Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., & Wang, L. (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, pp. 530-535. DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.10.006

Involucro edilizio e Strategie intelligenti

Clements-Croome, D.J. (1997). "What do we mean by intelligent buildings?" *Automation in construction* 6, no. 5 (1997), pp. 395-400.

Compagno, A. (1999). *Intelligent Glass Facades: Material,* Practice, Design. ISBN 10: 1874056285

Kroner, W. M. (1997). An intelligent and responsive architecture. *Automation in construction* 6, no. 5-6 (1997), pp. 381-393. 10.1016/S0926-5805(97)00017-4

Marin-Perez, R., Michailidis, I. T., Garcia-Carrillo, D., Korkas, C. D., Kosmatopoulos, E. B., & Skarmeta, A. (2019). PLUG-N-HARVEST architecture for secure and intelligent management of near-zero energy buildings. *Sensors*, 19(4), 843. DOI: 10.3390/s19040843

Wigginton, M., & Harris, J. (2013). *Intelligent skins*. Routledge.

Involucro edilizio e Responsività

Anshuman, S. (2005). Responsiveness and Social Expression; Seeking Human Embodiment in Intelligent Façades. *Proceedings of the 2005 Annual Conference of the Association for Computer Aided Design In Architecture. Savannah* (Georgia) 13-16 October 2005, pp. 12-23. ISBN 0-9772832-0-8. DOI: 10.52842/conf.acadia.2005.012

Heiselberg, P., Andresen, I., Perino, M., & Van Der Aa, A. (2006). Integrating environmentally responsive elements in buildings. In *Proceedings of the 27th AIVC Conference*, November 20-22, Lyon, France.

Heiselberg, P. (2012). ECBS Annex 44. Integrating Environmentally Responsive Elements in *Buildings*. Project Summary Report. AECOM Ltd, United Kingdom. ISBN 978-0-9562808-5-5

Kolodziej, P., & Rak, J. (2013). Responsive building envelope as a material system of autonomous agents. *Proceedings of the 18th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia* (CAADRIA 2013) / Singapore 15-18 May 2013, pp. 945-954. DOI: 10.52842/conf.caadria.2013.945

Perriccioli, M., & Rossi, M. (2005). *Thomas Herzog. Reacting skin*. Edizioni Kappa, Roma. ISBN: 978-88-7890-715-4

Velikov, K., & Thün, G. (2013). Responsive building envelopes: characteristics and evolving paradigms. Trubiano, F., *Design and Construction of High Performance Homes*, pp. 75-92.

Involucro edilizio e Adattività

Attia, S., Bilir, S., Safy, T., Struck, C., Loonen, R., & Goia, F. (2018). Current trends and future challenges in the performance assessment of adaptive façade systems. *Energy and Buildings*, 179, PP. 165-182. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.09.017
Barozzi, M., Lienhard, J., Zanelli, A., & Monticelli, C. (2016). The sustainability of adaptive envelopes: developments of kinetic architecture. *Procedia Engineering*, 155, pp. 275-284. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.029

Gasparini, K. (2009). *Design in superficie. Tecnologie dell'involucro architettonico mediatico*. FrancoAngeli, Milano. ISBN: 9788856805673

Grillo, E., & Sansotta, S. (2021). Experimentation of a new adaptive model for envelope systems. *Possible And Preferable Scenarios of A Sustainable Future. Towards 2030 and Beyond*, Vol.5, pp. 166-176. Palermo University Press, Palermo (Italy). DOI: 10.19229/978-88-5509-232-6/5102021

Harry, S. (2016). Dynamic Adaptive Building Envelopes–an Innovative and State-of-The-Art Technology. *Creative Space*. Vol.3, No-2, January 2016 pp. 167–183. Chitkara University

Hayes-Roth, B. (1995). An architecture for adaptive intelligent systems. *Artificial intelligence*, 72(1-2), pp. 329-365. DOI: 10.1016/0004-3702(94)00004-K

Hraska, J. (2018). Adaptive solar shading of buildings. *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 9(2), pp. 107-113. DOI: 10.1556/1848.2018.9.2.5

Knaack, U., Luible, A., Overend, M., Aelenei, L., Perino, M., Wellershof, F., & Brzezicki, M. (2015). *Adaptive facade network Europe*. TU Delft Open, 2015.

Loonen, R. C. G. M., Trcka, M., & Hensen, J. LM. (2011). Exploring the potential of climate adaptive building shells. In *Proceedings of building simulation1: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association*, Sydney, 14-16 November. Vol. 2011, pp. 2148-2155.

Loonen, R. C., Trčka, M., Cóstola, D., & Hensen, J. L. (2013). Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. *Renewable and sustainable energy reviews*, 25, pp. 483-493. DOI: 10.1016/j.rser.2013.04.016

Loonen, R. C. G. M. (2014). Shaping the next generation of adaptive facade concepts with the use of simulations. In *Facade2014-Conference on Building Envelopes*, 28 November 2014, Lucerne, Switzerland, pp. 84-95.

Loonen, R. C. G. M., Rico-Martinez, J. M., Favoino, F., Brzezicki, M., Ménézo, C., La Ferla, G., & Aelenei, L. (2015, November). Design for façade adaptability–Towards a unified and systematic characterization. In *Proc. 10th Energy Forum-Advanced Building Skins*, Bern, Switzerland (Vol. 1274, p. 1284).

Luible, A. (2014, May 15). *Memorandum of Understanding for the implementation of a European Concerted Research Action designated as COST Action TU1403: Adaptive Facades Network*. COST Action TU1403.

Mazzucchelli, E. S. (2018). L'involucro di edifici complessi: aspetti progettuali e costruttivi. *Modulo*, Voi, 415, 78-83.

Mazzucchelli, E. S., Aelenei, L. E., Gomes, M. D. G., Karlessi, T., Alston, M., & Aelenei, D. (2018). Passive adaptive façades: examples from COST TU1403 working group 1. In *Facade 2018-Adaptive: Adaptive Facades Network Final Conference*, pp. 63-72.

Modin, H. (2014). *Adaptive building envelopes*. Civil and Environmental Engineering, Master's Thesis 2014:147

Mohtashami, N., Fuchs, N., Fotopoulou, M., Drosatos, P., Streblow, R., Osterhage, T., & Müller, D. (2022). State of the Art of Technologies in Adaptive Dynamic Building Envelopes (ADBEs). *Energies*, 15(3), 829. DOI: 10.3390/en15030829

Perino, M., & Serra, V. (2015). Switching from static to adaptable and dynamic building envelopes: A paradigm shift for the energy efficiency in buildings. *Journal of Facade Design and Engineering*, 3(2), pp. 143-163. DOI 10.3233/FDE-150039

Romano, R., Aelenei, L., Aelenei, D., & Mazzucchelli, E. S. (2018). What is an adaptive façade? Analysis of Recent Terms and definitions from an international perspective. *Journal of Facade Design and Engineering*, 6(3), pp. 65-76. DOI: 10.7480/jfde.2018.3.2478

Zeng, Z., Chen, J., & Augenbroe, G. (2021). Movable window insulation as an instantiation of the adaptive building envelope: An investigation of its cost-effectiveness in the US. *Energy and Buildings*, 247, 111138. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111138

Adattività e Biomimetica

Al-Obaidi, K. M., Ismail, M. A., Hussein, H., & Rahman, A. M. A. (2017). Biomimetic building skins: An adaptive approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, pp. 1472-1491. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.028

López, M., Rubio, R., Martín, S. and Ben, C. (2017). How plants inspire façades. From plants to architecture: Biomimetic principles for the development of adaptive architectural envelopes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 67: pp.692-703. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.018

Pietroni, L., & Mascitti, J. (2006). Superfici biomimetiche. *MD Journal 1*(2006), 66-77. ISBN: 978-88-940517-3-5.

Adattività e prestazioni energetiche

Aksamija, A. (2013). *Sustainable facades: Design methods for high-performance building envelopes*. John Wiley & Sons. ISBN 978-1-118-45860-0

Bui, D.K., Nguyen, T.N., Ghazlan, A., Ngo, N.T. and Ngo, T.D. (2020). Enhancing building energy efficiency by adaptive façade: A computational optimization approach. *Applied energy*, 265, p.114797. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114797

Fiorito, F., Sauchelli, M., Arroyo, D., Pesenti, M., Imperadori, M., Masera, G., & Ranzi, G. (2016). Shape morphing solar shadings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, pp. 863-884. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.086

Hosseini, S. M., Mohammadi, M., Rosemann, A., Schröder, T., & Lichtenberg, J. (2019). A morphological approach for kinetic façade design process to improve visual and thermal comfort. *Building and Environment*, 153, 186-204. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.02.040

Hosseini, S. M., Mohammadi, M., & Guerra-Santin, O. (2019). Interactive kinetic façade: Improving visual comfort based on dynamic daylight and occupant's positions by 2D and 3D shape changes. *Building and Environment*, 165, 106396. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106396

Konstantoglou, M., & Tsangrassoulis, A. (2016). Dynamic operation of daylighting and shading systems: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, pp. 268-283. DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.246

Lee, D., Cho, Y. H., & Jo, J. H. (2021). Assessment of control strategy of adaptive façades for heating, cooling, lighting energy conservation and glare prevention. *Energy and Buildings*, 235, 110739. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.110739

Le-Thanh, L., Le-Duc, T., Ngo-Minh, H., Nguyen, Q. H., & Nguyen-Xuan, H. (2021). Optimal design of an Origami-inspired kinetic façade by balancing composite motion optimization for improving daylight performance and energy efficiency. *Energy*, 219, 119557. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119557

Loonen, R. C. G. M. (2018). *Approaches for computational performance optimization of innovative adaptive façade concepts.* Technische Universiteit Eindhoven. www. tue. nl/taverne. Consultato il: 9 novembre 2022

Wyckmans, A. (2005). *Intelligent Building Envelopes. Architectural Concept & Applications for Daylighting Quality.* Norwegian University of Science and Technology – Faculty of Architecture and Fine Art, Trondheim, Norway, PhD Thesis. Online: https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20745928 Consultato il: 9 novembre 2022

Adattività e Smart Materials

AAVV, (2022). *Materials 2030 Roadmap*, Draft, June 2022. Online: https://materiali.sostenibilita.enea.it/news/materials-2030-roadmap Consultato il: 15 novembre 2022

Addington, D. M., & Schodek, D. L. (2012). *Smart materials and new technologies: for the architecture and design professions.* Routledge. ISBN 0 7506 6225 5

Behl, M., & Lendlein, A. (2007). Shape-memory polymers. *Materials today*, 10(4), 20-28. DOI: 10.1016/S1369-7021(10)70128-0

Behl, M., Razzaq, M. Y., & Lendlein, A. (2010). Multifunctional shape-memory polymers. *Advanced materials*, 22(31), 3388-3410. DOI: 10.1002/adma.200904447

Bellouard, Y., Lehnert, T., Bidaux, J. E., Sidler, T., Clavel, R., & Gotthardt, R. (1999). Local annealing of complex

mechanical devices: a new approach for developing monolithic micro-devices. *Materials Science and Engineering: A*, 273, 795-798.

Benslimane, M.Y., Kiil, H. E., & Tryson, M. J. (2010). Dielectric electro-active polymer push actuators: performance and challenges. *Polymer International*, 59(3), 415-421. DOI: 10.1002/pi.2768

Buanne, M. (2015). New materials for smart envelope. *Tema: Technology, Engineering, Materials and Architecture*, 1(1), pp. 178-183. (cit. pag. 181).

Decker, M. (2013). EMERGENT FUTURES: nanotechology and emergent materials in architecture. In *Conference of Tectonics of Teaching: Building Technology Educators Society* (BTES)., Newport: Rhode Island.

de Gracia, A. (2019). Dynamic building envelope with PCM for cooling purposes–Proof of concept. *Applied energy*, 235, pp. 1245-1253. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.11.061

Di Salvo, S. (2016). Smart Materials in Architecture. In *International Journal of Engineering Research in Africa* (Vol. 23, pp. 72-79). Trans Tech Publications Ltd. DOI: 10.4028/www.scientific.net/JERA.23.72

Duerig, T., Pelton, A., & Stöckel, D. J. M. S. (1999). An overview of nitinol medical applications. *Materials Science and Engineering: A*, 273, 149-160.

Elahinia, M., Andani, M. T., & Haberland, C. (2014). Shape memory and superelastic alloys. High Temperature *Materials and Mechanisms*, 355. ISBN 9781138071544

Fan, K., Huang, W. M., Wang, C. C., Ding, Z., Zhao, Y., Purnawali, H., ... & Zheng, L. X. (2011). Water-responsive shape memory hybrid: design concept and demonstration. *Express Polymer Letters*, 5(5). DOI: 10.3144/expresspolymlett.2011.40

Goia, F. (2013). *Dynamic Building Envelope Components and nearly Zero Energy Buildings: Theoretical and experimental analysis of concepts, systems and technologies for an adaptive building skin*. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Fakultet for arkitektur og billedkunst, Institutt for byggekunst, historie og teknologi.

Hager, M. D., Bode, S., Weber, C., & Schubert, U. S. (2015). Shape memory polymers: Past, present and future developments. *Progress in Polymer Science*, 49, 3-33. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2015.04.002

Hodgins, M., Rizzello, G., Naso, D., York, A., & Seelecke, S. (2014). An electro-mechanically coupled model for the dynamic behavior of a dielectric electro-active polymer actuator. *Smart Materials and Structures*, 23(10), 104006. DOI: 10.1088/0964-1726/23/10/104006

Huang, W. M., Ding, Z., Wang, C. C., Wei, J., Zhao, Y., & Purnawali, H. (2010). Shape memory materials. M*aterials today*, 13(7-8), 54-61. DOI: 10.1016/S1369-7021(10)70128-0

Huang, W. M., Zhao, Y., Wang, C. C., Ding, Z., Purnawali, H., Tang, C., & Zhang, J. L. (2012). Thermo/chemo-responsive shape memory effect in polymers: a sketch of working mechanisms, fundamentals and optimization. *Journal of Polymer Research*, 19(9), 1-34. DOI: 10.1007/s10965-012-9952-z

Hu, J., Zhu, Y., Huang, H., & Lu, J. (2012). Recent advances in shape–memory polymers: Structure, mechanism, functionality, modeling and applications. *Progress in polymer science*, 37(12), 1720-1763. DOI: 10.1007/s10853-007-2176-7

Kanaani, M., & Kopec, D. (2016). *The Routledge Companion for Architecture Design and Practice*. New York, NY: Routledge. ISBN 9781315775869

Yamauchi, K., Ohkata, I., Tsuchiya, K., & Miyazaki, S. (Eds.). (2011). *Shape memory and superelastic alloys: Applications and technologies*. Elsevier. ISBN: 9780081017012

Juaristi, M., Monge-Barrio, A., Sánchez-Ostiz, A., & Gómez-Acebo, T. (2018). Exploring the potential of smart and multifunctional materials in adaptive opaque façade systems. *Journal of Facade Design and Engineering*, 6(2), pp. 107-117. DOI: 10.7480/jfde.2018.2.2216

Konarzewska, B. (2017). Smart materials in architecture: useful tools with practical applications or fascinating inventions for experimental design?. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 245, No. 5, p. 052098). IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/245/5/052098

Liu, C., Qin, H., & Mather, P. T. (2007). Review of progress in shape-memory polymers. J*ournal of materials chemistry*, 17(16), 1543-1558. DOI: 10.1039/B615954K

Menges, A., & Reichert, S. (2012). Material capacity: embedded responsiveness. *Architectural Design,* 82(2), pp. 52-59. DOI: 10.1002/ad.1379

Orhon, A. V. (2016). *Adaptive building shells. In Developments in Science and Engineering,* 555-567. Chapter: 39. Publisher: St. Kliment Ohridski University Press. Editors: R. Efe, L. Matchavariani, A. Yaldir, L. Lévai. ISBN: 978-954-07-4137-6

Sala, M., & Romano, R. (2011). Innovazione per l'involucro architettonico: Smart Facade per edifici non residenziali. *TECHNE: Journal of Technology for Architecture & Environment,* 2, pp. 158-169. ISSN online: 2239-0243

Saidam, M. W., Al-Obaidi, K. M., Hussein, H., & Ismail, M. A. (2017). The application of smart materials in building facades. *Ecology, Environment and Conservation,* 23 (Nov. Suppl. Issue), S8-11. ISSN 0971–765X

Villegas, J. E., Gutierrez, J. C. R., & Colorado, H. A. (2020). Active materials for adaptive building envelopes: A review. *Journal of Materials and Environmental Science,* 11, 988-1009. ISSN : 2028-2508

UE Commission (2011/696). *RECOMENDACIÓN DE LA COMISIÓN de 18 de octubre de 2011 relativa a la definición de nanomaterial.* (2011/696/UE). Online: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011H0696&from=PL Consultato il: 18 maggio 2022

Wang, T. X., Renata, C., Chen, H. M., & Huang, W. M. (2017). Elastic shape memory hybrids programmable at around body-temperature for comfort fitting. *Polymers*, 9(12), 674. DOI: 10.3390/polym9120674

Zhao, Z., Shuai, C., Gao, Y., Rustighi, E., & Xuan, Y. (2016). An application review of dielectric electroactive polymer actuators in acoustics and vibration control. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 744, No. 1, p. 012162). IOP Publishing. DOI:10.1088/1742-6596/744/1/012162

Approcci tecnologici ed efficienza energetica

Becker, R. (2008). Fundamentals of performance-based building design. In *Building Simulation*, Vol. 1, No. 4, pp. 356-371. Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/s12273-008-8527-8

Erebor, E. M., Ibem, E. O., Ezema, I. C., & Sholanke, A. B. (2021). Energy Efficiency Design Strategies in Office Buildings: A Literature Review. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 665, No. 1, p. 012025). IOP Publishing. DOI: :10.1088/1755-1315/665/1/012025

Hensen, J. L., & Lamberts, R. (2012). *Building performance simulation for design and operation*. Routledge. ISBN13: 978–0–415–47414–6

Kumar, G., & Raheja, G. (2016). Design determinants of building envelope for sustainable built environment: a review. *International Journal of Built Environment and Sustainability*, 3(2), pp. 111-118. DOI: 10.11113/ijbes.v3.n2.127

Lehmann, S. (2011). Energy-Efficient building design: towards climate-responsive architecture. *Sustainable Built Environment*, UNESCO, Encyclopedia of Life Support Systems, pp. 1-11.

Zanchetta, C., Croatto, G., Paparella, R., & Turrini, U. (2014). Il performance based building design per la qualità edilizia: dalla normalizzazione alla LEAN construction/Performance based building design to ensure building quality: from standardization to LEAN construction. *Techne*, 8, pp. 62-69. ISSN online: 2239-0243

Capitolo 5 *Il tema specifico_* Le facciate continue e la scelta del caso studio

Facciate continue e tecnologie

Cascone, S. (2016). Analisi e progetto di facciate continue a cellula. In *Colloqui.AT.e 2016 Convegno Ar.Tec – Matera.* [a cura di Guida, A., Pagliuca, A.]. pp. 1-10. Gangemi Editore, Roma. ISBN 978-88-492-3312-4

CMHC (2004). *Glass and metal curtain walls* (Best practice guide, building technology). Canada Mortgage and Housing Corporation (CMHC), Canada. ISBN 0-660-19394-9

Fitch, J. M. (1955). *The Curtain Wall. Scientific American*, 192(3), 44-49. Online avaible at: http://www.jstor.org/stable/24944576

Herzog, T., Krippner, R., & Lang, W. (2017). *Facade construction manual. English translation of the second, revised and expanded German edition* (2016). ISBN: 978-3-95553-369-4

Klein, T. (2013). *Integral Facade Construction: Towards a new product architecture for curtain walls*. TU Delft. ISBN 9789461861610

Knaack, U., Klein, T., Bilow, M., & Auer, T. (2014). *Façades: principles of construction*. Birkhäuser.

Marquis, P., Mirahadi, F., Ali, H., McCabe, B., Shahi, A., De Berardis, P., & Lyall, R. (2017). *Window wall and curtain wall: An objective review*. Leadership in Sustainable Infrastructure.

Mazzucchelli, E. S., & Anagni, G. M. (2021). Il vetro diventa" portante". *NUOVA FINESTRA*, 479, pp. 52-60.

Murray, S. (2009). *Contemporary curtain wall architecture*. Princeton Architectural Press. ISBN-10 1568987978

Rossetti, M. (2019). *L'involucro architettonico contemporaneo*. Maggioli Editore, Sant'Arcangelo di Romagna. ISBN: 8891634467

Taywade, P., & Shejwai, S. (2015). Structural design of a Glass Facade. *International Journal of Scientific and Research Publications*, Volume 5, Issue 3, pp. 1-6. March 2015. ISSN 2250-3153

Trabucco, D. (2019). Progettare i grattacieli, oggi. Osservazioni sull'evoluzione tecnologica e morfologica degli edifici alti. *TECHNE: Vol. 17*, pp. 110-118. DOI: 10.13128/Techne-23894

Facciate continue e valutazione caratteristiche prestazionali

Bedon, C., Zhang, X., Santos, F., Honfi, D., Kozłowski, M., Arrigoni, M., ... & Lange, D. (2018). Performance of structural glass facades under extreme loads–Design methods, existing research, current issues and trends. *Construction and Building Materials,* 163, pp. 921-937, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.153

Kaskel, B. S., Scheffler, M. J., & Chin, I. R. (1998). Critical Review of Curtain Wall Mockup Testing for Water Penetration. *ASTM SPECIAL TECHNICAL PUBLICATION*, 1314, 218-231. ISBN-10: 0803120427

Kazmierczak, K., & Hershfi, M. (2010). Review of curtain walls, focusing on design problems and solutions. *Building Enclosure Science & Technology*, Portland, April, pp. 12-14.

Gonjalves, M. D., Jutras, R., & Velji, M. (2010). Evaluating the field performance of windows and curtain walls of large buildings. *Symposium on building envelope technology*. November 2007, pp. 57-65.

Ilter, E., Tavil, A., & Celik, O. C. (2015). Full-scale performance testing and evaluation of unitized curtain walls. *Journal of Facade Design and Engineering*, 3(1), pp. 39-47. DOI: 10.3233/FDE-150028
Martinez, A., Patterson, M., Carlson, A., & Noble, D. (2015). Fundamentals in façade retrofit practice. *Procedia engineering*, 118, pp. 934-941. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.534

Matthews, R.S., Bury M.R.C., & Redfearn D. (1996). Investigation of dynamic water penetration tests for curtain walling. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 60, pp. 1-16. DOI: 10.1016/0167-6105(96)00020-7

Sanders, R. M., & Craig, A. (2012). Preventing and Treating Failure in Glazed Curtain Wall Systems. *Journal of architectural technology* ISSUE 2/2012, Vol. 29, pp. 1-8. Hoffmann Architects, Inc.
Rigone, P. (2011). *Le facciate continue. La manutenzione dell'involucro edilizio vetrato* (Vol. 2). Maggioli Editore. EAN: 9788838759123

Song, Y. W., Park, J. C., Chung, M. H., Choi, B. D., & Park, J. H. (2013). Thermal performance evaluation of curtain wall frame types. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 12(1), pp. 157-163. DOI: 10.3130/jaabe.12.157
Yalaz, E. T., Tavil, A., & Celik, O. C. (2016). Curtain wall deficiency and failures. *Facade Tectonics Institute, 2016 World Congress*, pp. 1-10.

Yalaz, E. T., Tavil, A. U., & Celik, O. C. (2018). Lifetime performance evaluation of stick and panel curtain wall systems by full-scale testing. *Construction and Building Materials,* 170, pp. 254-271. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.061

Wong Wan Sie, W. (2007). *Analysis and design of curtain wall systems for high rise buildings.* (cit. p. 25). University of Southern Queensland Faculty of Engineering and Surveying. Online: https://core.ac.uk/display/11037357 Consultato il: 25 novembre 2022

Capitolo 6 *Analisi Simulativa_* Dal design del mock-up alla simulazione su software parametrico

Facciate continue e progettazione tecnologica

Bae, M. J., Oh, J. H., & Kim, S. S. (2015). The effects of the frame ratio and glass on the thermal performance of a curtain wall system. *Energy Procedia*, 78, pp. 2488-2493. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.234

Bassolino, E. (2014). Strumenti IT per il controllo ambientale negli interventi di riqualificazione degli spazi aperti in regime di Climate Change. *urbanistica*, 41, 16. ISSN n. 0392-5005

CMHC (2004). *Glass and metal curtain walls* (Best practice guide, building technology). Canada Mortgage and Housing Corporation (CMHC), Canada. ISBN 0-660-19394-9

Cuce, E., Young, C. H., & Riffat, S. B. (2014) (a). Performance investigation of heat insulation solar glass for low-carbon buildings. *Energy Conversion and Management*, 88, pp. 834-841. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.09.021

Cuce, E., Cuce, P. M., Wood, C. J., & Riffat, S. B. (2014) (b). Optimizing insulation thickness and analysing environmental impacts of aerogel-based thermal superinsulation in buildings. *Energy and Buildings*, 77, pp. 28-39. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.03.034

Cuce, E., Riffat, S. B., & Young, C. H. (2015). Thermal insulation, power generation, lighting and energy saving performance of heat insulation solar glass as a curtain wall application in Taiwan: a comparative experimental study. *Energy Conversion and Management*, 96, pp. 31-38. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.02.062

McFarquhar, D. G. (2013). Testing mockups and field inspection. In Committee on Curtain Wall Systems. (2013). Curtain wall systems: a primer. *American Society of Civil Engineers,* edited by Ali M. Memari, Ph. D., P.E. (pp. 33-55). ISBN 978-0-7844-7768-7

Mempouo, B., Cooper, E., & Riffat, S. B. (2010). Novel window technologies and the code for sustainable homes in the UK. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 5(4), pp. 167-174. DOI: 10.1093/ijlct/ctq013

Parametric design e strumenti di simulazione

Aguilar-Carrasco, M. T., Díaz-Borrego, J., Acosta, I., Campano, M. Á., & Domínguez-Amarillo, S. (2022). Validation of lighting parametric workflow tools of Ladybug and Solemma using CIE test cases. *Journal of Building Enginee-*

ring, 105608. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.105608

Blocken, B. (2015). Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *Building and Environment*, 91, pp. 219-245. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.02.015

Eltaweel, A., & Yuehong, S. U. (2017). Parametric design and daylighting: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, pp. 1086-1103. DOI: 10.1016/j.rser.2017.02.011

Glassman, E. J., & Reinhart, C. (2013). Facade optimization using parametric design and future climate scenarios. In *Proceedings of the 13th Conference of International Building Performance Simulation Association*, Chambery, France, pp. 26-28.

Hsu, M. C., Wang, C., Herrema, A. J., Schillinger, D., Ghoshal, A., & Bazilevs, Y. (2015). An interactive geometry modeling and parametric design platform for isogeometric analysis. *Computers & Mathematics with Applications*, 70(7), pp. 1481-1500. DOI: 10.1016/j.camwa.2015.04.002

Lagios, K., Niemasz, J., & Reinhart, C. F. (2010). Animated building performance simulation (ABPS)–linking Rhinoceros/Grasshopper with Radiance/Daysim. *Proceedings of SimBuild*, 4(1), pp. 321-327.

Naboni, E. (2014). Integration of outdoor thermal and visual comfort in parametric design. In *30th International PLEA Conference*, pp. 1-10. DOI:10.13140/2.1.1448.4808

Pacifici, M., & Nieto-Tolosa, M. (2021). Comparing ENVI-Met and Grasshopper Modelling Strategies to Assess Local Thermal Stress and Urban Heat Island Effects. *Urban Microclimate Modelling for Comfort and Energy Studies*, pp. 293-316. DOI: 10.1007/978-3-030-65421-4_14

Ricci, A., Ponzio, C., Fabbri, K., Gaspari, J., & Naboni, E. (2021). Development of a self-sufficient dynamic façade within the context of climate change. *Architectural Science Review*, 64(1-2), pp. 87-97. DOI: 10.1080/00038628.2020.1713042

Tsoka, S., Tsikaloudaki, A., & Theodosiou, T. (2018). Analyzing the ENVI-met microclimate model's performance and assessing cool materials and urban vegetation applications–A review. *Sustainable cities and society*, 43, pp. 55-76. DOI: 10.1016/j.scs.2018.08.009

Wagdy, A., & Fathy, F. (2015). A parametric approach for achieving optimum daylighting performance through solar screens in desert climates. *Journal of Building Engineering*, 3, pp. 155-170. DOI: 10.1016/j.jobe.2015.07.007

Capitolo 7 *Analisi Sperimentale_* Azioni di testing finalizzate alla verifica prestazionale

Facciate continue e processi di testing

Ilter, E., Tavil, A., & Celik, O. C. (2015). Full-scale performance testing and evaluation of unitized curtain walls. *Journal of Facade Design and Engineering*, 3(1), pp.39-47. DOI: 10.3233/FDE-150028

Lucarelli, M. T. (2015). Sostenibilità edilizia ed aspetti sperimentali. In Lauria, M. & Trombetta, C. (eds). *Building Future Lab. Ricerca sperimentale per la Sostenibilità nel Settore delle Costruzioni.* pp. 223-225. Maggioli Editore. Rimini.

Mazzucchelli, E. S., Rigone, P., Giussani, P., & Milardi, M. (2022). Façade performances assessment and essential on-site and off-site laboratory testing. In *17th Advanced Building Skins Conference & Expo*. pp. 255-264. Advanced Building Skins GmbH. ISBN 9783952488331

Milardi, M. (2015). Strumenti e protocolli per il testing avanzato nelle attività di ricerca. TestLab TestRoom TestCell. In Lauria, M. & Trombetta, C. (eds). *Building Future Lab. Ricerca sperimentale per la Sostenibilità nel Settore delle Costruzioni.* pp. 223-225. Maggioli Editore. Rimini.

Milardi, M., Grillo, E., & Sansotta, S. (2021) (a). Testing for adaptive envelope. *Quaderni SID (Sustainable Innovation Design)*, Vol. 3, 2021, Aracne Editrice. pp. 96-102. ISBN: 978-88-255-4040-6.

Milardi, M. Mandaglio, M., Grillo, E., Musarella, C. C., Sansotta, S., Tramonti, N., & Trombetta, C. (2021) (b). Testing and experimentation on building envelope under climate change. *Proceeding International Conference CEES2021*, 12-15 October 2021, Coimbra Portugal. Online avaible at: https://iris.unirc.it/handle/20.500.12318/111200

Trombetta, C. & Milardi, M. (2015). BUILDING FUTURE Lab.: a great infrastructure for testing. *Energy procedia*, n. 78, pp. 657-662. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.053

Trombetta, C., Cavanna, G., Grillo, E., Mandaglio, M., Musarella, C. C., Sansotta, S., & Milardi, M. (2022). Testing Processes for Building Envelope Innovation. *COBEE 2022 5 th International Conference on Building Energy and Environment*, 25-29 July, Montreal.

Yalaz, E. T., Tavil, A. U., & Celik, O. C. (2018). Lifetime performance evaluation of stick and panel curtain wall systems by full-scale testing. *Construction and Building Materials*, 170, pp. 254-271. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.061

2. Riferimenti sitografici

www.aemet.es/es/portada Consultato il: 7 ottobre 2022

www.arup.com/perspectives/responsive-facades-for-smarter-cities Consultato il: 13 settembre 2022

www.bell-wright.com/curtain-wall-testing/ Consultato il: 7 ottobre 2022

www.bdcnetwork.com/how-and-why-building-envelopes-fail-building-forensics-expert Consultato il: 7 ottobre 2022

https://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-3/auxiliary-programs/energyplus-weather-file-epw-data-dictionary.html#field-extraterrestrial-horizontal-radiation Consultato il: 5 novembte 2022

https://buildingtocop.org/ Consultato il: 1 dicembre 2022

www.burohappold.com/ Consultato il: 1 ottobre 2022

https://calabriaeuropa.regione.calabria.it/s3 Consultato il: 2 dicembre 2022

www.carbonbrief.org/mapped-how-climate-change-affects-extreme-weather-around-the-world/ Consultato il: 7 ottobre 2022

https://climateactiontracker.org/countries/eu/ Consultato il: 8 settembre 2022

https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/countries-regions/countries/italy Consultato il: 8 settembre 2022

https://www.climatechangepost.com/spain/climate-change/ Consultato il: 8 settembre 2022

https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/italy Consultato il: 8 settembre 2022

https://codes.iccsafe.org/content/IBC2018/chapter-14-exterior-walls Consultato il: 11 ottobre 2022

www.construction21.org/articles/h/built-environment-measuring-climate-change-impact.html Consultato il: 15 ottobre 2022

www.constructionspecifier.com/glass-spandrels-and-shadow-boxes-design-and-construction-considerations/ Consultato il: 15 ottobre 2022

www.constructionspecifier.com/field-mockups-for-exterior-wall-systems-will-the-design-pass-the-test/3/ Consultato il: 15 ottobre 2022

https://cordis.europa.eu/programme/id/H2020_DT-NMBP-05-2020/it Consultato il: 3 novembre 2022

https://www.constructionspecifier.com/five-common-failures-in-curtain-wall-installation/ Consultato il: 3 novembre 2022

www.curtainwall-cladding-info.com/gfrc_cladding_system.html Consultato il: 20 ottobre 2022

www.dataclime.com/ Consultato il: 2 ottobre 2022

www.designboom.com/project/adaptive-skins/ Consultato il: 10 novembre 2022

https://earth.bsc.es/shiny/medprojections-shiny_app/ Consultato il: 9 settembre 2022

https://encyclopedia.pub/entry/19809 Consultato il: 9 settembre 2022

www.epa.gov/climate-indicators/weather-climate Consultato il: 9 settembre 2022

https://esd.copernicus.org/articles/13/321/2022/esd-13-321-2022-discussion.html Consultato il: 9 settembre 2022

http://finestre-affacciate.it/blog/facciate-continue-new-norme-tecniche-e-legislazione-159.html Consultato il: 10 novembre 2022

www.fortunebusinessinsights.com/glass-curtain-wall-market-103912 Consultato il: 22 settembre 2022

www.gciconsultants.com/blog/glazed-curtain-wall-systems-failures-litigation/ Consultato il: 22 settembre 2022

www.glasscon.com/?gclid=CjoKCQjwytOEBhD5ARIsANnRjVh91BRSuxYFx-Da7k_chPNXDrgTy5qCaw90Ohly-UCZwHlYPqA2TigQaAsCHEALw_wcB Consultato il: 22 settembre 2022

www.glassonweb.com/article/adaptive-facades-systems-made-thin-glass Consultato il: 17 novembre 2022

www.hoffarch.com/assets/journal1171.pdf Consultato il: 22 settembre 2022

www.iberdrola.com/sustainability/extreme-weather-events Consultato il: 5 settembre 2022

www.iea.org/fuels-and-technologies/building-envelopes Consultato il: 25 settembre 2022

www.iea.org/reports/building-envelopes Consultato il: 10 novembre 2022

www.iemed.org/publication/climate-change-in-the-mediterranean-environmental-impacts-and-extreme-events/ Consultato il: 28 settembre 2022

www.interempresas.net/Fachadas/Articulos/321632-El-vidrio-en-la-fachada-Patologias-y-soluciones.html Consultato il: 8 novembre 2022

www.ipcc.ch/ Consultato dal: 13 gennaio 2022

https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/97/7/bams-d-14-00176.1.xml Consultato il: 16 ottobre 2022

www.medecc.org/ Consultato il: 16 ottobre 2022

www.medqsr.org/climate-change Consultato il: 13 settembre 2022

https://methodstatementhq.com/installation-of-glazed-aluminum-curtain-wall-composite-cladding.html Consultato il: 16 ottobre 2022

https://metabuilding-labs.eu/ Consultato il: 4 dicembre 2022

www.miteco.gob.es/es/ceneam/recursos/pag-web/adaptecca.aspx Consultato il: 2 ottobre 2022

https://nhbc-standards.co.uk/6-superstructure-excluding-roofs/6-9-curtain-walling-and-cladding/ Consultato il: 2 ottobre 2022

https://nca2014.globalchange.gov/highlights/report-findings/extreme-weather Consultato il: 6 settembre 2022

www.noaa.gov/ Consultato il: 6 settembre 2022

www.reynaers.com/inspiration/stories/reynaers-aluminium-curtain-walls-design-and-performance-one Consultato il: 4 novembre 2022

https://www.sinisavuckovic.com/as051curtainwalls.html Consultato il: 28 ottobre 2022

https://taccalandingpage.wordpress.com/testimonial/la-guida-del-vetro-shock-termico/ Consultato il: 15 novembre 2022

www.thenbs.com/knowledge/climate-change-adaptation-in-buildings-wind Consultato il: 15 novembre 2022

https://tu1403.eu/?page_id=1562 Consultato il: 18 ottobre 2022

www.unep.org/unepmap/resources/factsheets/climate-change Consultato il: 11 settembre 2022

www.wbcsd.org/Overview/News-Insights/Member-spotlight/How-the-built-environment-must-respond-to-the-IPCC-s-2021-climate-change-report Consultato il: 11 settembre 2022

www.wbdg.org/guides-specifications/building-envelope-design-guide/fenestration-systems/curtain-walls#:~:text=A%20curtain%20wall%20is%20defined,roof%20loads%20of%20the%20building. Consultato il: 9 novembre 2022

www.wbdg.org/resources/wind-safety-building-envelope Consultato il: 10 novembre 2022

https://wfmmedia.com/facade-actions-climate-change-and-wellbeing-arup-engineers/ Consultato il: 10 ottobre 2022

https://wfmmedia.com/effective-curtain-walling-for-efficient-buildings/ Consultato il: 10 ottobre 2022

https://wfmmedia.com/evaluating-the-field-performance-of-windows-and-curtain-walls-of-large-buildings/ Consultato il: 10 ottobre

3. Riferimenti tecnico-normativi

AAMA 501.1-17: Standard Test Method for Water Penetration of Windows, Curtain Walls and Doors Using Dynamic Pressure

AAMA-501.5 (2007): Test Method for Thermal Cycling of Exterior Walls

ASTM E283-04 (2012): Standard Test Method for Determining Rate of Air Leakage Through Exterior Windows, Curtain Walls, and Doors Under Specified Pressure Differences Across the Specimen

ASTM E331-00(2009): Standard Test Method for Water Penetration of Exterior Windows, Skylights, Doors, and Curtain Walls by Uniform Static Air Pressure Difference

ASTM E330 Standard Test Method for Structural Performance of Exterior Windows, Doors, Skylights and Curtain Walls by Uniform Static Air Pressure Difference

EN 13830:2015+A1:2020: Curtain walling - Product standard

EN 13119:2016: Curtain walling – Terminology

UNI EN 12153: Curtain walling - Air permeability - Test method

UNI EN 12155: Curtain walling – Watertighness - Laboratory test under static pressure

UNI EN 12179: Curtain walling- Resistence to wind load – Test Method

UNI EN 13050: Curtain Walling - Watertightness - Laboratory test under dynamic condition

UNI EN 13051: Curtain Walling - Watertightness - Site test

UNI EN 14019: Curtain Walling - Impact resistance - Performance requirements

UNI EN ISO 10077-1:2017 Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Part 1: General (ISO 10077-1:2017)

Glossario

Adattamento
Processo di adeguamento al clima attuale o previsto e ai suoi effetti, al fine di moderare i danni o sfruttare opportunità benefiche, di facilitare per gli ecosistemi naturali l'adattamento al clima reale e ai suoi effetti, di aumentare la resilienza e ridurre la vulnerabilità delle persone e degli ecosistemi ai cambiamenti climatici. Ad esempio, la costruzione di argini più resistenti e dighe marine più alte, l'uso di sementi che producono raccolti più resistenti, permettono di gestire gli "effetti climatici collaterali". Le strategie e le misure di adattamento possono essere strutturali, istituzionali, ecologiche o comportamentali.

Acqua non controllata
Qualsiasi perdita non contenuta e drenata durante l'operazione di nebulizzazione dell'acqua e per 5 minuti dopo l'interruzione della nebulizzazione, durante i quali il differenziale di pressione dell'aria sulla facciata è pari a zero.

Carico del vento di progetto
La pressione del carico del vento che un sistema vetrato deve sopportare nell'applicazione finale.

Cambiamento climatico
Secondo il Report del 2014 dell'IPCC, "*Il cambiamento climatico si riferisce a un cambiamento nello stato del clima che può essere identificato (per esempio, usando test statistici) da cambiamenti nella media e/o nella variabilità delle sue proprietà e che persiste per un periodo esteso, tipicamente decenni o più. Il cambiamento climatico può essere dovuto a processi interni naturali o a forzature esterne come le modulazioni dei cicli solari, le eruzioni vulcaniche e i cambiamenti antropogenici persistenti nella composizione dell'atmosfera o nell'uso del suolo*".

Cedimento di guarnizioni e dei sigillanti a vista
Inclusi i sigillanti perimetrali, da movimenti di facciata continua (termica, strutturale), degrado ambientale. Le riparazioni richiedono l'accesso dall'esterno.I telai in alluminio sono intrinsecamente resistenti alla corrosione in molti ambienti se anodizzati e opportunamente sigillati o verniciati con vernice fluoropolimerica cotta. I telai in alluminio sono soggetti al deterioramento del rivestimento e alla corrosione dell'alluminio in ambienti gravosi (industriali, costieri) e alla corrosione galvanica da contatto con metalli dissimili. Le guarnizioni angolari del telaio realizzate con sigillante tendono a distaccarsi a causa del contatto prolungato con l'umidità e dei movimenti termici, strutturali e di trasporto.

Cedimento dI guarnizioni e dei sigillanti interni
A causa dei movimenti della facciata continua (termica, strutturale), esposizione prolungata all'acqua (buone caratteristiche di drenaggio riducono questo rischio), degrado del calore/sole/UV (età). Le riparazioni (se fattibili) richiedono un notevole smontaggio della facciata continua. Se il ripristino delle guarnizioni interne non è fisicamente possibile o non è economicamente fattibile, viene spesso eseguita l'installazione della sigillatura a umido della superficie esterna in corrispondenza di tutti i giunti di vetri e telai.

Differenziale di pressione
Differenza tra la pressione esterna e la pressione interna attraverso un provino chiuso e bloccato, espressa in Pascal (lbf/ft^2). Si parla di pressione positiva quando la pressione esterna di finestre e porte è superiore alla pressione interna e di pressione negativa quando la pressione esterna è inferiore alla pressione interna.

Estrusione
Operazione meccanica per fabbricare tubi o barre profilate di metallo, e di resine sintetiche, sfruttando la plasticità del materiale a conveniente temperatura. Si usano presse idrauliche di grande potenza capaci di dare pressioni di alcune tonnellate per cmq. La matrice, fatta di acciai speciali, è applicata alla parte terminale della filiera e serve a foggiare il materiale che viene spinto a forza; si può passare agevolmente la lavorazione da un profilo ad un altro cambiando solamente la matrice. I metalli che si estrudono sono: piombo, stagno, alluminio e le sue leghe, ottone, rame e le sue leghe.

Evento meteorologico estremo
Evento raro in un particolare luogo e periodo dell'anno. Le definizioni di raro variano, ma un evento meteorologico estremo sarebbe normalmente raro quanto o più raro del 10° o 90° percentile di una funzione di densità di probabilità stimata dalle osservazioni. Per definizione, le caratteristiche di quello che viene chiamato clima estremo possono variare da luogo a luogo in senso assoluto. Quando un modello di condizioni meteorologiche estreme persiste per un certo periodo di tempo, come una stagione, può essere classificato come un evento climatico estremo, soprattutto se produce una media o un totale che è esso stesso estremo (ad esempio, siccità o forti precipitazioni durante una stagione).
Facciata
Rivestimento esterno che trasferisce i carichi del vento agli elementi portanti o alla struttura (comprese le facciate continue).

Facciate continue o Curtain walling
Costituiscono l'involucro esterno di un edificio e sono realizzate mediante un'intelaiatura costituita generalmente da profili orizzontali e verticali, collegati insieme e ancorati alla struttura di sostegno dell'edificio e contenenti tamponamenti fissi e/o apribili, traslucidi e/o opachi.

Fallimenti della vetratura
I problemi di vetratura specifici per la costruzione di facciate continue includono l'ostruzione visiva dovuta a condensa o sporco, danni alle pellicole opacizzanti dovuti al degrado del materiale, condensa e/o accumulo di calore e problemi di vetrocamera/vetro stratificato.

Feedback climatico
Un'interazione in cui una perturbazione in una quantità climatica provoca un cambiamento in un secondo e il cambiamento nella seconda quantità porta infine a un ulteriore cambiamento nella prima. Un feedback negativo è quello in cui la perturbazione iniziale è indebolita dai cambiamenti che provoca; un feedback positivo è quello in cui la perturbazione iniziale è migliorata. La perturbazione iniziale può essere forzata dall'esterno o sorgere come parte della variabilità interna.

Fermavetro
Profilato applicato lungo il perimetro nelle varie svecchiature di un serramento con la funzione di mantenere in posizione il vetro o il pannello di tamponamento. Può essere fissato a scatto con appositi denti di aggancio o per mezzo di tasselli o mollette metalliche o in materiale plastico.

Foro di drenaggio
Foro o asola che permette il deflusso all'esterno dell'eventuale acqua di infiltrazione.

Forzanti climatiche
Sono fattori che influenzano il clima generando un cambiamento nel sistema climatico. Detti anche drivers del cambiamento climatico, sono fattori esterni che alterano il bilancio energetico del pianeta, tra la radiazione solare in entrata e la radiazione infrarossa in uscita, che regola la temperatura superficiale terrestre. L'effetto dell'azione di ogni driver sull'equilibrio radiativo si misura generalmente con una grandezza definita *forzante radiativa*. Il clima cambia nel tempo sotto l'azione di forzanti climatiche naturali e antropiche. Tra le forzanti naturali c'è la variazione dell'intensità della radiazione solare e le grandi eruzioni vulcaniche. Tra le forzanti antropiche c'è l'aumento di gas serra di origine antropica, soprattutto CO_2 e la modifica dell'uso del suolo. Dall'inizio dell'era industriale la forzante radiativa della componente antropica è stata dominante rispetto a quella naturale.

g - Fattore solare (%25)
Rapporto percentuale tra la radiazione solare globalmente trasmessa dal vetro (somma della radiazione direttamente trasmessa TE e di quella assorbita e rimessa all'interno per convezione e irraggiamento nell'infrarosso termico) e la radiazione solare incidente sul vetro stesso.

Giunto aperto
Sistema di tenuta nel quale una guarnizione centrale crea una camera esterna di compensazione della pressione del vento e di raccolta dell'acqua di infiltrazione. La pressione del vento agisce sulla linguetta della guarnizione centrale e ne aumenta l'adesione sul telaio mobile migliorandone, così, la tenuta.

Gocciolatoio
Elemento dei profilati orizzontali che favorisce lo scolo dell'acqua proteggendo il serramento.

Guarnizioni di tenuta
Guarnizioni inserite tra la sede per il vetro e la stessa lastra di vetro. Hanno lo scopo di assicurare la tenuta aria-acqua e suono e di mantenere il vetro isolato dal telaio per impedire vibrazioni e passaggio di calore.

Impatti dei cambiamenti climatici
Sono gli effetti degli eventi meteorologici e climatici estremi e dei cambiamenti climatici, sui sistemi naturali e umani. Gli impatti generalmente si riferiscono agli effetti su persone, abitazioni, salute, ecosistemi, beni e risorse economiche, sociali e culturali, servizi (inclusi quelli ambientali) e infrastrutture. Sono dovuti all'interazione dei cambiamenti climatici o degli eventi climatici pericolosi che si presentano entro uno specifico periodo di tempo, e alla vulnerabilità di una società o di un sistema esposti ai cambiamenti climatici stessi. Le conseguenze dei cambiamenti climatici sui sistemi geofisici, compresi alluvioni, siccità e innalzamento del livello del mare, rappresentano un sottoinsieme di impatti denominati impatti fisici.

Infiltrazione d'acqua
La penetrazione d'acqua che bagna in modo continuo o ripetuto parti di un edificio o componenti non progettati per essere bagnati.

Involucro edilizio
Superficie di controllo che delimita il sistema termodinamico dell'ambiente costruito, interpretando l'equilibrio e le sue parti come elementi di mediazione e scambi di flusso tra interno ed esterno.

Microclima
Atmosfera artificiale determinata in un ambiente confinato da alcuni parametri chimici e fisici dell'aria: purezza, temperatura, umidità, ventilazione, pressione che influenzano gli scambi termici tra soggetto e ambiente negli spazi confinati determinando il cosiddetto benessere termico.

Mitigazione dei cambiamenti climatici
Intervento umano per ridurre le emissioni o migliorare la rimozione dei gas a effetto serra (GHG). La mitigazione interviene sulle cause del cambiamento climatico con tecnologie, processi o pratiche che contribuiscono a ridurre le emissioni di gas serra prodotte dall'attività dell'uomo per evitare che il riscaldamento superi la "soglia di pericolo" (i.e. > 2°C).

Montante
Profilato verticale in alluminio del telaio fisso o mobile dei sistemi di facciata continua.

Pannelli spandrel
Aree opache di un involucro edilizio o facciata continue progettate per nascondere le parti strutturali in corrispondenza di solai o sistemi elettrici-impiantisitici e di aerazione.
Penetrazione d'acqua
Penetrazione d'acqua oltre il piano che interseca la proiezione più interna del provino, escluse le finiture interne e la ferramenta, nelle condizioni specificate di differenza di pressione dell'aria attraverso il provino.

Performance-Prestazioni
La capacità di un prodotto edilizio, di un componente, di una costruzione o di un insieme di svolgere le funzioni per cui è stato progettato e costruito.

Pressione di progetto
Una classificazione che identifica il carico indotto dal vento che un sistema vetrato è in grado di sopportare nella sua applicazione finale.

Procedura di prova
Una procedura definitiva e riproducibile che produce un risultato di prova.

Raccogli condensa
Inserito sui profilati orizzontali, raccoglie l'acqua di condensa o di infiltrazione e ne permette l'evacuazione.

Resistenza al vento
È la capacità di un sistema vetrato sottoposto a forti pressioni e/o depressioni, come quelle causate dal vento, di mantenere una deformazione ammissibile, di conservare le sue proprietà e di salvaguardare la sicurezza degli utenti.

Scenario climatico
Rappresentazione plausibile e spesso semplificata del clima futuro, basata su un insieme di relazioni climatologiche, per lo studio delle potenziali conseguenze dei cambiamenti climatici antropogenici.

Tenuta all'acqua
È la capacità di un sistema vetrato di impedire infiltrazioni d'acqua anche sotto l'azione di una pressione differenziale tra interno ed esterno.

TL - Trasmissione luminosa (%25)
Flusso luminoso direttamente trasmesso attraverso il vetro, espresso come rapporto percentuale tra la radiazione luminosa che attraversa direttamente il vetro e quella totale incidente sul vetro stesso (rispetto alla illuminazione C a 2° e tenendo conto della curva di sensibilità fotopica dell'occhio umano).

Traverso
Profilato orizzontale in alluminio dei telai. Può essere fisso o mobile.

Ugello
Dispositivo progettato per controllare la direzione o le caratteristiche del flusso di un fluido (in particolare per aumentarne la velocità) in uscita (o in entrata) da una camera o da un tubo chiuso.

U - Trasmittanza termica (W/m2K)
Quantità di calore trasmessa al secondo (regime stazionario) da un metro quadrato di superficie vetrata per ogni grado di differenza di temperatura tra ambiente esterno ed interno.

Credits

Capitolo 1 *Quadro di riferimento*_I cambiamenti climatici: cause, impatti e strategie di intervento

Fig. 1.1. Ricostruzione della temperatura media globale per gli ultimi 65 milioni di anni. *Fonte*: https://ingvambiente.com/2021/10/14/perche-i-cambiamenti-climatici-odierni-sono-diversi-da-quelli-del-passato/

Fig. 1.2. Ricostruzione della CO2 in atmosfera nell'era del Cenozoico e previsioni future al 2300. *Fonte*: https://ingvambiente.com/2021/10/14/perche-i-cambiamenti-climatici-odierni-sono-diversi-da-quelli-del-passato/

Fig. 1.3. Serie temporale (1880-2021) di anomalie della temperatura superficiale globale. *Fonte*: NOAA National Centers for Environmental information, Climate at a Glance: Global Time Series, pubblicato a settembre 2022, recuperato il 3 ottobre 2022 da https://www.ncdc.noaa.gov/cag/

Fig. 1.4. Temperature globali per il 2021 e i 10 anni più caldi. *Fonte*: NOAA, State of the Climate: Monthly Global Climate Report for 2021, published online January 2022, retrieved on October 4, 2022 from https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202113/supplemental/page-1.

Fig. 1.5. Andamento della concentrazione della CO2 negli ultimi anni. *Fonte*: NOAA

Fig. 1.6. Andamento della concentrazione della CO2 raggiungendo il 50% rispetto i livelli del periodo preindustriale. *Fonte*: Met Office

Fig. 1.7. Concentrazione in atmosfera del metano. *Fonte*: Copernicus Climate Change Service/ECMWF

Fig. 1.8. Emissioni globali per settore riferite all'anno 2019. *Fonte*:Climate Watch, based on raw data from IEA (2021), GHG Emissions from Fuel Combustion, www.iea.org/statistics; modified by WRI

Fig. 1.9. Consumo finale di energia per combustibile. *Fonte*: Global Energy Perspective 2022

Fig. 1.10. Evoluzione delle emissioni antropogeniche totali di GHG; valori per settore economico. *Fonte*: https://ourworldindata.org/emissions-by-sector

Fig. 1.11. Emissioni di anidride carbonica (CO_2) per settore – valori aggiornati all'anno 2019 per Paese: Italia. *Fonte*: https://ourworldindata.org/emissions-by-sector#annual-greenhouse-gas-emissions-by-sector

Fig. 1.12. Emissioni di anidride carbonica (CO_2) per settore – valori aggiornati all'anno 2019 per Paese: Spagna. *Fonte*: https://ourworldindata.org/emissions-by-sector#annual-greenhouse-gas-emissions-by-sector

Fig. 1.13. Emissioni di anidride carbonica (CO_2) da combustibili fossili e industria. *Fonte*: https://ourworldindata.org/co2-emissions#citation Consultato il: 3 ottobre 2022

Fig. 1.14. Emissioni antropogeniche annuali di anidride carbonica (CO_2) nei differenti scenari RCP. *Fonte*: SYR_AR5_FINAL_full, p. 9.

Fig. 1.15. Emissioni globali di anidride carbonica (in miliardi di tonnellate all'anno) dal 2015 al 2100 in ciascuno dei cinque scenari SSP. Fonte: IPCC_AR6_WGI_TS

Fig. 1.16. Variazione della temperatura superficiale media globale prevista in ciascuno dei cinque scenari SSP. *Fonte*: IPCC_AR6_WGI_TS

Fig. 1.17. Variazione media annuale della temperatura (°C), periodo 1850-1900. *Fonte*: IPCC_AR6_WGI_TS

Fig. 1.18. Variazione media annuale delle precipitazioni (%), periodo 1850-1900. *Fonte*: IPCC_AR6_WGI_TS

Fig. 1.19. Variazione media annuale della temperatura (°C), periodo 1850-1900. *Fonte*: IPCC_AR6_WGI_TS

Fig. 1.20. Opzioni di mitigazione per i diversi settori. *Fonte*: IPCC_AR6_WGIII

Fig. 1.21. Dai rischi climatici alla transizione verso lo sviluppo resiliente al clima. *Fonte*: IPCC_AR6_WGII_TS

Fig. 1.22. Dalla stabilità al cambiamento nell'ottica della resilienza e dei diversi livelli di adattamento (incrementale e trasformativo). *Fonte*: https://gsdrc.org/topic-guides/social-protection/global-issues-and-debates-2/climate-resilience/

Fig. 1.23. SDGs in relazione ai rischi, impatti verso l'adattamento in chiave sostenibile. *Fonte*: IPCC_AR6_WGIII

Capitolo 2 *Condizioni climatiche di riferimento*_ L'area Mediterranea: scenari climatici ed eventi estremi

Fig. 2.1. Hot spot Mediterraneo. *Fonte*: https://www.lindipendente.online/2022/03/12/mediterraneo-hot-spot-di-biodiversita-e-cambiamento-climatico/

Fig. 2.2. Variazioni previste della temperatura annuale rispetto al periodo 1980-1999. *Fonte*: MedECC, 2020, p. 10.

Fig. 2.3. Variazioni previste delle precipitazioni annuali rispetto al periodo 1980-1999. *Fonte*: MedECC, 2020, p. 11.

Fig. 2.4. Temperatura massima in area Mediterranea - scenario RCP 8.5. *Fonte*: https://interactive-atlas.ipcc.ch/

Fig. 2.5. Numero di giorni con Temperatura massima di 40°C in area Mediterranea nello scenario RCP 8.5. *Fonte*: https://interactive-atlas.ipcc.ch/

Fig. 2.6. Precipitazioni in area Mediterranea nello scenario RCP 8.5. *Fonte*: https://interactive-atlas.ipcc.ch/

Fig. 2.7. Previsioni future del cambiamento dei fattori climatici nella Regione Mediterranea per i livelli di riscaldamento globale di 1,5°C e 4,0°C. *Fonte*: IPCC, 2022

Fig. 2.8. Proiezioni climatiche future della temperatura media giornaliera per l'Italia nello scenario RCP 4,5. a) periodo 2021-2050, b) periodo 2041-2070, c) periodo 2041-2070. *Fonte*: https://www.cmcc.it/it/scenari-climatici-per-litalia#rcp

Fig. 2.9. Proiezioni climatiche future della temperatura media giornaliera per l'Italia nello scenario RCP 8,5. a) periodo 2021-2050, b) periodo 2041-2070, c) periodo 2041-2070. *Fonte*: https://www.cmcc.it/it/scenari-climatici-per-litalia#rcp

Fig. 2.10. Proiezioni climatiche future delle precipitazioni invernali per l'Italia nello scenario RCP 4,5. a) periodo 2021-2050, b) periodo 2041-2070, c) periodo 2041-2070. *Fonte*: https://www.cmcc.it/it/scenari-climatici-per-litalia#rcp

Fig. 2.11. Proiezioni climatiche future delle precipitazioni invernali per l'Italia nello scenario RCP 8,5. a) periodo 2021-2050, b) periodo 2041-2070, c) periodo 2041-2070. *Fonte*: https://www.cmcc.it/it/scenari-climatici-per-litalia#rcp

Fig. 2.12. Valori dell'umidità relativa media annuale calcolati per il 2021. *Fonte*: Fioravanti, G., Fraschetti, P., Lena, F., Perconti, W., Piervitali, E., & Pavan Valentina (2022). Gli indicatori del clima in Italia nel 2021. Anno XVII. *ISPRA, Stato dell'Ambiente*, Vol. 98/2022, pp. 1-82, (p.76). ISBN 978-88-448-1119-8

Fig. 2.13. Anomalia media 2021 (annuale e mensile) dell'umidità relativa media rispetto al valore normale 1991–2020. *Fonte*: Fioravanti, G., Fraschetti, P., Lena, F., Perconti, W., Piervitali, E., & Pavan Valentina (2022). Gli indicatori del clima in Italia nel 2021. Anno XVII. *ISPRA, Stato dell'Ambiente*, Vol. 98/2022, pp. 1-82, (p.77). ISBN 978-88-448-1119-8

Fig. 2.14. Valori di temperatura a bulbo umido registrati per l'Italia. *Fonte*: https://news.climate.columbia.edu/wp-content/themes/sotp-foundation/dataviz/heat-humidity-map/

Fig. 2.15. Estremi di temperatura calcolati attraverso l'indice giorni di freddo intenso per l'Italia nello scenario RCP 4,5, periodo 2021-2050. *Fonte*: https://www.cmcc.it/it/scenari-climatici-per-litalia#rcp

Fig. 2.16. Estremi di precipitazione calcolati attraverso l'indice R95p per l'Italia nello scenario RCP 4,5, periodo 2021-2050. *Fonte*: https://www.cmcc.it/it/scenari-climatici-per-litalia#rcp

Fig. 2.17. Indice di precipitazioni molto intense (R50mm): scarti dalla mediana climatica (periodo di riferimento 1981-2010) per regioni e ripartizione geografica. Anni 2019-2021. *Fonte*: ISTAT (2022). *Il benessere equo e sostenibile in Italia.* p. 188. ISBN 978-88-458-2076-2

Fig. 2.18. Anomalia della temperatura media annuale. *Fonte*: AEMET

Fig. 2.19. Proiezioni temperatura massima annuale, scenari RCP 4.5, RCP, 6.0 e RCP 8.5. *Fonte*: AEMET

Fig. 2.20. Proiezioni della variazione del numero dei giorni caldi, scenari RCP 4.5, RCP, 6.0 e RCP 8.5. *Fonte*: AEMET

Fig. 2.21. Serie di precipitazioni medie annue per la Spagna peninsulare a partire dal 1961. *Fonte*: AEMET

Fig. 2.22. Proiezioni della variabilità delle precipitazioni, negli scenari RCP 4.5, RCP 6.0 e RCP 8.5. *Fonte*: AEMET

Fig. 2.23. Proiezioni della variabilità delle precipitazioni intense -scenari RCP 4.5, RCP 6.0 e RCP 8.5. *Fonte*: AEMET

Fig. 2.24. Proiezioni della velocità del vento, nello scenario RCP 8.5: a) periodo di riferimento 2046-2065; b) periodo di riferimento 2081-2100). *Fonte*: AEMET

Fig. 2.25. Proiezioni dell'evoluzione dell'umidità relativa, per gli scenari di emissione A2, A1B, B1. *Fonte*: AEMET

Fig. 2.26. Numero dei giorni caldi nello scenario di emissione RCP 8.5. *Fonte*: AdapteCCa

Fig. 2.27. Numero dei giorni caldi nello scenario di emissione RCP 4.5. *Fonte*: AdapteCCa

Fig. 2.28. Durata massima dell'ondata di calore nello scenario di emissione RCP 8.5. *Fonte*: AdapteCCa

Fig. 2.29. Durata massima dell'ondata di calore nello scenario di emissione RCP 4.5. *Fonte*: AdapteCCa

Fig. 2.30. Numero di giorni con pioggia nello scenario di emissione RCP 8.5. *Fonte*: AdapteCCa

Fig. 2.31. Numero di giorni con pioggia nello scenario di emissione RCP 4.5. *Fonte*: AdapteCCa

Fig. 2.32. Cronologia degli eventi estremi in Spagna durante il corso dell'anno 2020. *Fonte*: AEMET

Capitolo 3 *Il problema scientifico_* Cambiamenti climatici ed involucro edilizio

Fig. 3.1. Conseguenze degli eventi estremi di cambiamento climatico. *Fonte*: Elaborazione grafica a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 3.2. 'Climate change versus Building envelope': Impatti dei cambiamenti climatici sugli involucri edilizi. *Fonte*: Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 3.3. Bomba d'acqua a Cagliari, settembre 2021. *Fonte*: https://www.cagliaripad.it/546513/cagliari-dopo-la-bomba-dacqua-viale-poetto-diventa-un-fiume/

Fig. 3.4. Danni causati da grandine, Liguria 2022. *Fonte*: https://www.primocanale.it/cronaca/13315-pioggia-fulmini-vento-risveglio-liguria-allerta-meteo-gialla.html

Fig. 3.5. Problematiche relative alla durabilità di alcuni materiali a causa dell'effetto degli eventi estremi. *Fonte*: Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 3.6. Illustrazione dell'effetto isola di calore urbano e dei fattori che contribuiscono a temperature più elevate nelle aree urbane. *Fonte*: https://blogs.worldbank.org/sustainablecities/3-ways-beat-heat-european-cities

Fig. 3.7. Alluvione Marche, settembre 2022. *Fonte*: https://www.cittanuova.it/multimedia/2022/9/16/marche-fango-macerie-lalluvione/

Fig. 3.8. Tromba d'aria a Selinunte, novembre 2021. *Fonte*: https://www.castelvetranoselinunte.it/spettacolare-tromba-daria-nel-mare-di-selinunte-video/168132/

Fig. 3.9. Flying Debris, Uragano Michael, USA 2018. *Fonte*: https://www.ilpost.it/2018/10/12/uragano-michael-foto-danni-florida/

Capitolo 4 *Lo sfondo consolidato_* L'involucro edilizio: definizioni, prestazioni e requisiti

Fig. 4.1. Facciata del Hanwha HQ a Seul. *Fonte*: https://www.architetturaecosostenibile.it/architettura/progetti/innovazione-facciata-seul-925

Fig. 4.2. Principio di deformazione delle piastre bimetalliche. *Fonte*: Rielaborazione grafica a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 4.3. Bloom Pavillion. *Fonte*: https://www.archdaily.com/215280/bloom-dosu-studio-architecture

Fig. 4.4. Trasformazione dalla fase di austenite alla fase martensitica. *Fonte*: Rielaborazione grafica a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 4.5. Self-Adaptive membrane. *Fonte*: https://www.iaacblog.com/programs/self-adaptive-membrane-_-a-passive-kinetic-system/; https://materiability.com/portfolio/self-adaptive-membrane/

Fig. 4.6. Giunti in Nitinol e componenti della membrana adattiva. *Fonte*: https://www.iaacblog.com/programs/self-adaptive-membrane-_-a-passive-kinetic-system/; https://materiability.com/portfolio/self-adaptive-membrane/

Fig. 4.7. Effetto a memoria di forma nei polimeri. *Fonte*: Rielaborazione grafica a cura della Dottoranda E. Grillo

Fig. 4.8. Variazione del materiale nei canali d'aria. *Fonte*: https://www.tebe.berlin/breathing-skins/

Fig. 4.9. Deformazione in EAP. *Fonte*: Neuhaus, R., Zahiri, N., Petrs, J., Tahouni, Y., Siegert, J., Kolaric, I., ... & Bauernhansl, T. (2020). Integrating ionic electroactive polymer actuators and sensors into adaptive building skins–potentials and limitations. *Frontiers in Built Environment*, 6, 95. DOI: 10.3389/fbuil.2020.00095

Fig. 4.10. Comportamento adattivo della facciata. *Fonte*: Decker, M. (2013, July). EMERGENT FUTURES: nanotechology and emergent materials in architecture. In *Conference of Tectonics of Teaching: Building Technology Educators Society (BTES)*., Newport: Rhode Island; https://www.archdaily.com/101578/moving-homeostatic-facade-preventing-solar-heat-gain

Fig. 4.11. Matrice di lettura. *Fonte*: Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 4.12. Flow-chart di connessione tematica Capitolo 4 e Capitolo 5. Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Capitolo 5 *Il tema specifico_* Le facciate continue e la scelta del caso studio

Fig. 5.1. Lever House, Alcoa Building, Seagram Building. *Fonte*: https://www.dezeen.com/2022/02/17/som-le-

ver-house-skyscraper-renovation/; https://www.a-newyork.com/02_Guida/02_04_SeagramBuilding.html; https://www.pmcpropertygroup.com/properties/residences-historic-alcoa-building

Fig. 5.2. Esempio di assemblaggio degli elementi di una facciata continua. *Fonte*: Elaborazione grafica a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 5.3. Requisiti prestazionali delle facciate continue sulla base della norma di prodotto EN 13830:2015+A1:2020. *Fonte*: Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 5.4. Valori soglia Trasmittanza termica. *Fonte*: https://www.posaqualificata.it/nuovi-limiti-di-trasmittanza-termica-infissi-per-accedere-allecobonus/

Fig. 5.5. Facciata continua a montanti e traversi. *Fonte*: Rielaborazione grafica a cura della Dottoranda E. Grillo

Fig. 5.6. Facciata a cellula. *Fonte*: https://www.elearningonweb.com/documents/609659/0/Seminario-arkitectureonweb-2018-10-02.pdf/31f49424-075c-2f90-1f05-feb75e03facc?t=1571394873849

Fig. 5.7. Elementi puntuali della Facciata a fissaggio puntuale. *Fonte*: https://italian.alibaba.com/product-detail/Factory-Price-SS304-Glass-Curtain-Wall-1600448517426.html

Fig. 5.8. Facciata strutturale. *Fonte*: https://www.infobuild.it/infobuild/archive.media/1fdfec3695a-53d5438a7ee1e4e7bdodeDispense_facc_vetro.pdf

Fig. 5.9. Facciata doppia pelle. *Fonte*: https://issuu.com/desikushelieva/docs/doubleskinfacades

Fig. 5.10. Profilati in alluminio estruso. *Fonte*: https://www.profilati.com/it/

Fig. 5.11. Tipologie di guarnizioni. *Fonte*: Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 5.12. Trend del mercato e fattori che incidono sulla richiesta di facciate continue. *Fonte*: Rielaborazione grafica a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 5.13. Analisi per tipo di prodotto, Trend del mercato delle facciate continue in vetro 2019. *Fonte*: https://www.fortunebusinessinsights.com/glass-curtain-wall-market-103912

Fig. 5.14. Domanda serramenti e facciate. *Fonte*: Elaborazioni dati Istat, presa dal 'Rapporto sul mercato dell'involucro edilizio'

Fig. 5.15. Scheda tipo della matrice sperimentale. *Fonte*: Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 5.16. Vista esterna e interna del campione sottoposto a prova. *Fonte*: Foto di S. Galli e A. Cadei, tecnici laboratorio IRCCOS srl

Fig. 5.17. Individuazioni delle infiltrazioni. *Fonte*: Foto di S. Galli e A. Cadei, tecnici laboratorio IRCCOS srl

Fig. 5.18. Infiltrazioni al piano secondo. *Fonte*: Foto di S. Galli e A. Cadei, tecnici laboratorio IRCCOS srl

Fig. 5.19. Infiltrazioni al piano primo. *Fonte*: Foto di S. Galli e A. Cadei, tecnici laboratorio IRCCOS srl

Fig. 5.20. Pipetta di scarico, causa dell'infiltrazione. *Fonte*: Foto della Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 5.21. Campione sottoposto a prova. *Fonte*: Foto della Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 5.22. Indicazione dei giunti sottoposti a prova. *Fonte*: Foto di S. Galli e A. Cadei, tecnici laboratorio IRCCOS srl

Fig. 5.23. Dettaglio interno del giunto testato. *Fonte*: Foto di S. Galli e A. Cadei, tecnici laboratorio IRCCOS srl

Fig. 5.24 Dettaglio esterno del giunto testato. *Fonte*: Foto della Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 5.25. Campione sottoposto a prova. *Fonte*: Foto di S. Galli e R. Musolino, tecnici laboratorio IRCCOS srl

Fig. 5.26. Campione sottoposto a prova. *Fonte*: Foto della Dottoranda Evelyn Grillo

Figg. 5.27-28. Infiltrazione d'acqua in corrispondenza del giunto inferiore della cellula. *Fonte*: Foto di S. Galli e R. Musolino, tecnici laboratorio IRCCOS srl

Fig. 5.29. Mock-up sottoposto a prova. *Fonte*: Foto di M. Milardi, Responsabile sezione TCLab del BFL

Fig. 5.30. Infiltrazione d'acqua a 25 psf. *Fonte*: Foto della Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 5.31. Mock-up sottoposto a prova. *Fonte*: Foto di M. Milardi, Responsabile sezione TCLab del BFL

Fig. 5.32. Infiltrazione d'acqua a 300 Pa. *Fonte*: Foto della Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 5.33. Flow chart: La scelta della tipologia di facciata continua come caso studio per la sperimentazione. *Fonte*: Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Capitolo 6 *Analisi Simulativa_* Dal design del mock-up alla simulazione su software parametrico

Fig. 6.1. Flow-chart: Dagli strumenti di simulazione alle attività di testing per il processo di sperimentazione. *Fonte*: Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 6.2. Processo di design per il mock-up. *Fonte*: Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 6.3. Mock-up di facciata continua della tipologia a cellula da sottoporre ad attività sperimentale. *Fonte*: Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo con supporto Azienda Cianciolo Group srl

Fig. 6.4. Posizionamento dei giunti con sigillante siliconico: a) dettaglio di connessione porzione trasparente e spandrel; b) dettaglio di connessione spandrel e porzione trasparente. *Fonte*: Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo con supporto Azienda Cianciolo Group srl

Fig. 6.5. Profili delle guarnizioni di tenuta in EPDM. *Fonte*: Azienda Cianciolo Group srl

Fig. 6.6. Sistema di drenaggio del mock-up. *Fonte*: Azienda Cianciolo Group srl

Fig. 6.7. Vision e Spandrel facade della cellula del mock-up. *Fonte*: Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo con supporto Azienda Cianciolo Group srl

Fig. 6.8. Schermata di visualizzazione del performance calcultator. *Fonte*: Dottoranda Evelyn Grillo con supporto Azienda Cianciolo Group srl

Fig. 6.9. Stratigrafia vision facade. *Fonte*: Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo con supporto Azienda Cianciolo Group srl

Fig. 6.10. Distanziatore della cavità della vetrata. *Fonte*: Azienda Cianciolo Group srl

Fig. 6.11. Stratigrafia spandrel facade. *Fonte*: Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo con supporto Azienda Cianciolo Group srl

Fig. 6.12. Dettaglio pannelli in GFRC. *Fonte*: Dottoranda Evelyn Grillo con supporto Azienda Cianciolo Group srl

Fig. 6.13. Guarnizione di tenuta in EPDM. *Fonte*: Azienda Cianciolo Group srl

Fig. 6.14. Confronto tra progettazione convenzionale e progettazione parametrica. *Fonte*: Eltaweel, A., &Yuehong, S. U. (2017). Parametric design and daylighting: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, pp. 1086-1103. DOI: 10.1016/j.rser.2017.02.011

Fig. 6.15. Interfaccia di Grasshopper per la fase di analisi simulativa. *Fonte*: Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 6.16. Plug-in di Rhinoceros e Grasshopper. *Fonte*: https://www.food4rhino.com/en/app/ghcpython

Fig. 6.17. Fasi della metodologia di lavoro per la simulazione su Grasshopper. Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 6.18. Work-flow metodologico per la simulazione su Grasshopper. *Fonte*: Elaborazione a cura Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 6.19. Impostazioni dati geometrici del mock-up. *Fonte*: Elaborazione a cura Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 6.20. Impostazioni dati fisici per la creazione delle superfici trasparenti delle cellule. *Fonte*: Elaborazione a cura Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 6.21. Impostazione dati fisici per la creazione delle superfici opache in GFRC. *Fonte*: Elaborazione a cura Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 6.22. Geometria del mock-up. *Fonte*: Elaborazione a cura Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 23. Work-flow di preparazione alla simulazione. *Fonte*: Elaborazione a cura Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 6.24. Temperatura massima e minima media per l'Italia (in verde) e per la Spagna (viola). *Fonte*: https://it.weatherspark.com/compare/m/8/36848~71779/Confronto-delle-condizioni-meteorologiche-medie-a-Madrid-e-Roma-a-agosto#Figures-Temperature

Fig. 6.25. Impostazioni di visualizzazione della camera. *Fonte*: Elaborazione a cura Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 6.26. Paramteri di avvio per la simulazione. *Fonte*: Elaborazione a cura Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 6.27. Valori temperatura superficiale esterna, Italia. *Fonte*: Elaborazione a cura Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 6.28. Valori temperatura superficiale interna, Italia. *Fonte*: Elaborazione a cura Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 6.29. Valori flusso di energia, Italia. *Fonte*: Elaborazione a cura Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 6.30. Valori temperatura superficiale esterna, Spagna. *Fonte*: Elaborazione a cura Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 6.21. Valori temperatura superficiale interna, Spagna. *Fonte*: Elaborazione a cura Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 6.32. Valori flusso di energia, Spagna. *Fonte*: Elaborazione a cura Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 6.33. Ipotesi posizionamento termobimetalli nelle porzioni trasparenti del mock-up. Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Capitolo 7 *Analisi Sperimentale_* Azioni di testing finalizzate alla verifica prestazionale

Fig. 7.1. Vista frontale del TestLab con specifica sulle principali attrezzature. *Fonte*: M. Milardi, responsabile sezione TCLab del BFL

Fig. 7.2. Sistema impianto sprinkler: *Fonte*: M. Milardi, responsabile sezione TCLab del BFL

Fig. 7.3. Camera termica. *Fonte*: Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 7.4. TestCell. *Fonte*: Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 7.5. Ventilatore assiale dinamico. *Fonte*: Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 7.6. Sezione orizzontale: installazione del mock-up nella camera di prova. *Fonte*: Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 7.7. Sezione verticali e dettagli di connessione: posizionamento del mock-up nella camera di prova. *Fonte*: Elaborazione a cura della Dottoranda con il supporto degli ingegneri dell'azienda Cianciolo Group s.r.l.

Fig. 7.8. Predisposizione delle staffe di ancoraggio e travi (in rosso) per la connessione del mock-up alla camera di prova. *Fonte*: Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 7.9. Elementi di chiusura in alluminio tra travi perimetrali del mock-up e camera di prova. *Fonte*: Foto della Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 7.10. Risarcitura con vernice sigillante e nastro adesivo. *Fonte*: Foto della Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 7.11. Mock-up installato nella camera di prova. *Fonte*: Foto della Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 7.12. Assetto sperimentale del mock-up sottoposto a prova di permeabilità all'aria. *Fonte*: Foto della Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 7.13. Assetto sperimentale del mock-up sottoposto a prova di tenuta all'acqua in regime dinamico. *Fonte*: Foto della Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 7.14. Schema posizionamento sensori (vista interna). *Fonte*: Elaborazione a cura della Dottoranda con il supporto degli ingegneri dell'azienda Cianciolo Group s.r.l.

Fig. 7.15. Mock-up sottoposto a ripetizione di tenuta all'acqua in regime statico. *Fonte*: Foto della Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 7.16. Cicli termici: temperature di raffreddamento e riscaldamento del provino in 8h. *Fonte*: Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Fig. 7.17. Cicli termici: temperature di raffreddamento e riscaldamento sulla facciata esterna del m ock-up. *Fonte*: Elaborazione a cura della Dottoranda Evelyn Grillo

Figure a pagina 331:
- vista interna cellule. *Fonte*: Foto Azienda Cianciolo;
- vista esterne cellule n. 1 e 2 piano primo. *Fonte:* Foto Azienda Cianciolo;
- vista interna del mock-up nell'assetto di prova sperimentale di tenuta all'acqua dinamica. *Fonte:* Foto della Dottoranda Evelyn Grillo;
- vista esterna del mock-up nell'assetto di prova sperimentale di tenuta all'acqua dinamica. *Fonte:* Foto della Dottoranda Evelyn Grillo.