

ABSTRACT ITA

La ricerca si inquadra nell'ambito dei temi relativi alle innovative declinazioni dei concetti di adattività dei componenti non-strutturali dei sistemi di facciata continua, per la gestione delle risposte delle vibrazioni indotte dall'azione sismica. Come lascito degli eventi sismici passati, è stato dimostrato come le azioni sismiche possono potenzialmente imporre un carico significativo in piano sul sistema di facciata e possono portare a danni e rotture nel caso di una progettazione non appropriata e dettagli di connessione insufficienti. Da diversi versanti di ricerca deriva la proposta di progettare i sistemi di facciata come potenziali assorbitori delle vibrazioni indotte dal terremoto. Queste strategie di mitigazione sismica sono basate sulla proposta di dispositivi di connessione flessibile, che sfruttano la compatibilità meccanica tra la struttura dell'edificio e il suo involucro grazie alle capacità di smorzamento intrinseche della classe di materiali cosiddetti avanzati. Il carattere predittivo dei processi di progettazione risulta una strategia vincente, poiché è rivolto allo studio delle attività di simulazione "computazionale" e "dal vero" in grado di valutare ex ante le performance delle facciate in diversi ambiti, proiettandosi come campo fertile per gli sviluppi delle ricerche future nel settore. Il trend di ricerca è dovuto, da un lato, al crescente ruolo che riveste l'involucro edilizio, dall'altro, all'aumento della domanda di produzione nel macro-settore delle facciate continue.

ABSTRACT ENG

The research is framed within the scope of the topics related to the innovative declinations of the adaptive concepts of non-structural components of curtain wall systems for managing seismically induced vibration responses. As a legacy of past seismic events, it has been shown how seismic actions can potentially impose a significant in-plane load on the façade system and can lead to damage and failure in the case of inappropriate design and insufficient connection details. From different research sides comes the proposal to design façade systems as potential absorbers of earthquake-induced vibrations. These seismic mitigation strategies are based on the proposed flexible connection devices, which exploit the mechanical compatibility between the building structure and its envelope due to the inherent damping capabilities of the so-called advanced class of materials. The predictive nature of the design processes is a winning strategy since it is aimed at studying "computational" and "from life" simulation activities capable of assessing ex-ante the performance of façades in various fields, projecting itself as a fertile field for future research developments in the sector. The research trend is due, on the one hand, to the growing role of the building envelope and, on the other hand, to the increasing demand for products in the curtain wall macro-sector.



Sara Sansotta

Seismic Mitigation Strategies di componenti adattivi non-strutturali
per gli involucri edilizi

Sara Sansotta

SEISMIC MITIGATION STRATEGIES
DI COMPONENTI ADATTIVI
NON-STRUTTURALI
PER GLI INVOLUCRI EDILIZI
Processi di sperimentazione per il miglioramento
delle prestazioni sismiche
attraverso Simulazione e Testing



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

Martinez Ramos Maria Roser

Olivieri Francesca



SCUOLA DI DOTTORATO
Università Mediterranea di Reggio Calabria

DIPARTIMENTO
Architettura e Territorio

DOTTORATO DI RICERCA
Architettura
Architecture: Theory and Design/Urban Regeneration

S.S.D. ICAR/12
XXXV CICLO

SEISMIC MITIGATION STRATEGIES DI COMPONENTI ADATTIVI NON-STRUTTURALI PER GLI INVOLUCRI EDILIZI

Processi di sperimentazione per il miglioramento
delle prestazioni sismiche attraverso Simulazione e Testing

Dottoranda
Sara Sansotta

Tutor
Prof.ssa Francesca Giglio
Prof. Martino Milardi

Coordinatore del dottorato
Prof.ssa Concetta Fallanca

Vorrei ringraziare i miei Tutor, i Professori Francesca Giglio e Martino Milardi, per avermi accompagnato, supportato e sostenuto in questo percorso accademico.

Ringrazio le aziende partner, la Ponzio s.r.l. e gli ingegneri dell'ufficio tecnico, in particolar modo l'Ing. Vincenzo Di Diadoro, tutor aziendale che mi ha accolto e insegnato i diversi aspetti del mondo aziendale; l'azienda Altair Software and Services SL e l'Ing. Marco D'Alessio che nonostante le distanze geografiche mi ha insegnato uno tra i complessi software sviluppati dalla stessa azienda.

Ringrazio la squadra del TCLab, Mariateresa Mandaglio per la sua infinita pazienza, Caterina Claudia Musarella per le sue materne attenzioni, Alessandro Attinà e Andrea Sarica per le tante risate, infine Evelyn Grillo per essere stata la migliore compagna di banco che si possa desiderare.

In ultimo e non per importanza ringrazio la mia famiglia, i miei genitori e le mie sorelle per essere sempre i miei pilastri e le spalle su cui potermi appoggiare e ringrazio Marco, la mia forza e il mio più grande sostenitore senza il quale non ce l'avrei mai fatta.

Note biografiche

Sara Sansotta (1993), si laurea in Architettura nel 2019 presso l'Università Mediterranea di Reggio Calabria. Svolge attività di ricerca nell'ambito della Tecnologia dell'Architettura SSD ICAR/12, con riferimento al comportamento dei componenti dell'involucro edilizio per la verifica delle prestazioni sismiche attraverso metodi e strumenti di verifica quali la simulazione computazionale e la simulazione "dal vero" grazie alla collaborazione attiva con il laboratorio la sezione TCLab del BFL.

Sara Sansotta

SEISMIC MITIGATION STRATEGIES
DI COMPONENTI ADATTIVI NON-STRUTTURALI
PER GLI INVOLUCRI EDILIZI

Processi di sperimentazione per il miglioramento
delle prestazioni sismiche attraverso Simulazione e Testing

Indice

- 11 Abstract
- 13 Premessa
- 15 Introduzione
 - Parte I_ La funzionalizzazione evoluta dell'Involucro Edilizio e la sua vulnerabilità sismica
- 25 Capitolo 1 *Inquadramento del problema scientifico_* Le prestazioni dell'Involucro Contemporaneo
 - 1.1 L'evoluzione dell'Involucro Edilizio: critical review sui passaggi evolutivi prestazionali dell'involucro su macro ambiti e normative di settore
 - 1.2 Dal sistema passivo/massivo al sistema attivo/adattivo
 - 1.3 La contaminazione degli Smart System per il Façade Design
 - 1.4 Il Curtain Wall e i sistemi connessi (componenti e tipologie)
 - 1.5 Quadro di sintesi
 - Riferimenti Bibliografici
- 63 Capitolo 2 *Lo stato dell'arte_* La progettazione antisismica degli Involucri Contemporanei
 - 2.1 La valutazione della vulnerabilità sismica, scenari di impatto sui sistemi di facciata
 - 2.2 Casi studio sul fallimento delle facciate continue sottoposte ad eventi sismici e casistica degli aspetti ricorrenti delle tipologie di rotture della facciata
 - 2.3 La progettazione dei componenti per le facciate continue secondo le normative antisismiche nazionali, comunitarie ed internazionali
 - 2.4 Il Performance Based Seismic Design e Building Performance Simulation, processi a confronto
 - 2.5 Quadro di sintesi
 - Riferimenti Bibliografici
 - Parte II_ Verso la progettazione antisismica delle facciate continue
- 91 Capitolo 3 *Estrapolazione degli elementi utili alla Ricerca_* I dispositivi di risposta dinamica con capacità di smorzamento
 - 3.1 La capacità di smorzamento come soluzione antisismica
 - 3.2 Gli elementi costitutivi degli smorzatori in base alla classificazione tipologica-funzionale
 - 3.3 Casi studio con l'applicazione degli smorzatori in facciata (critical review)
 - 3.4 Valutazione critica dei risultati ottenuti
 - Riferimenti Bibliografici

- 117 Capitolo 4 *Il tema specifico_* I sistemi di connessione “flessibile” la valutazione delle variabili in ambiente simulato
- 4.1 Il comportamento dinamico del sistema telaio-vetro nei sistemi di facciata a montanti e traversi
 - 4.2 Le variabili del sistema costruttivo e le fasi di progettazione antisismica degli elementi di connessione nei sistemi di facciata continua
 - 4.3 I materiali avanzati per applicazioni estreme
 - 4.4 Confronto tra i software di simulazione per la valutazione delle performance sismiche dei sistemi di facciata continua
 - 4.5 Valutazione critica dei risultati ottenuti
- Riferimenti Bibliografici
- 161 Capitolo 5 Considerazioni critiche e problematiche aperte per la definizione dei protocolli sperimentali
- Parte III _Le fasi di Industrializzazione della Ricerca, la collaborazione con le aziende Ponzio srl e Altair Software and Services. Verso la sperimentazione di componenti adattivi non-strutturali degli involucri
- 169 Capitolo 6 *La sperimentazione_* La valutazione delle prestazioni sismiche attuali di una facciata continua a montanti e traversi presso Ponzio s.r.l. ed Altair Software and Services SL
- 6.1 Alcuni assunti di partenza utili all'avvio della fase di verifica
 - 6.2 Il Design per il PMU (Project Mock-Up) del sistema di facciata convenzionale
 - 6.3 Modellazione e analisi agli elementi finiti del sistema facciata convenzionale tramite software di simulazione SimSolid
 - 6.3.1 Lo sviluppo del tool metodologico per il software SimSolid
 - 6.3.2 Le analisi agli elementi finiti condotte sui Digital Mock-Up e la discussione dei risultati ottenuti
 - 6.4 Protocolli di Testing presso la sezione TCLab del Building Future Lab
 - 6.5 Il metodo di prova e le attività di Testing del sistema facciata convenzionale presso il Test Lab
 - 6.5.1 Il Method Statement dei Physical Mock-Up
 - 6.5.2 Il report tecnico di prova
- Riferimenti Bibliografici

217	Allegati
283	ANNEX. <i>La sperimentazione_</i> Le valutazioni utili per il Design dell'elemento di connessione flessibile di una facciata Stick System
	Sovrapposizione dei risultati ottenuti tramite step di simulazione e testing
	Valutazioni finali utili alla progettazione dell'elemento di connessione flessibile
	I processi di innovazione del progetto di Ricerca
301	Conclusioni
303	Limiti della ricerca e problemi aperti
305	Possibili scenari di sviluppi futuri
307	Credits immagini

Abstract

In recent decades, the emblematic relationship between the environment and buildings, in a key that investigates aspects of safety, comfort, and sustainability, has become a driver of technological innovation, especially regarding the performance potential of the vertical closures that constitute the building envelope. These processes have enshrined closure systems' etymological and performance transition from passive-massive to active-adaptive systems.

Therefore, the envelope's form and function have evolved substantially over time in both the use of materials and the performance of its components. The envelope becomes untethered from the primary structure. It acquires new specificities dictated by the need to configure itself as an osmotic membrane. It is capable of changing its adaptive-material behavior as external stresses vary, minimizing impacts and vulnerabilities resulting from extreme events. This concept has led the meaning of adaptive envelope to amplify and decline further toward new meanings that include the ability of façade systems to change their morphology by structurally supporting themselves and not overloading the primary supporting structure in the event of seismic events.

Thus, the research is framed within the scope of issues related to innovative declinations of the concepts of adaptivity of nonstructural components of the building envelope, with particular reference to curtain wall systems for the management of vibration responses induced by seismic load. Indeed, although glass turns out to be the most important technological discontinuity in the entire history of architecture, some critical aspects reside in its performance characteristics, that is, its typically fragile behavior when induced by extreme stresses. As a legacy of past seismic events, it has been shown how seismic actions have the potential to impose significant in-plane loading on the façade system and can lead to damage and failure in the case of inappropriate design, insufficient connection details, and large inter-story drifts. The most critical elements being evaluated appear to be the glazed components, so many studies and research have focused on strategies that can improve the rigid behavior of these elements following glass-frame contact.

The proposal to design façade systems as potential absorbers of earthquake-induced vibrations comes from another avenue of research. These seismic mitigation strategies are based on the proposed flexible connection devices, which take advantage of the mechanical compatibility between the building structure and its envelope.

In this sense, the research aims to address the need to provide a general overview of the investigations conducted in the academic sector for the implementation of the performance of such systems through experimental methods and verification. The predictive nature of the design processes turns out to be a winning strategy, as it is aimed at the study of simulation activities that can assess ex-ante the performance of facades in different areas, projecting itself as a fertile field for future research developments in the field. The research trend is due, on the one hand, to the growing role of the building envelope and, on the other hand, to the increasing demand for products in the curtain wall macro-sector.

The main objective of the thesis lies in the definition of an innovative experimental process for a curtain wall, stick system, the focus of which concerns the definition of the technological-material characteristics of a frame-facade connection element, capable of responding

adaptively to stresses resulting from seismic events, while maintaining its performance functionality. This purpose is done with a view toward incremental technology-push innovation, in which product innovation of the components that constitute façade systems could have strong repercussions on process innovation. In fact, the need to use simulation tools capable of reliably and consistently reading and analyzing curtain wall systems is a prerogative of the stakeholders involved in the process.

The industrial research is being carried out in partnership with a company specializing in curtain wall production, Ponzio s.r.l. and with the simulation software developers, Altair Software and Services SL; finally, it is collaborating with a specialized testing laboratory, TCLab section of Building Future Lab to evaluate the performance of innovative envelopes. The research challenge is focused on designing flexible connection elements that can guarantee their functionality, not only for the safety of the occupants but also in the face of environmental requirements that influence the proper use of the building.

The research project's experimental phase focuses on analyzing the current state of façade system performance currently in use in the Italian market. The façade performance assessments were conducted through a methodology of two steps. The first involves finite element modeling and analysis through SimSolid simulation software, provided by Altair Software and Services SL, imposing loads and displacements consistent with the indications provided by standards. The second step involves verification of the façade system by test procedures through the testing laboratory, TCLab section, under serviceable and safe conditions.

The final phase of the research project concerns the overlapping and validating of the results obtained through laboratory tests and simulation software. Specifically, this phase will allow defining a new design methodological approach for curtain wall systems, in which design costs and time could halve thanks to the implementation of the simulation software used so far for structural analysis of buildings.

The methodological framework will also allow for the possibility of defining the functional and typological characteristics that the connecting element must asseverate to design earthquake-resistant curtain walls. Finally, the flexible connection could constitute a valid seismic mitigation strategy.

Premessa

La tesi dal titolo:

*"Seismic Mitigation strategies di componenti adattivi non-strutturali per gli involucri edilizi.
Processi di sperimentazione per il miglioramento delle prestazioni sismiche
attraverso Simulazione e Testing"*

si è sviluppata nel corso del XXXV Ciclo del Dottorato di Ricerca in Architettura, curriculum Architecture and Theory Design, dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria.

La ricerca si inquadra nell'ambito dei temi relativi al sistema involucro, oggetto, negli ultimi anni, di molteplici ricerche di base e applicate che hanno contribuito allo sviluppo di sistemi sempre più smart, adattivi, dinamici. Nell'ambito della borsa di dottorato aggiuntiva del *Programma Operativo Complementare Ricerca e Innovazione 2014-2020, Asse I "Capitale Umano", Azione I.1 "Dottorati Innovativi con caratterizzazione Industriale"*, la ricerca si è svolta con il supporto dell'azienda Ponzio s.r.l. – specializzata nella progettazione e produzione di sistemi per facciate continue – e l'azienda Altair Software and Services SL – sviluppatori e fornitori di software di modellazione e simulazione –, ed infine ci si è avvalsi del contributo della sezione TCLab del Building Future Lab – laboratorio specializzato nelle procedure di prova normale e testing su involucri edilizi.

Il contributo, di tipo sperimentale, mira ad indagare il comportamento dinamico degli elementi non-strutturali di facciata sottoposti alle azioni sismiche. La ricerca si riallaccia al filone di studi internazionali sul tema dei sistemi di facciata per involucri adattivi-dinamici per le azioni sismiche, proponendo una metodologia di supporto rivolta, *in primis*, alle aziende specializzate nella progettazione di facciate continue, affinché questi sistemi vengano implementati per resistere ai carichi sismici. In seconda ipotesi, si propone di ampliare la conoscenza in ambito accademico per lo studio e l'innovazione dell'involucro edilizio contemporaneo, indagandone la totalità degli aspetti prestazionali che lo investono. Lo sviluppo dell'iter scientifico è stato strutturato in una prima *macro-fase teorica* e una *fase propositiva-sperimentale*, proponendo di mettere in atto un'innovazione incrementale di tipo *technology-push* in cui – in linea con gli obiettivi prefissati all'interno della *Missione 4 del PNRR "Sostegno ai processi di innovazione e trasferimento tecnologico"* – si esalti il rapporto tra Ricerca e Industria. Il carattere interdisciplinare del progetto di ricerca permette di sviluppare uno studio trasversale tra le varie discipline, quali la tecnologia dell'architettura, l'ingegneria civile e la scienza dei materiali, che possono mettere in atto innovati processi di sperimentazione legati non solo alla progettazione di componenti non-strutturali, ma anche alle caratteristiche che possono rendere gli stessi adattivi.

In questo scenario s'intende sottolineare l'importanza di rafforzare la ricerca – nella sua accezione più ampia – e favorire la diffusione di modelli innovativi sfruttando le potenzialità che possono derivare dalla stretta collaborazione tra il settore Ricerca & Sviluppo delle imprese e l'ambito di ricerca delle università, il cui focus è incentrato a sostenere i processi per l'innovazione ed il trasferimento tecnologico. La collaborazione per il dottorato di ricerca industriale è intesa come uno scambio di output e input con le imprese con ricadute rispetto l'accrescimento delle conoscenze nel campo della progettazione sismica e all'utilizzo ed implementazione dei software di simulazione che risultino coerenti con i risultati dei test condotti in laboratori specializzati per la verifica prestazionale degli involucri edilizi. In questo senso, la ricerca esalta il suo carattere profondamente industriale grazie al supporto delle aziende partner, Ponzio s.r.l. e Altair Software and Services SL, che hanno permesso di scandire gli step metodologici. Infine, la possibilità di avvalersi del contributo della sezione TCLab del Building Future Lab permette di avviare un confronto critico-propositivo tra gli ambienti di simulazione *"dal vero"* – test di laboratorio – e modelli di simulazione computazionali, al fine di rendere quest'ultimi sempre più performanti e "affidabili" per le valutazioni delle prestazioni sismiche dei sistemi di facciata.

Introduzione

La ricerca dottorale di tipo industriale si inquadra nell'**ambito dei temi** relativi al sistema involucro, oggetto, negli ultimi anni, di molteplici ricerche di base ed applicate che hanno contribuito allo sviluppo di sistemi sempre più smart, adattivi, dinamici [Mazzucchelli, 2018]. Forma e funzione dell'involucro hanno registrato nel tempo un'evoluzione sostanziale sia nell'uso dei materiali, sia nelle prestazioni dei suoi componenti [Rossetti, 2019], in termini dei requisiti ambientali ed in termini di risposta ad eventi catastrofici come eventi sismici. Da questo assunto si evince come la ricerca sia in linea anche con ambiti prioritari nazionali e regionali, quali il Cluster 3 del PNR 2021-2027, "*Improved disaster risk management and societal resilience*", la Missione 2 del PNRR "*Rivoluzione verde e transizione ecologica*" e la traiettoria 2 dell'area prioritaria Ambiente, Economia Circolare e Biodiversità della S3 Calabria 2021/2027 "*Tecnologie, dispositivi e sistemi elettronici "embedded", reti di sensori intelligenti, Internet of Things per la protezione antisismica del territorio*". Il carattere industriale della ricerca permette di identificarsi, inoltre, con gli obiettivi prefissati all'interno della Missione 4 del PNRR "*Sostegno ai processi di innovazione e trasferimento tecnologico*".

Dal **background scientifico**, in cui è collocata la ricerca, è emerso come i sistemi di facciata continua giocano un ruolo fondamentale nella progettazione antisismica [Nakai, 2015] e come questi siano altamente vulnerabili e falliscono più frequentemente degli edifici stessi [Hareer, 2007], le cui cause sono legate alla perdita di resistenza, nel caso di dettagli di connessioni insufficienti [Lucchini et al., 2013]. È opportuno che la progettazione degli elementi non-strutturali si basi sulla consapevolezza che questi, sollecitati al carico del sisma, diventino strutturalmente reattivi e trasferiscano i carichi laterali alla struttura primaria di supporto, provocando un'interruzione delle performance rispetto ai requisiti ambientali, che influenzano il corretto uso dell'edificio, ma anche delle condizioni di servizio, interrompendo la propria funzionalità, nei confronti della sicurezza degli occupanti.

Il **tema specifico** della ricerca s'inquadra, quindi, nell'ambito dei temi relativi alle nuove declinazioni dei concetti di adattività dei componenti non-strutturali dell'involucro edilizio per la gestione delle prestazioni degli edifici sottoposti al carico del sisma, il cui focus è incentrato sull'analisi del comportamento dinamico degli elementi di connessione telaio-facciata e struttura sollecitati. In questo senso, risulta necessario che la progettazione si basi sulla compatibilità meccanica tra la struttura dell'edificio e i sistemi di facciata continua [Lee et al., 2021], in contrasto con la pratica comune di affidare la resistenza sismica ai sempre più complessi dispositivi di smorzamento, i cui limiti critici risiedono non solo in costi elevati ma anche in difficoltà di progettazione, caratteristiche dimensionali elevate nonché pratiche di non semplice manutenibilità, essendo nella maggior parte costituiti da una serie di elementi, altamente digitalizzati e informatizzati quali attuatori e sensori.

Il **partenariato industriale** della ricerca è svolto con l'azienda Ponzio s.r.l., specializzata nella progettazione e produzione di sistemi per facciate continue, e l'azienda Altair Software and Services s.l., sviluppatori e fornitori di software d'ingegneria solver. Ci si è avvalsi, infine, per la parte sperimentale del contributo della sezione TCLab del Building Future Lab, laboratorio specializzato nelle procedure di prova normative e testing su involucri edilizi.

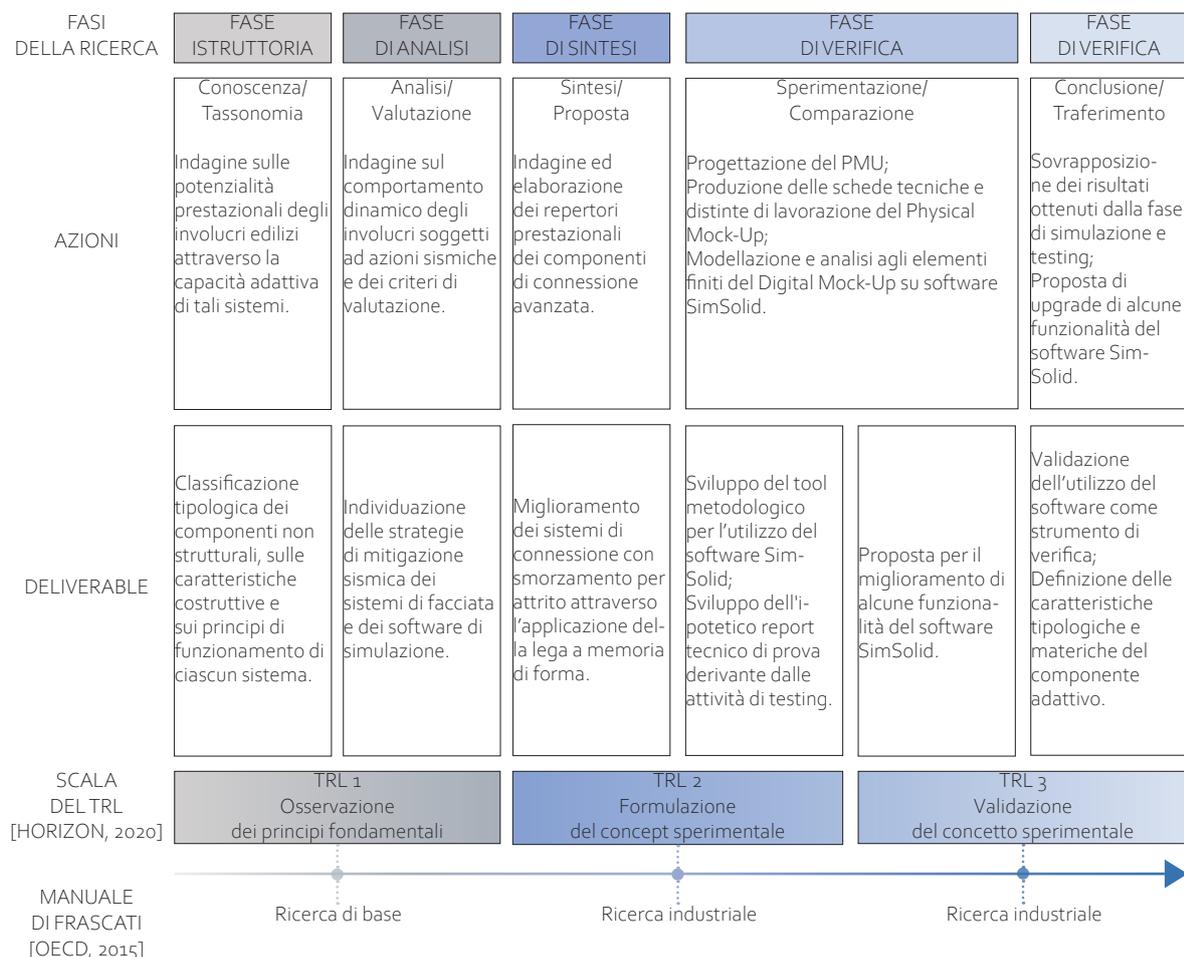
L'**obiettivo generale** della tesi è finalizzato all'avanzamento delle conoscenze dei processi progettuali e della sperimentazione nel campo delle connessioni flessibili.

Lo scopo di delineare le caratteristiche funzionali-materiche dei componenti non-strutturali con tecnologie di mitigazione sismica da implementare ad un sistema di facciata continua a montanti e traversi, **obiettivo specifico**, permetterà di rendere l'intero sistema come un dispositivo di smorzamento [Abtahi, 2017]. Partendo dall'analisi dei casi studi sugli effetti indotti e subiti dai sistemi di facciata sottoposti ad eventi sismici e alle caratteristiche funzionali-tipologiche delle soluzioni adottate per il miglioramento di tali sistemi, con particolare riferimento ai dispositivi di smorzamento. Il progetto di ricerca mira ad analizzare le cause delle criticità durante tali fenomeni, secondo un'ottica finalizzata ad **innovare i processi di progettazione per i sistemi di facciata continua**, attraverso l'implementazione di alcune funzionalità che costituiscono i software di simulazione.

La **metodologia** della ricerca adotta un modello di tipo deduttivo, sistematico e scalare, strutturando un quadro tematico di riferimento, passando dalla definizione del macrotema, circoscritto dalle problematiche relative all'involucro soggetto all'azione sismica, all'individuazione delle caratteristiche dei componenti non-strutturali, con particolare riferimento ai sistemi di connessione di facciata che assolvano le proprietà funzionali degli smorzatori e che si definiscano come una valida proposta di strategia di mitigazione sismica.

Il progetto di ricerca è scandito da fasi sequenziali che hanno consentito l'evoluzione della tesi, attraverso il raggiungimento di risultati parziali e specifici.

Fig.1 Schematizzazione delle fasi metodologiche della ricerca



Fase istruttoria; *Conoscenza/Tassonomia: Caratterizzazione degli involucri edilizi adattivi e scomposizione dei sistemi di Curtain Wall*

Lo sviluppo della prima fase permette di identificare i vari versanti della ricerca coinvolti verso la funzionalizzazione dell'involucro edilizio, ciò avviene attraverso lo studio del background scientifico che permette di comprendere il passaggio etimologico-prestazionale, svolto nel corso degli anni, dei sistemi di chiusura; da sistemi passivi-massivi a sistemi attivi-adattivi. Dall'identificazione del ruolo cruciale che svolge oggi l'involucro edilizio, si è passati alla scomposizione tassonomica delle diverse tipologie dei sistemi di facciata, attraverso la sistematizzazione degli elementi, componenti e materiali che li costituiscono.

Il deliverable di questa fase è relativo all'acquisizione delle conoscenze sulle caratteristiche costruttive e sui principi di funzionamento di ciascun sistema.

Un contributo importante, in questo senso, deriva dalle azioni svolte in collaborazione con la sezione TCLab del Building Future Lab di Reggio Calabria, le cui attività sperimentali hanno contribuito alla costruzione dello scenario di riferimento relativo alle tipologie di facciata presenti sul mercato, ma anche all'esperienza inerente alle procedure dei protocolli di prova da eseguire su tali sistemi.

Inoltre, il supporto dell'azienda Ponzio s.r.l. permette il raggiungimento di competenze di base nella progettazione dei sistemi di facciata continua, rispetto le fasi metodologiche successive. I risultati di quest'azione consistono, infine, nell'identificare la capacità adattiva quale strategia coinvolta per il miglioramento delle performance degli involucri edilizi per le azioni sismiche.

Fase di analisi; *Analisi/Valutazione: Effetti indotti dai carichi sismici sugli involucri edilizi*

L'analisi della vulnerabilità sismica dei sistemi di facciata scandisce questa fase in sotto-azioni scalari che annoverano: lo studio degli effetti subiti dagli involucri durante i terremoti del passato, lo studio di alcune tra le normative internazionali e la normativa comunitaria e nazionale in materia di progettazione antisismica dei sistemi di facciata e lo studio delle strategie di mitigazione sismica messe in atto all'interno della letteratura di settore. Comprendere i danni causati dagli eventi sismici del passato conduce al primo risultato di questa fase, che riguarda l'individuazione degli elementi critici che costituiscono le facciate continue e provocano l'interruzione delle attività sia per le condizioni di servizio che per quelle di sicurezza.

Di fatti, le strategie di mitigazione sismica sono analizzate in una chiave di lettura che non riguarda solo il miglioramento del comportamento dinamico degli elementi fragili, quali le specchiature, ma verso il miglioramento dell'intero sistema involucro. In letteratura, soprattutto nel caso dei sistemi di facciata a doppia pelle, il miglioramento sismico è reso possibile attraverso l'applicazione di dispositivi di risposta dinamica, quali smorzatori. Grande attenzione è stata posta, successivamente, alla progettazione antisismica con un confronto critico tra le raccomandazioni postulate all'interno delle normative di settore che hanno condotto la ricerca verso ulteriori risultati a favore del carattere predittivo del processo progettuale. In questo senso, ci si riferisce all'individuazione dei criteri e strumenti di valutazione utili alla progettazione dei componenti non strutturali con capacità di mitigazione sismica attraverso analisi "lineari" e "dinamiche non lineari".

Questi strumenti si propongono come simulatori del comportamento dinamico dei sistemi sollecitati e in grado di fornire la probabilità di collasso dei singoli elementi in funzione degli spostamenti a cui sono sottoposti.

Il supporto dell'azienda Altair Software and Services SL è risultato strategico per l'apprendimento delle competenze di base per l'utilizzo del software impiegato per la fase sperimentale.

Fase di sintesi; *Sintesi/Proposta: Strategie di mitigazione sismica per il miglioramento delle performance dei sistemi di facciata*

A seguito delle valutazioni critiche effettuate sullo stato dell'arte rispetto l'applicazione degli smorzatori in facciata, l'attenzione è rivolta all'avanzamento delle conoscenze e della sperimentazione nel campo delle connessioni avanzate/flessibili.

Il risultato di questa azione risiede nell'elaborazione di repertori prestazionali per la guida alla progettazione di componenti di connessione con criteri di a-sismicità quali la capacità di smorzamento per il miglioramento delle performance dei sistemi di facciata.

Costruito il quadro di sintesi in cui emergono le criticità degli elementi di connessione attuali sottoposti ai carichi sismici, la ricerca si è incentrata sullo studio degli smart material. Le recenti innovazioni materiche sono fortemente correlate all'innovata concezione di involucro edilizio quale sistema "altamente performante".

Da questa azione, il risultato riguarda la ricognizione ragionata dei materiali avanzati, in grado di regolare la loro configurazione o le loro proprietà fisiche in risposta ai cambiamenti delle condizioni interne ed esterne, individuando le caratteristiche funzionali-materiche dell'elemento di connessione da implementare al fine di rendere gli involucri adattivi/dinamici. Il punto focale riguarda, quindi, la capacità del materiale di generare un movimento reversibile e trasferire all'intero sistema "involucro" le capacità adattive.

Fase di verifica; *Sperimentazione/Comparazione: Valutazione delle prestazioni attuali della facciata Stick System*

Al fine di espletare in modo esaustivo la metodologia di ricerca, si specifica che la sperimentazione viene svolta per la tipologia di facciata a montanti e traversi "Ponzio WS50 PG Curtain Wall" e i sistemi di connessione, impiegati per il dato sistema.

Per la configurazione del Mock-Up sono stati progettati, grazie al supporto degli ingegneri dell'ufficio tecnico Ponzio s.r.l., due provini per la tipologia Stick System sopra menzionata, con configurazione di campate variabili, uguali nelle caratteristiche dimensionali ma differenti in alcuni assetti tecnologici.

Per il raggiungimento delle competenze tecniche e di settore relative alle fasi di verifica, la ricerca, invece, si è avvalsa della collaborazione dell'azienda che sviluppa software di simulazione Altair Software and Services SL e del contributo della sezione TCLab.

La fase sperimentale della ricerca riguarda l'analisi dello stato attuale delle performance del sistema di facciata, correntemente in uso nel mercato.

Le valutazioni sulle prestazioni della facciata sono state condotte tramite due step. Il primo che riguarda la modellazione e l'analisi agli elementi finiti attraverso software di simulazione SimSolid, il secondo attraverso procedure di prova normate sui Mock-Up all'interno del laboratorio di testing, la sezione TCLab.

Fase di verifica; *Conclusioni/Trasferimento: Definizione delle prestazioni sismiche da implementare ai sistemi di connessione e alle funzionalità del software di simulazione*

La seconda e ultima parte della fase di verifica è incentrata sulla sovrapposizione dei risultati ottenuti dalle fasi di simulazione e testing. Ciò ha permesso di condurre la ricerca verso due risultati specifici.

Il primo riguarda la definizione di un innovato approccio metodologico progettuale per i sistemi di facciata continua, in cui i costi e i tempi di progettazione potrebbero essere dimezzati grazie all'implementazione di alcune funzionalità del software di simulazione, finora utilizzato maggiormente per le analisi strutturali degli edifici.

Il secondo risultato specifico riguarda la definizione della proposta progettuale per l'implementazione dell'elemento di connessione, attraverso la valutazione della fattibilità –

prestazionale, economica e di reperimento delle risorse – attraverso l’impiego di materiali intelligenti, come le leghe a memoria di forma.

L’approccio integrato di tipo olistico, tra le discipline che costituiscono il corpus della ricerca, e la caratterizzazione industriale hanno permesso di mappare le innovazioni che si sono svolte e si svolgono nei diversi ambiti, aziendali e accademici. In questo senso, sviluppare una metodologia “univoca” – che possa servire da un lato, all’incremento della conoscenza nell’ambito accademico delle performance sismiche dell’involucro edilizio, dall’altro, al miglioramento delle performance dei prodotti in ambito aziendale – può condurre al rafforzamento e consolidamento della ricerca condotta tra università-imprese.

In questo scenario s’intende sottolineare l’importanza di consolidare i processi di ricerca e favorire la diffusione di modelli innovativi – per sostenere lo sviluppo dell’innovazione ed il trasferimento tecnologico –, misurandoli attraverso la metodologia proposta dalla Commissione Europea, quale il Technology Readiness Level, TRL.

Adottare tale metodologia, durante tutto il percorso di ricerca, risponde all’esigenza di servirsi di terminologie e linguaggi che abbiano, in diversi ambiti e specializzazioni, un obiettivo comune, *“mettere in atto processi di innovazione facilmente raggiungibili e riscontrabili dall’intera comunità scientifica”*.

Le fasi precedentemente discusse vengono riprese attraverso la costruzione di una mappa di ricerca, al fine di espletare il percorso che ha strutturato la tesi dottorale.

Riferimenti bibliografici

Abtahi, P. (2017). *Energy Dissipating Facade Systems Designed to Reduce Structural Response During Earthquakes* (Doctoral dissertation, Western Sydney University (Australia)).

Bedon, C., & Amadio, C. (2017). Enhancement of the seismic performance of multi-storey buildings by means of dissipative glazing curtain walls. *Engineering Structures*, 152, 320-334. ISSN 0141-0296, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.09.028>.F

Hareer, R.W. (2007). *Seismic Response of Building Façade System with Energy Absorbing Connections*. Queensland: University of Technology.

Lago, A., Trabucco, D., & Wood, A. (2018). *Damping technologies for tall buildings: Theory, design guidance and case studies*. Butterworth-Heinemann: CTBUH & Elsevier.

Lee, H., Oh, M., Seo, J., & Kim, W. (2021). Seismic and Energy Performance Evaluation of Large-Scale Curtain Walls Subjected to Displacement Control Fasteners. *Applied Sciences*, 11(15), 6725, <https://doi.org/10.3390/app11156725>

Lucchini, A., Stefanazzi, A., & Parisi, M.A. (2013). Seismic Behavior of Building Facades. *Int. Journal for Housing Science*, 37(1), 1-10.

Mazzucchelli, E. S. (2018). L'involucro di edifici complessi: aspetti progettuali e costruttivi. *Modulo, Voi*, 415, 78-83.

Nakai, M. (2015). Advanced Structural Technologies for High-Rise Buildings in Japan. *CTBUH Journal, Special Issue: Focus on Japan*, 2, 22-29.

OECD, (2015). *Manuale di Frascati 2015. Linee Guida per la raccolta e la Trasmissione dei dati su Ricerca e Sviluppo Sperimentale*. ERRE PUBLISHING.

Rizzo, F., Franco, A., Bonati, A., Maddaloni, G., Caterino, N., & Occhiuzzi, A. (2021). Predictive analyses for aerodynamic investigation of curtain walls. *Structures*, 29, 1059-1077. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.077>

Rossetti, M. (2019). *L'involucro architettonico contemporaneo*. Rimini: Maggioli Editore.

Riferimenti bibliografici relativi alla metodologia di ricerca

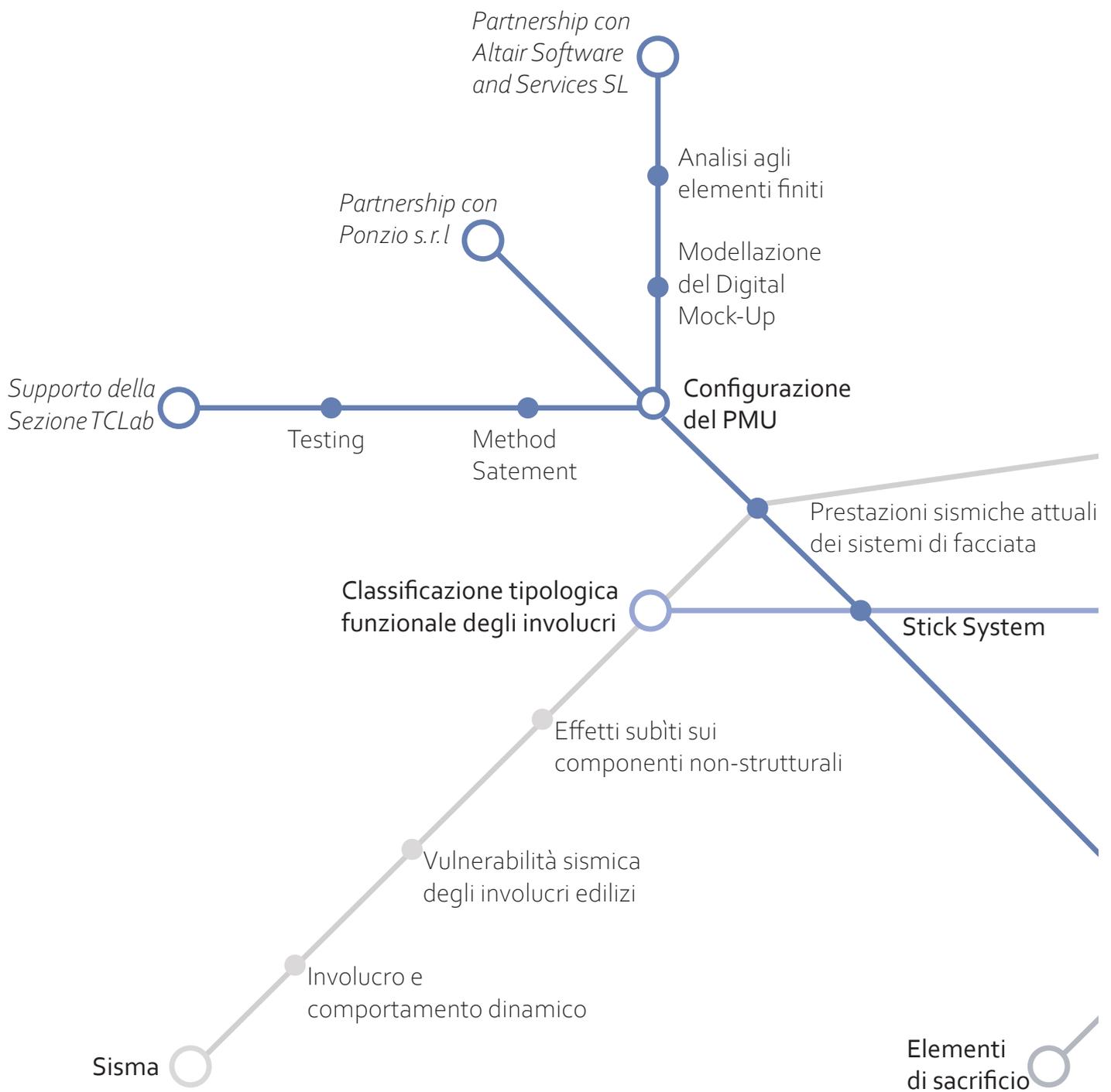
Behr, R. A., & Belarbi, A. (1996). Seismic test methods for architectural glazing systems. *Earthquake Spectra*, 12(1), 129-143. <https://doi.org/10.1193/1.1585871>.

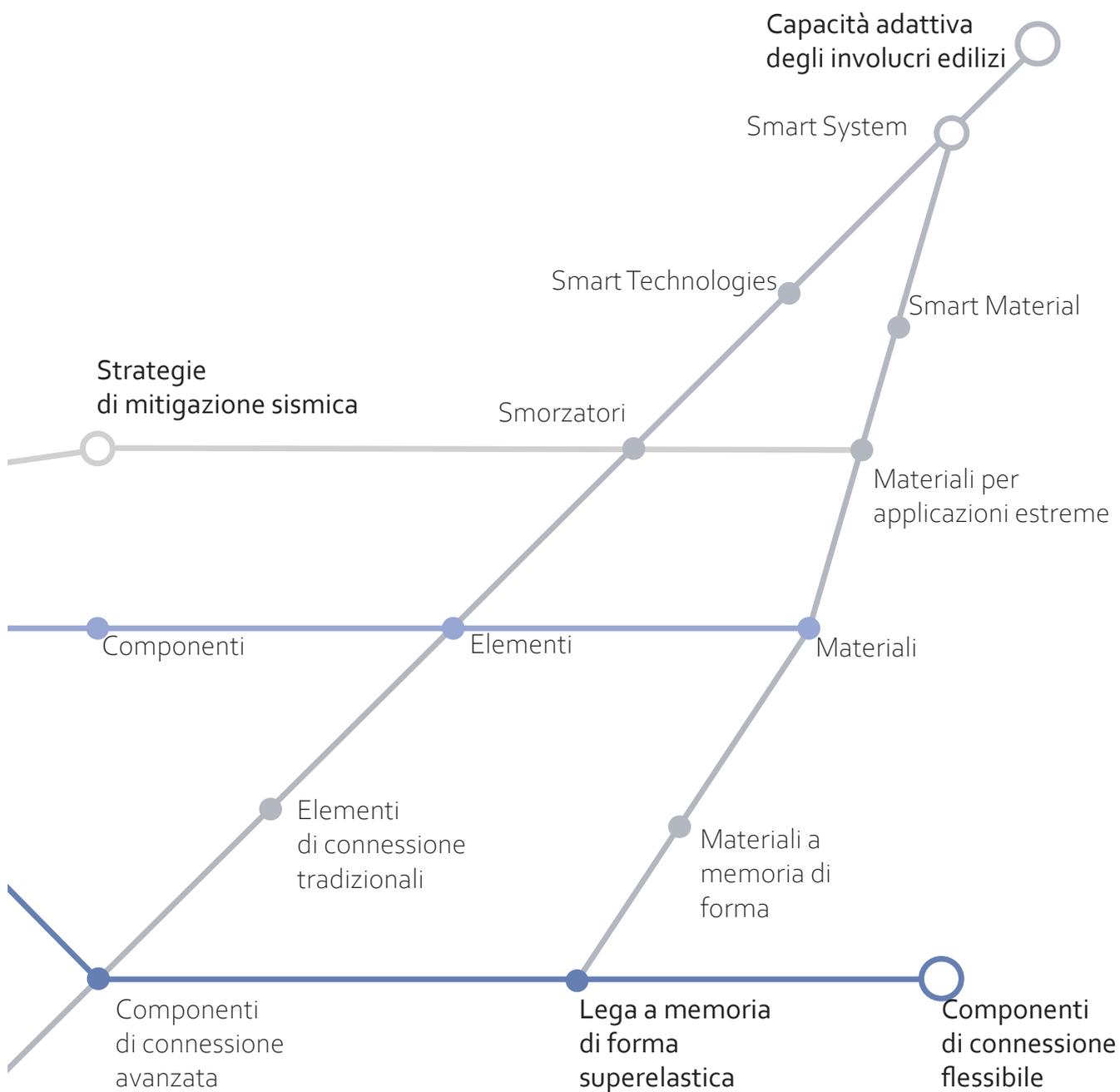
Lim, K. Y., & King, A. B. (1991) *The behaviour of external glazing systems under seismic in-plane racking*. Building Research Association of New Zealand, BRANZ.

Memari, A. M., Behr, R. A., & Kremer, P. (2000). Toward development of a predictive model for drift limits in architectural glass under seismic loadings. *Proceedings*.

Memari, A. M., Shirazi, A., Kremer, P. A., & Behr, R. A. (2011). Development of finite-element modeling approach for lateral load analysis of dry-glazed curtain walls. *Journal of Architectural Engineering*, 17(1), 24-33. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000027](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000027).

Seo, J., Kim, Y. C., & Hu, J. W. (2015). Pilot study for investigating the cyclic behavior of slit damper systems with recentering shape memory alloy (SMA) bending bars used for seismic restrainers. *Applied Sciences*, 5(3), 187-208. <https://doi.org/10.3390/app5030187>.





- Gli elementi costitutivi della ricerca
- Il Background scientifico sulla capacità adattiva degli involucri
- Il Background scientifico per il sisma
- La sperimentazione

Parte I
La funzionalizzazione evoluta dell'Involucro Edilizio
e la sua vulnerabilità sismica

Inquadramento del problema scientifico **Le prestazioni dell'Involucro Contemporaneo**

Abstract

The evolved functionalization of the Building Envelope has fielded some experimental research, the objective of which has concerned the evolution of increasingly complex, responsive, adaptive, and dynamic Envelope systems. Design is related not only to experimentation in the design field but with spillovers on performance in terms of environment, permeability to air, water, thermoregulation, safety, and stability. The purpose of the first chapter is to frame the scientific frame of reference of the research with a critical discussion of the role of earthquake-resistant regulations in the field of performance design of the Envelope, focusing on the contemporary design of façade systems. Innovations affecting the building envelope were treated through scaled levels by macro-theme, proposing itself as a critical review rather than a historical treatment. Emphasis was placed on the concept of adaptivity that has led to changing type-technological paradigms of the envelope system. Specifically, the focus of the research concerns the innovations sweeping the field for seismic implementation, in which the character of adaptivity is understood as solving for managing responses due to seismic loads. From these assumptions, the need emerged to break down the façade system as a key element of the building envelope. Which, more than others, is called upon to act, on the one hand, as a protective barrier from external phenomena and, on the other hand, to relate materially and immaterially the external macroenvironment and the internal microenvironment. The common denominator lies in achieving occupant comfort.

Highlights

- Identification of current research processes on the various functional-performance aspects that characterize innovation in the building envelope;
- Framing of the main topics related to the architectural envelope sector, from the evolutionary path to the various definitions and typologies to the technical aspects characterizing curtain walls;
- Framing of the innovative concept of the adaptive envelope for the different performance requirements imposed to a greater extent on curtain wall systems for seismic stresses.



1.1 L'evoluzione dell'Involucro Edilizio: critical review sui passaggi evolutivi prestazionali dell'Involucro su macro ambiti e normative di settore

"In origine l'involucro architettonico era costituito da tessuti appesi. Con l'avvento delle strutture murarie andò persa l'immagine dell'involucro costituito solo da tessuti [...]. L'involucro di vetro, eliminata la parete, si propone concettualmente come la soluzione delle origini."
[Fanelli & Gargiani, 1998, p. 490]

Negli ultimi decenni, il rapporto emblematico tra ambiente e edifici, in una chiave di lettura che indaga gli aspetti di *sicurezza, comfort e sostenibilità*¹, diventa driver di innovazione tecnologica soprattutto in riferimento alle potenzialità funzionali - prestazionali degli elementi di chiusura che compongono l'ambiente costruito [Mazzucchelli, 2018].

L'avanzamento del progresso tecnologico risulta in continuo mutamento, ciò deriva dalle innovazioni di processo che scaturiscono dalla collaborazione tra ambito progettuale e produttivo ai differenti livelli [Giglio, 2011] e influiscono notevolmente sulle tecniche di lavorazione e prototipazione, quali elementi chiave della quarta rivoluzione industriale². L'ambito in cui le suddette tecnologie trovano terreno più fertile è senz'altro quello dell'involucro edilizio³, considerato da più versanti [Herzog, 1984; Wigginton & Harris, 2002; Altomonte, 2005; Tucci, 2014; Rossetti, 2019] quale elemento di *frontiera*⁴ che, da un lato, separa fisicamente l'ambiente esterno ed interno degli edifici, dall'altro, ne consente un dialogo. La sua funzione, infatti, è quella di mediare, separare e connettere l'interno con l'esterno, ma esso è anche un elemento ambientale, che delimita e identifica gli spazi esterni circostanti [Milardi, 2017], concludendo, dal punto di vista formale, perimetralmente l'organismo costruttivo e strutturale⁵.

Risulta necessario dichiarare che gli obiettivi del seguente paragrafo non risiedono in una trattazione tassonomica del termine involucro, bensì nel riprendere alcuni concetti chiave che hanno scandito e scandiscono l'evoluzione prestazionale degli aspetti tecnici dell'involucro edilizio.

Il percorso evolutivo dell'involucro architettonico, come ormai acclarato, parte nella prima metà del diciottesimo secolo⁶ e arriva fino ai giorni nostri attraverso mutamenti nel suo significato compositivo, nelle tecnologie di realizzazione e nell'integrazione con le altre unità tecnologiche dell'edificio [Klein, 2013], il cui scopo principale è legato a garantire una resa prestazionale⁷ dell'intero sistema edificio.

I passaggi evolutivi-prestazionali, operati nello scorso secolo, hanno portato alla concezione di involucro quale "*membrana*"⁸ o "*pelle*"⁹ come parte dell'organismo architettonico che più di ogni altra reagisce oggi agli stimoli ambientali e ne assorbe i contenuti tecnologici e gli aspetti formali [Nastri, 2020]. Ciò, si traduce attraverso la progettazione di nuovi requisiti che non riguardano soltanto la sfera di quelli canonici ma anche altri, come la forma aereodinamica, la geometria e giacitura delle superfici e, soprattutto, "*la revisione e accrescimento del ventaglio prestazionale degli involucri*" [Lucarelli et al., 2020].

Di fatti, come espresso da Conato e Frighi [2018], la trasformazione nel tempo dei bisogni antropici, così come la variabilità delle condizioni al contorno, determinata da un ambiente costruito in mutamento a causa anche del frequente susseguirsi di fenomeni a carattere emergenziale, ha portato le prestazioni di base garantite dall'involucro ad evolversi in funzione di esigenze sempre più articolate¹⁰.

Già Peretti [1997], all'interno del testo "*Verso l'eco-tecnologia in architettura: un percorso attraverso la tecnologia dell'architettura*" ha affermato che l'aumento del grado di complessità e dei parametri che entrano in gioco per la produzione dell'involucro edilizio spinge l'evoluzione verso la sperimentazione di variabili legate non solo alle scelte morfologiche e linguistiche ma anche verso un ampio spettro di possibilità tecniche e tecnologiche in continuo mutamento.

Fig. 1. Sony City Tokyo-Arup, Tokyo (2006)

Questo concetto viene ripreso e ulteriormente dibattuto da Rossetti [2019], in cui afferma che l'involucro acquisisce nuove specificità e nuove prestazioni dettate dalla necessità "*di disporre di una membrana osmotica, graduabile e capace di variare il proprio comportamento al variare delle sollecitazioni: si trasforma in un elemento di mediazione selettiva, in grado di controllare, attivare o disattivare una serie di segnali variabili in funzione degli obiettivi di progetto*".

Sintetizzando i concetti sopra espressi, le prassi innovative dell'involucro sono rivolte verso la concezione di un elemento che sia in grado di fungere, da un lato, come barriera protettiva dai fenomeni esterni, dall'altro di mettere in relazione materiale e immateriale il macroambiente esterno e il microambiente interno [Tucci, 2021], il cui comune denominatore risiede nel raggiungimento del comfort degli occupanti.

A seconda della scala di considerazione, le prestazioni possono riferirsi alle proprietà dei materiali, ai componenti, agli elementi o all'involucro nel suo complesso [Hartkopf & Loftness, 1999]. Da questo assunto, ne deriva come le sfide legate ai processi di innovazione si concentrino sui componenti ed elementi dell'involucro edilizio, non solo in funzione delle tecniche di produzione - progettazione che compongono le fasi del processo edilizio, ma anche grazie alla contaminazione dell'evoluzione materica³¹ che costituisce lo stesso organismo [Addington & Schodek, 2012].

Dal dialogo sinergico delle parti, che concorrono alla *funzionalizzazione evoluta dell'involucro edilizio*, ne deriva la sperimentazione di una vasta gamma di soluzioni tecnologiche trasversali e altamente performanti, che hanno però difficoltà a confrontarsi con quadri normativi sempre più carenti ed obsoleti [Conato & Frighi, 2018].

Tuttavia, un'altra importante funzione dell'involucro edilizio è quella di *trasferire i vari carichi di progetto allo scheletro dell'edificio*³² e di assecondare i movimenti dovuti alle stesse azioni, rappresentati da diverse caratteristiche come nel caso di peso proprio, vento, carichi sismici, nonché azioni termiche, carichi meccanici estremi, ecc. [Bedon et al., 2018]. L'involucro, dunque, si svincola dalla struttura portante dell'edificio, liberandosi dalla sua primigenia connotazione di verticalità, arrivando ad avvolgere l'intero edificio quasi senza soluzione di continuità, "fondendo" copertura e parete perimetrale verticale e divenendo elemento di chiusura chiamato a regolare prevalentemente i flussi energetici tra ambiente esterno ed interno [Romano, 2011], e a gestire gli effetti della risposta dinamica del contesto in cui si innesta il sistema [Bedon, 2017].

È proprio in questo scenario che si colloca la tematica della presente ricerca, in cui l'indagine prestazione dal punto di vista normativo è in primo luogo rivolto all'evoluzione dell'involucro edilizio come elemento che sia in grado di mitigare le sollecitazioni sismiche non sovraccaricando la struttura primaria di supporto.

Se dai diversi versanti della ricerca, l'involucro edilizio è considerato nella globalità delle parti che lo compongono, in cui i sistemi di "*parete*" e "*copertura*" concorrono insieme per la definizione di un unico elemento architettonico, in ambito normativo europeo, con il termine involucro edilizio si afferisce in maggior misura agli elementi di chiusura verticali. In questo senso, la disamina di involucro viene sviscerata rifacendosi alle definizioni di chiusura perimetrale verticale.

Il passaggio etimologico-prestazionale viene tradotto in ambito normativo³³ destrutturando e affiancando alla definizione generica di "*chiusura*", presente all'interno della norma UNI 8290-1:1981³⁴ e ulteriormente specificata dalla UNI 8369³⁵, la definizione di facciata continua dell'involucro edilizio, all'interno delle norme UNI EN 13830:2015³⁶. La classificazione riportata all'interno delle sopracitate normative "*in base alla classificazione rispetto alla struttura portante*" trova riscontro nella definizione asseverata dalla normativa "American Architectural Manufacturers Association", AAMA, in cui la definizione di parete perimetrale verticale viene scissa tra "*curtain wall*" e "*window wall*" – ulteriormente espresse all'interno paragrafo 1.4 "*Il Curtain Wall e i sistemi connessi*". In questo scenario si evince come il ruolo normativo non si allinea con le innovazioni e definizioni provenienti dal settore scientifico disciplinare di riferimento.

Diversamente, facendo riferimento alle normative di settore in campo internazionale, il termine involucro – nella sua accezione più ampia, tecnica, funzionale e formale – viene riportato all'interno del "Guideline for Condition Assessment of the Building Envelope"; definito dall "American Society of Civil Engineering" ASCE 30-14, come "un insieme di componenti assemblati in modo da funzionare come un'unità in grado di separare o di schermare selettivamente l'ambiente esterno dall'ambiente interno".

Dal punto di vista prestazionale¹⁷ rispetto la normativa europea, all'involucro edilizio e quindi ai sistemi di chiusura verticali intesi come *curtain wall*, vengono demandate diverse funzioni da asseverare. Ogni sistema e i suoi componenti devono avere determinati requisiti prestazionali per soddisfare le loro funzioni come parte del sistema complesso in cui vengono innestati. Le variabili legati al sistema o ai componenti che costituiscono tali sistemi riguardano non solo le funzioni tecniche operative ma anche quelle materiali. Di fatti essendo costituite da più materiali, la loro caratterizzazione materiale deve essere presa in considerazione durante la fase di progettazione andando a definire i requisiti dei singoli componenti o dell'intero sistema. Questi requisiti prestazionali sono diversi e possono essere applicati a tutti o solo ad alcuni dei componenti o sistemi. I componenti sono spesso costituiti da materiali diversi che hanno proprietà diverse, che devono essere tenute in considerazione nella progettazione e nell'assemblaggio del sistema. Su scala più ampia, le proprietà del sistema di involucro devono essere tenute in considerazione anche nella sua interfaccia e interazione con altri sistemi, come il sistema strutturale o il sistema di controllo ambientale dell'edificio. La comprensione delle proprietà dei singoli materiali e del sistema è essenziale per la valutazione delle prestazioni dell'involucro edilizio. Le condizioni fisiche degli elementi e le prestazioni dei singoli sistemi dell'involucro edilizio devono essere valutate in modo approfondito. La comprensione di queste teorie è importante per valutare i problemi particolari di un determinato sistema di involucro edilizio. Questa comprensione influisce anche sulla progettazione delle manutenzioni del sistema di involucro¹⁸. Ancor prima delle norme UNI, la Technical note n. 4 "Performance requirements for external walls" della ISCC chiariva bene fin dai primi anni Settanta "i fenomeni da controllare attraverso la chiusura di un sistema edilizio"¹⁹. L'ultima revisione della norma di prodotto UNI EN 13830:2015, merita particolare attenzione; questa, approvata nel 2015 dal "Comitato europeo di normazione" CEN, consente di determinare le caratteristiche²⁰ delle facciate continue, secondo l'impostazione del "Regolamento dei Prodotti da Costruzione" CPR 305/11. Rispetto le caratteristiche aggiunte nell'ultima revisione sono stati introdotti nuovi annessi al fine di fornire principi di progettazione e verifica, metodi di test condivisi, trattare la durabilità di alcune caratteristiche e, soprattutto, descrivere le regole di estendibilità dei risultati delle prove di laboratorio:

- Annesso C (informativo) Resistenza alle azioni: guida all'utilizzo degli Eurocodici per la verifica della resistenza meccanica della facciata continua;
- Annesso D (normativo) Test per la determinazione della resistenza all'azione sismica della facciata continua;
- Annesso E (normativo) Test per la determinazione della reazione al fuoco della facciata continua;
- Annesso F (normativo) regole di estendibilità dei risultati per i vari requisiti essenziali;
- Annesso G (informativo) Esempio di riepilogo dei requisiti e dei livelli prestazionali di una facciata continua;
- Annesso H (informativo) Intercambiabilità dei componenti;
- Annesso I (informativo) Approccio di base alla durabilità.

Da questo scenario si evince come la normativa di "seconda generazione" introduca per la prima volta a livello europeo uno specifico capitolo relativo alle modalità di valutazione sperimentale del comportamento sismico degli elementi di chiusura esterni, cioè degli elementi non portanti dell'edificio, ma che rivestono un significativo ruolo per quanto attiene il

funzionamento prestazionale dell'edificio, intese come condizioni di servizio, e la sicurezza delle persone ovvero stato limite di danno SLD e stato limite ultimo SLU.

Altrettanto importante capitolo della EN 13830 è quello racchiuso all'interno dell'*Annesso D*, che ha il compito di essere una guida all'utilizzo degli Eurocodici per la verifica della resistenza meccanica delle facciate continue. Particolare attenzione, dunque, a come utilizzare gli Eurocodici per la progettazione della resistenza meccanica alle azioni di progetto attese – vento, sisma, carico della folla e peso proprio – e a come combinarle tra loro in relazione agli stati limiti di esercizio ed ultimo, il tutto secondo le indicazioni contenute negli Eurocodici EN 1990 e 1991.

Da questo punto di vista è importante sottolineare come già la normativa nazionale, costituita dalle Norme Tecniche per le Costruzioni, NTC 2008, richiedeva la verifica dei componenti non strutturali dell'edificio e richiedeva, nello specifico, di progettare e verificare gli elementi di facciata, "*elementi costruttivi senza funzione strutturale*", il cui danneggiamento potrebbe provocare danni a persone per l'azione sismica corrispondente a ciascuno degli stati limiti considerati²¹. L'aggiornamento delle NTC del 2018, impongono un approccio più "*prestazionale*" e meno "*prescrittivo*" per ciò che concerne la progettazione degli elementi costruttivi cosiddetti "non strutturali". Infatti, sono stati eliminati i dettami presenti nelle precedenti norme, obbligando di fatto il progettista a verificare il rispetto dei requisiti minimi di sicurezza²² richiesti agli elementi non strutturali, al pari di quelli strutturali.

Da questi assunti di base, che riguardano il confronto tra ambito scientifico e normativa di settore, emerge come ad architetti e tecnologi sia richiesto un ampliamento delle competenze. Sono, infatti, chiamati non solo a ripensare le caratteristiche funzionali-prestazionali dei componenti che costituiscono l'involucro edilizio, ma anche a modificare il processo progettuale attraverso la contaminazione proveniente dal trasferimento tecnologico da altri settori di scienza e tecnica, proponendo un maggiore dialogo che risulti propositivo nel colmare i gap normativi. L'involucro edilizio rimane, dunque, uno degli elementi esterni più importanti per la funzionalità dell'edificio. Se da un lato, risulta campo fertile per la definizione di un nuovo linguaggio architettonico dall'altro ha un ruolo critico per quanto riguarda le prestazioni energetiche e la funzionalità interna, di sicurezza e stabilità di un edificio. Con il continuo miglioramento della tecnologia, si rendono disponibili diverse opzioni di miglioramento da incorporare nelle facciate degli edifici. Questi elementi sono orientati al miglioramento delle prestazioni dell'involucro edilizio. Nel paragrafo successivo verranno discussi in quali modi tale evoluzione prestazionale dell'involucro edilizio si è compiuta e si sta compiendo, assurgendo a vera e propria tematica chiave della progettazione architettonica.

1.2 Dal sistema passivo/massivo al sistema attivo/adattivo

Per comprendere in maggiore misura il percorso evolutivo dell'involucro edilizio, risulta necessario fare riferimento alle esigenze e condizioni che hanno portato al cambiamento dei paradigmi tipo-tecnologici che lo compongono, nella fattispecie, caposaldo di questa evoluzione risiede nella ricerca e mantenimento di condizioni di comfort²³ all'interno degli spazi costruiti [Altomonte, 2005].

Nella definizione delle caratteristiche dell'involucro, due sono le tecnologie di base che possono essere impiegate; una di tipo passivo, rappresentata per lo più da sistemi costruttivi massivi²⁴, ed una di tipo attivo, "*che trova la propria realizzazione nell'interazione con l'esterno, grazie a degli elementi trasparenti o regolabili in grado di comportarsi come una vera e propria membrana dell'organismo edilizio*" [Slessor, 1997].

Forma e funzione dell'involucro hanno, quindi, registrato nel tempo un'evoluzione sostanziale sia nell'uso dei materiali, si è passati da involucri prevalentemente massivi, realizzati in materiale lapideo a involucri sempre più "leggeri", realizzati con superfici trasparenti, sia nelle prestazioni dei suoi componenti.



Fig. 2. Apple Store-
Foster + Partner, New
York (2019)

Di fatti, è proprio l'introduzione del vetro, quale tecnologia che è in grado di mettere a nudo la struttura primaria di supporto, che muta la cultura tecnologica del patrimonio costruttivo radicata sui sistemi massivi, divenendo paradigma di smaterializzazione e immaterialità²⁵. Dalla distinzione di sistema "passivo" e sistema "attivo" e dalla necessità di dotare gli involucri con sistemi in grado di controllare progressivamente l'interazione tra ambiente esterno ed interno (Cfr. Paragrafo 1.1) che emergono gli aspetti connessi all'adattamento²⁶, come fattori catalizzanti per l'evoluzione dell'involucro stesso.

In accordo a ciò, viene posta l'attenzione sull'evoluzione etimologica-funzionale-prestazionale dell'involucro edilizio, passando dal concetto di isolamento a quello di adattabilità, da "funzione singola-comportamento singolo" a "multifunzione-integrazione" [Shahin, 2019]. Un edificio tradizionale, infatti, è capace di rispondere alle sollecitazioni esterne soltanto attraverso la sua componente massiva e la sua configurazione costruttiva, mentre risulta essere incapace di rapportarsi ad un ambiente in continua variabilità.

L'architettura "passiva" si è evoluta in risposta alle preoccupazioni sulle implicazioni della fornitura meccanica [Wigginton & Harris, 2013], legate ai problemi di complessità, costo, manutenzione e alla crescente dipendenza dalla tecnologia, piuttosto che all'indipendenza da essa, e rimane di fondamentale importanza per l'architettura del futuro.

Tuttavia, l'approccio passivo non può fornire risposte a tutti i problemi di controllo del clima e questo ha portato alla ricerca di mezzi per rendere l'involucro quale reagente alle sollecitazioni esterne.

Il processo evolutivo volto verso l'innovazione degli apparati tecnologici ha portato alla definizione di un innovato concetto di involucro, non più massivo-passivo, ma *attivo-adattivo* e complesso [Gregory, 1986], permettendo di indagare e comprendere i vantaggi dell'integrazione di sistemi di automazione a scala architettonica, che interagiscono e regolano sia il sistema impiantistico, sia la conformazione estetico-architettonica dell'involucro. Per cui, alle tre tradizionali tipologie - conservativo, selettivo e rigenerativo²⁷ - individuate da Benham [1969], se ne è aggiunta una quarta: l'involucro adattivo [Loonen, 2013; Knack, 2014].



Fig. 3. Al Bahr Towers-
Aedas Architects, Abu
Dhabi (2012)

L'architettura adattiva viene descritta per la prima volta da Frei Otto [1995] "come un sistema in grado di cambiare forma, posizione, utilizzo o spazio".

Questa definizione si basa sul concetto di globalità delle parti che variano, in funzione armonica, tra scelte compositive, orientate a rendere questi sistemi sempre più leggeri e trasparenti²⁸, e scelte prestazionali, orientate a renderli sempre più performanti [Rigone, 2015]. Gli aspetti intrinseci di questi sistemi risiedono, come espresso da Atkin [1989], nella capacità di:

- *conoscere*, ciò che accade al suo interno e nel suo immediato intorno;
- *decidere*, il modo in cui intervenire per rendere confortevole gli ambienti confinati;
- *rispondere*, velocemente al mutare delle esigenze.

Il carattere di adattività risulta essere sempre più strategico per le dinamiche che investono l'architettura e, in particolare, la tecnologia. In questo senso, la componente tecnologica contribuisce, dunque, significativamente alla definizione di un nuovo linguaggio architettonico, in cui l'attitudine a generare architetture dotate di capacità adattive per fronteggiare le moderne esigenze di cambiamento, comporta inevitabilmente una transizione dei paradigmi formali [Conato & Frighi 2018].

Nel settore della Ricerca e Sviluppo, infatti, si assiste non solo all'ampliamento delle tipologie di facciata ma, soprattutto, si registra uno straordinario incremento di innovazione sulle funzionalità e risposte attive dei componenti, orientato verso "superfici di involucro con

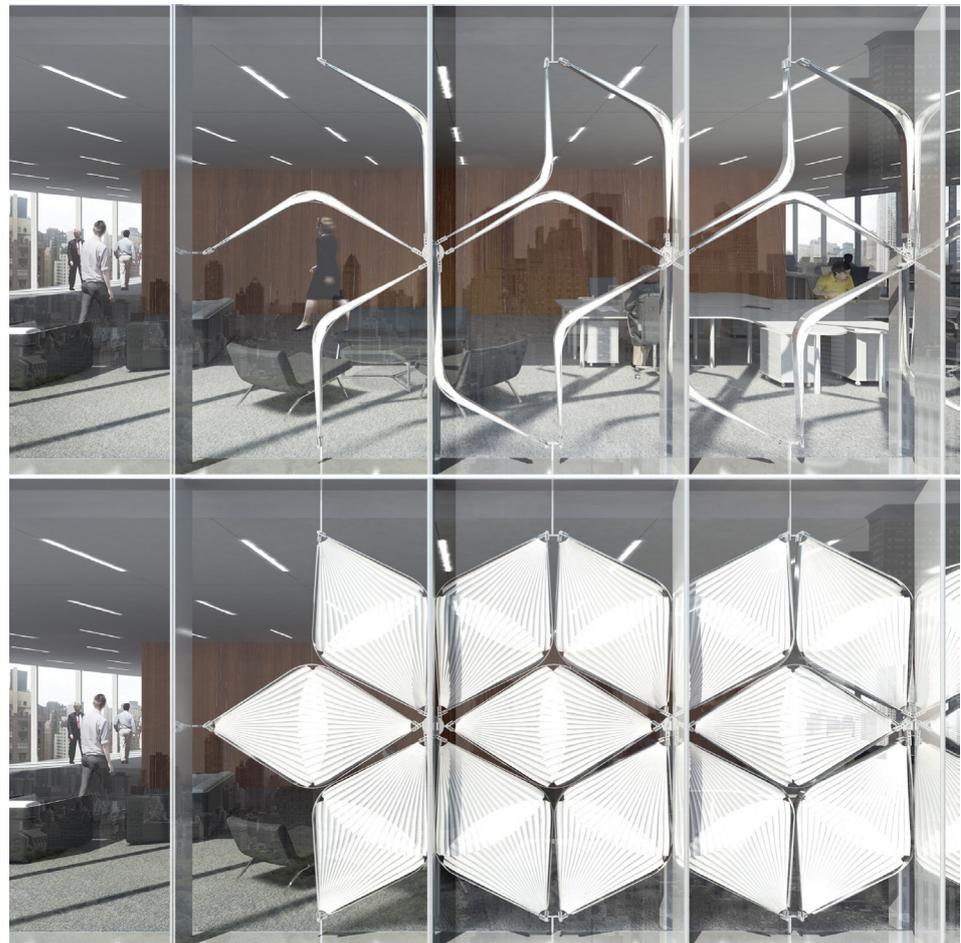


Fig. 4. Render of Snapping Façade by Dioinno Architecture PLLC

caratteristiche di adattabilità tali da rispondere in maniera efficiente al contesto dinamico e, allo stesso tempo, siano in grado di assorbire gli effetti da questo generati [Lucarelli et al., 2020].

Le facciate adattive, infatti, possono garantire miglioramenti nell'efficienza energetica e nell'economia degli edifici [Giglio, 2020], grazie alla loro capacità di modificare in tempo reale le proprie prestazioni e il proprio comportamento, in base ai parametri interni-esterni, attraverso materiali, componenti e sistemi [Romano et al., 2018].

Di fatti, il cambiamento delle prestazioni di un involucro può essere ottenuto in svariati modi, attraverso cambiamenti chimici nei materiali che lo compongono, con la movimentazione di elementi o introducendo flussi d'aria [Corrado, 2020].

Risulta necessario, però, sottolineare quanto espresso da Loonen [2013], la semplice aggiunta di singole caratteristiche adattive non porta però automaticamente a un aumento dell'operatività e delle prestazioni dell'involucro. Egli afferma la necessità di adattamenti inter-coordinati che coinvolgano anche i sottosistemi e i servizi dell'edificio. La negoziazione delle singole funzioni adattive della facciata comporta la necessità di un processo decisionale intelligente nel controllo degli adattamenti della facciata [Loonen et al. 2013]. Alla luce di queste considerazioni, le tecniche di *adaptive design*²⁹, applicate all'involucro, assumono oggi un ruolo primario in funzione di risposte prestazionali programmabili, utili a incidere sulla qualità dell'ambiente costruito e, al contempo, modulare gli effetti da questo generati. In generale, il comportamento adattivo è dato dalla combinazione di componenti e meccanismi di automazione e movimentazione basati su motore elettrici.

Gli involucri sono, dunque, tra le componenti architettoniche che possiedono una maggior interdipendenza con i sistemi meccanici, in cui l'integrazione "*edificio-impianti*" spinge l'innovazione verso la realizzazione di componenti sempre più "*attivi*" e "*intelligenti*", attraverso elementi che leggono le sollecitazioni e le traducono in risposte prestazionali da offrire. L'evoluzione di tali sistemi nasce, quindi, dalla necessità di progettare elementi e componenti che sono in grado di regolare, da un lato, i flussi energetico-materici interni-esterni, dall'altro, di assicurare la *flessibilità*³⁰ del sistema progettato mediante dinamismi che consentono di variare le sue proprietà fisiche in base alle sollecitazioni esterne.

I sistemi adattivi sono un precursore degli smart system, grazie agli algoritmi applicati, sono in grado di adattarsi a condizioni mutevoli senza l'intervento dell'utente [Feigh et al., 2012]. Nel paragrafo successivo "*La contaminazione degli Smart System per il Façade Design*", infatti, verranno discussi gli aspetti legati all'integrazione di sistemi di automazione in facciata e come questi hanno modificato e continuano a modificare la progettazione dei sistemi involucrati.

Dal background scientifico, enunciato sopra, si evince come il concetto di "*involucro adattivo*" è per lo più legato alle prestazioni energetiche, agli aspetti del comfort termico, alla qualità dell'aria interna o alle prestazioni visive e acustiche [Beton et al., 2019].

Tuttavia, nell'ultimo decennio, l'accezione di involucro adattivo si amplifica e si declina ulteriormente verso nuovi significati che comprendono la capacità dei sistemi di facciata di mutare la propria morfologia sostenendosi strutturalmente³¹ e non sovraccaricando la struttura primaria di supporto. A seconda del tipo e del livello di adattabilità di una determinata facciata, la richiesta strutturale potrebbe comportare delle sfide durante il processo di progettazione complessivo.

D'altra parte, l'adattabilità strutturale può portare a una risposta statica e dinamica più efficiente in condizioni di carico variabili, cioè aumentare la resistenza in caso di eventi estremi³² e/o fornire meccanismi di collasso a prova di rottura [Beton et al, 2018].

Come enunciato nel paragrafo precedente, l'attenzione della presente ricerca viene, infatti, rivolta verso un'importante funzione dell'involucro edilizio, cioè quella di trasferire i vari carichi di progetto allo scheletro dell'edificio, in particolar modo rispetto le azioni indotte da eventi sismici, orientando la progettazione verso involucri che siano in grado di fornire sicurezza e protezione agli occupanti e agli utenti contro i rischi naturali.

Pertanto, gli sforzi del seguente paragrafo sono legati alla comprensione del concetto di involucro adattivo come elemento in grado di rispondere in modo attivo-reagente agli effetti indotti e subiti da eventi sismici. Nella funzionalizzazione evoluta dell'Involucro Edilizio, la progettazione delle prestazioni energetiche, termiche acustiche e quella di resistenza ai carichi orizzontali ed eccezionali seguono criteri diversi, talvolta, completamente opposti. Da un punto di vista strutturale, sotto l'azione di carichi eccezionali come impatti o pericoli in generale, gli involucri vetrati rappresentano un componente critico per gli edifici, a causa del comportamento tipicamente fragile e della limitata resistenza alla trazione delle lastre di vetro³³.

Alcuni tipi di adattabilità della facciata possono influenzare le prestazioni della struttura portante e le sue forze interne. Inoltre, anche la struttura portante della facciata stessa può essere costituita da una struttura adattabile. Volendo esaminare l'evoluzione del concetto di adattabilità come risposta strutturale dell'involucro edilizio alle sollecitazioni esterne, risulta necessario fare un passo indietro, riportando sinteticamente quanto espresso nel corso degli anni dalla letteratura di settore. Questi concetti verranno ripresi e ulteriormente specificati all'interno del Capitolo 3 "*I dispositivi di risposta dinamica con capacità di smorzamento*".

Le prime definizioni di *struttura "adattiva"* erano più allineate al concetto di struttura cinetica [Zuk & Clark 1970], inteso come sistema che consente l'adattamento attraverso l'installazione di attuatori³⁴ ma non di sensori³⁵. Successivamente Wada, Fanson e Crawley (1990) sottolineano che le strutture controllate, essendo un sottoinsieme di quelle adattive, sono quelle che incorporano attuatori e sensori che lavorano simultaneamente. In una struttura attiva, inoltre, sia gli attuatori che i sensori sono incorporati anche nella funzionalità della struttura e non solo nel compito di controllo. Soong e Manolis [1987] si avvicinano al concetto di struttura attiva definendola come una struttura costituita da due tipi di membrane resistenti al carico: membrane statiche o passive e membrane dinamiche o attive³⁶. Queste ultime sono integrate in modo ottimale per consentire l'adattamento a carichi ambientali mutevoli.

Sobek e Teuffel [2001], in seguito, hanno descritto in "*Adaptive systems in architecture and structural engineering*" le strutture adattive come sistemi in grado di rispondere alle mutevoli condizioni esterne attraverso la manipolazione delle forze interne, delle deformazioni o dei carichi esterni³⁷. In generale, sulla base della discussione di Morales-Beltran e Teuffel (2013), le strutture adattive sono quelle che possono dare una risposta controllata non passiva ai movimenti tipicamente indotti da terremoti e vento.

Sulla base di questi concetti l'*Action Cost TU14.03 "Adaptive Facades Network"* attraverso il *Task Group "Structural"* ha presentato un nuovo approccio di classificazione per le facciate strutturali adattive, in cui tre aspetti sono di importanza fondamentale, di seguito espressi:

- modalità di cambiamento del sistema³⁸;
- tipo di sistema di attivazione³⁹;
- evento scatenante e/o sistema di avvio del cambiamento⁴⁰.

Focalizzando l'attenzione sul secondo aspetto, è necessario sottolineare che le caratteristiche e gli effetti dei sistemi di attivazione, comprese le possibili combinazioni, devono essere adeguatamente presi in considerazione in fase di progettazione, poiché sono tipicamente responsabili dei cambiamenti di configurazione multifase durante l'intero periodo di vita di una determinata facciata⁴¹.

Da questo assunto, ne deriva la necessità di inquadrare gli attuali deficit e definire le nuove opportunità legate alla progettazione di componenti adattivi. Di fatti, sebbene le facciate adattive stiano diventando gradualmente più comuni, la loro progettazione rappresenta ancora un compito difficile [Bedon et al., 2019]. I problemi principali sono legati alla caratterizzazione strutturale, anche in mancanza di norme di progettazione specifiche e di disposizioni a supporto dei progettisti.

A differenza dei sistemi di rivestimento tradizionali, i molteplici modi in cui le facciate adattive possono interagire con l'ambiente - e modificare le loro caratteristiche meccaniche e/o termofisiche intrinseche - devono essere adeguatamente presi in considerazione. Infatti, la complessificazione dei sistemi di automazione e di gestione degli edifici porta a prestazioni non performanti e a conflitti tra la soddisfazione degli occupanti, l'efficienza energetica e l'economicità della manutenzione. L'interazione tra le tecnologie intelligenti e i sistemi di gestione degli edifici richiede il collegamento, il monitoraggio e il controllo di tutti i servizi e gli elementi attivi dell'edificio, compresi gli elementi e i componenti adattivi di facciata. È stato dimostrato da numerose ricerche come la progettazione di facciate strutturali adattive incida notevolmente con gli obiettivi fissati in campo europeo⁴² per il contenimento e riduzione dei consumi energetici, non solo grazie ai risparmi energetici nelle funzioni che rispondono alle condizioni climatiche esterne, ma anche grazie all'uso efficiente di materiali o componenti che hanno come carattere intrinseco la funzionalità adattativa⁴³.

In definitiva, il termine "adattivo" comporta un approccio progettuale che cerca di unire fattori multi-scalari per raggiungere una soluzione progettuale simbiotica ad alte performance. In particolare, quando le prestazioni dell'edificio sono ottimizzate rispetto al comfort climatico, si ottengono vantaggi in termini di sostenibilità.

In questo scenario, Industria e Ricerca sono chiamati a collaborare per attuare un'innovazione di tipo technology-push, il cui obiettivo comune è rivolto verso la progettazione e realizzazione di involucri edilizi capaci di adattarsi in modo contestuale al variare delle sollecitazioni esterne, siano esse rivolte alle condizioni di servizio che di sicurezza. L'accelerazione dell'adozione degli smart system da parte del mercato e la modernizzazione delle reti possono portare a un aumento delle prestazioni degli involucri adattivi. Di conseguenza, il monitoraggio e la valutazione delle facciate adattive diventeranno molto più semplici e accessibili grazie al *controllo ottimizzato e predittivo* degli edifici intelligenti. Il paragrafo successivo mira a far comprendere come l'innovazione tecnologica dei sistemi di rilevamento, misura e controllo abbiano radicalmente modificato l'approccio progettuale per la realizzazione di facciate adattive.

1.3 La contaminazione degli Smart System per il Façade Design

L'importanza crescente del ruolo svolto dall'involucro edilizio – chiamato a rispondere ad esigenze sempre più complesse, derivanti da emergenze climatiche e catastrofi naturali – richiede la progettazione di sistemi intelligenti⁴⁴, *smart system*, che siano in grado di mitigare l'esposizione a rischi di diversa natura valutando nella fase di progettazione, *ex ante*, la probabilità che si verifichino determinati fenomeni [Rodonò et al., 2021].

Questa consapevolezza scaturisce dalla riflessione che l'involucro stesso costituisce "la prima e necessaria cerniera di collegamento tra sistema ambientale e sistema tecnologico" [OECD - IEA, 2013]. La comprensione dell'interrelazione tra questi impatti e i sistemi tecnologici *smart* che compongono l'involucro edilizio è di grande interesse per il dibattito scientifico contemporaneo. L'accento è posto sul controllo attivo e automatico delle funzioni svolte dall'involucro edilizio, con l'obiettivo di conferire all'intero edificio il concetto di *smart building*⁴⁵.

L'evoluzione dell'involucro edilizio, infatti, come fulcro dell'innovazione progettuale nel XX secolo, è parallela ai progressi dell'ingegneria e dell'architettura dell'involucro e della scienza delle costruzioni e dei materiali, nonché agli sviluppi dell'ingegneria informatica e dell'intelligenza artificiale⁴⁶, discipline fondamentali per stabilire il gioco fra le parti tra forma, funzione e prestazione dell'involucro. È proprio in questo ambito che si sviluppa il *Façade Design*, inteso come orientamento progettuale basato sulle prestazioni, in cui il carattere predittivo risulta predominante per un approccio corretto [Lucarelli et al., 2012] e dove l'espressione architettonica e l'orchestrazione dei componenti di automazione possono essere identificati come tema e obiettivo [Interactive Architecture, 2016].

Negli ultimi decenni, studi e ricerche hanno indagato e sviluppato prestazioni edilizie avanzate, in particolare per l'involucro edilizio, concentrandosi sui comportamenti adattivi dei componenti edilizi che potrebbero reagire o modificarsi o adattarsi nel tempo a diverse esigenze e diverse condizioni al contorno [Beesley et al., 2006; Kronenburg, 2007].



Fig. 5. Prototype of the project "a Degree of Freedom", Jim Rhoné, Martin Genet (2014), National School of Architecture Paris-Malaquais (ENSAPM)

I. SOFT-FRAME ELECTRO ACTIVE POLYMERS (SFEAPs)

Fig. 01. Prototype photograph

Fig. 02. Axonometric view (regular and splitted) of an SFEAP

1. elastic membrane / 2. soft electrodes / 3. insulation layers / 4. soft frames / 5. electrical plugs.

Fig. 03. Hierarchical breakdown of the SFEAPs kinetic principle

Column 1. Macroscale : Illustration of the constraint release (constraint exerted by the elastic membrane on the soft frame).

Column 2. Microscale : Illustration of the resultant (elongation in the membrane plane) caused by the crushing, whose vector is normal to the elastomer surface.

Column 3. Nanoscale : Illustration of the electrodes polarization on each side of the membrane.



Il forte contributo proveniente dal campo degli smart system permette di definire i sistemi intelligenti costituiti da attuatori e sensori capaci di autodiagnosi, ma anche di tecnologie per la misura delle deformazioni per il monitoraggio continuo, in tempo reale con alte capacità di acquisizione dei dati e di gestione e adattamento [Milardi, 2020].

Data l'importanza della facciata come interfaccia dinamica tra ambiente esterno ed interno [Romano, 2011], la possibilità di avere dati in tempo reale sulle condizioni operative dell'involucro, è significativa per migliorare il funzionamento dell'edificio, abilitando il concetto di facciata adattiva [Arnesano et al., 2019].

In accordo con la cornice semantica espressa finora, infatti, i sistemi di facciata adattiva sono strettamente connessi con l'integrazione degli smart system.

Non è chiaro però come il termine "smart system" sia correlato all'involucro edilizio e se corrisponda all'attuale concezione di sistema intelligente nell'industria⁴⁷.

Nella maggior parte dei casi, la "smartness" del sistema può essere ricondotta all'integrazione di sistemi in grado di attivarsi tramite operazioni autonome basate su controllo a circuito chiuso, apprendimento automatico e capacità di rete che consentono al sistema di esibire un comportamento adattivo [UE, 2011]. Si presume che le strategie e i concetti per il controllo e l'organizzazione dei sistemi di facciata adattivi possano essere derivanti dai sistemi tecnici intelligenti, grazie alle innovazioni provenienti dalla rivoluzione industriale, a vantaggio delle prestazioni dell'edificio [Böke et al, 2019].

Per poter trarre spunti dall'implementazione di sistemi tecnici intelligenti per la trasmissione all'involucro edilizio, è necessario definire prerequisiti e criteri che tali sistemi devono avere. In prima istanza, il prerequisito fondamentale di tali sistemi è quello di elaborare le informazioni registrate tramite sistemi di controllo e trasmettere impulsi all'involucro sulla loro base agli attuatori, i quali eseguono a loro volta le regolazioni della costruzione [Sobek & Teuffel, 2001].

Moloney [2011] sulla base dei criteri definiti da Wiggton e Harris [2002] in "Intelligent Skin" ovvero "considerazione del tempo" e la "capacità di apprendere"⁴⁸ integra con ulteriori aspetti quali "sistema di ingresso", "sistema di elaborazione" e "sistema di uscita".

L'involucro edilizio diventa così una complessa macchina, il cui funzionamento è regolato da sistemi tecnologici avanzati, tali da regolare e controllare una serie di apparati meccanici capaci di adattare il rapporto complesso tra le condizioni climatiche esterne e quello comfort interno. Il rapporto sinergico involucro-sistemi di attivazione/meccanizzazione viene monitorato attraverso approcci di misurazione *ad hoc* che devono essere integrati ai sistemi di facciata [Attia et al. 2018a e 2018b], questi spesso vengono introdotti solo in un secondo momento alla costruzione e di conseguenza il monitoraggio delle prestazioni non avviene attivamente [Bilir et al., 2018]. Ciò comporta una certa complessità nella gestione degli edifici e rende l'automazione per l'ottimizzazione delle prestazioni dell'edificio e la soddisfazione degli utenti una sfida seria [Attia, 2018].

Tutti gli elementi devono essere progettati, controllati, gestiti e mantenuti con una visione integrata, solo così si può raggiungere un adeguato comfort dell'edificio e migliorare il benessere di chi lo abita, ottenendo notevoli vantaggi di risparmio energetico ed economico⁴⁹. Gli aspetti innovativi sono dunque correlati all'integrazione ed ottimizzazione di tali sistemi all'interno dei sistemi di facciata.

Da questo assunto si deduce che la "combinazione di sensori, meccanismi di movimentazione classificabili in smart system definiscono l'involucro responsivo, interattivo, dinamico e intelligente, aumentando la sua capacità di cambiare la struttura in relazione alla necessità" [Knaack et al., 2014]. A fronte di ciò, la valutazione del comportamento adattivo dei componenti dell'involucro rappresenta una sfida perché le prestazioni degli stessi non possono essere sufficientemente caratterizzate da mezzi di indicatori di prestazione statici. Una comprensione più ampia delle prestazioni degli edifici riconosce che tutte le forze che agiscono sugli edifici non sono statiche e fisse, ma piuttosto mutevoli e transitorie [Dewidar et al., 2013]. Nello studio dei sistemi intelligenti realizzati in architettura, Yiannoudes [2016] osserva che, sebbene questi siano in grado di mappare i comportamenti di apprendimento e di rispondere alle esigenze degli utenti, lavorano sulla base di regole precedentemente previste.

L'evoluzione della facciata adattiva si trova a dover prendere decisioni complesse tra funzioni interdipendenti e scenari imprevedibili, attraverso l'autoregolazione. I controlli tradizionali basati su regole sono quindi insufficienti nel contesto della multifunzionalità e degli adattamenti non lineari [Loonen et al. 2013; Jencks 2015].

Per cui, l'intelligenza di una soluzione di facciata adattiva non si deve misurare esclusivamente sulla base del mero contenuto tecnologico [Altomonte, 2005], piuttosto sulle modalità secondo cui sfrutta il principio di adattarsi *come un vero e proprio organismo biologico*⁵⁰,

ottenendo il massimo rendimento attraverso le potenzialità tecnologiche messe in atto. Un approccio integrato dunque che esalta il parallelismo tra l'involucro e il corpo umano, dimostrando che non è possibile tenere separati gli elementi costitutivi dell'involucro dai sistemi di automazione [Loonen, 2013].

Un ulteriore approccio inerente il requisito adattivo degli edifici è quello che, seguendo i dettami della biomimetica⁵¹, orienta gli studi verso la realizzazione di facciate cangianti nelle risposte materico funzionali e di linguaggio, alle diverse sollecitazioni derivanti dai contesti. I progressi maturati nell'ambito delle nuove tecnologie, e oggi sempre più "veloci", propongono nuove prospettive di relazioni tra progetto e biologia offrendone differenti possibilità grazie alle elevate attuali capacità tecniche di interpretazione ed emulazione della natura [Milardi & Mandaglio, 2020].

Assumendo la "*natura come modello, misura e mentore*" [Benyus, 2002] si studiano i materiali e di conseguenza i componenti che reagiscono agli stimoli ambientali in modo organico. La riproduzione integrale nei sistemi artificiali dei comportamenti metabolici degli organismi naturali, l'adattabilità e reattività sono emblematici di un'innovazione produttiva che offre alle applicazioni in campo architettonico nuove capacità adattive.

In questo senso, il dialogo sinergico tra le parti che definiscono e costituiscono un sistema intelligente per l'involucro edilizio riguarda lo svolgimento di una serie di prestazioni di tipo responsivo – secondo quindi un paragone diretto con l'idea biologica di intelligenza – in grado di garantire un'adeguata protezione degli spazi interni e gestire – nella maniera più consapevole possibile – imparando e rispondendo alle mutevoli condizioni ambientali esterne [Compagno, 2002].

Nell'ambito delle discipline del design, il termine "*smart*" è stato usato più frequentemente in riferimento ai materiali [Addington & Schodek, 2009]. Addington e Schodek identificano i "*materiali intelligenti*" come sistemi che possiedono "*funzioni tecnologiche incorporate*"⁵² che comportano risposte ambientali specifiche, operando attraverso cambiamenti delle proprietà fisiche interne o attraverso scambi energetici esterni [Klooster, 2009]. Grazie a queste proprietà intrinseche, i materiali intelligenti⁵³ possono svolgere un ruolo significativo negli involucri intelligenti, adattivi e reattivi.

La relazione tra comportamento biomimetico e lente progettuale biomimetica, evidenzia la necessità di utilizzare dispositivi digitali che consentano all'involucro di rispondere a performance ambientali sempre più eterogenei in relazione alla complessità delle condizioni ambientali e alle conseguenti esigenze di comfort [Giglio, 2020].

Oggi esistono, dunque, le basi tecniche per l'implementazione di costruzioni *autoadattive* [Schumacher et al., 2009]. Oltre alle tecnologie disponibili per sensori e attuatori, la ricerca e lo sviluppo di materiali intelligenti aprono ulteriori possibilità tecniche [Drossel et al. 2015]. Il controllo è importante perché decide il comportamento del sistema di facciata autoadattativa. Mentre i materiali intelligenti si riferiscono a un controllo intrinseco, i controlli estrinseci basati su computer consentono l'ottimizzazione in tempo reale e l'applicazione dell'intelligenza artificiale [Yiannoudes 2016; Park et al., 2004].

Per cui le nuove tecnologie, i materiali intelligenti e i sistemi distribuiti hanno stimolato l'introduzione di modelli biologici per comprendere il comportamento e la progettazione dei sistemi edilizi e dei loro controlli. È emerso un lessico descrittivo che impiega una terminologia decisamente biologica per concettualizzare la progettazione architettonica. L'involucro deve essere progettato per operare "*come parte di un metabolismo e di una morfologia olistica dell'edificio, e spesso è collegato ad altre parti dell'edificio, compresi i sensori, gli attuatori e i cavi di comando del sistema di gestione dell'edificio*" [Wigginton & Harris, 2009].

La *nuova generazione* di involucri ad alte prestazioni [Dewidar et al. 2013] ha contribuito all'emergere di assemblaggi sofisticati che combinano la risposta ambientale in tempo reale, materiali avanzati, automazione dinamica con microprocessori incorporati, sensori e attuatori wireless e tecniche di progettazione per la produzione.

Questa pratica ha trasformato radicalmente il modo in cui gli architetti si avvicinano alla progettazione degli edifici. L'offuscamento dei confini tra le discipline ha dato origine a una quasi crisi nella definizione dei rispettivi ruoli e delle responsabilità professionali [Addington & Schodek, 2005].

Il pensiero progettuale convenzionale dall'alto verso il basso, incentrato sullo sviluppo e sulla comprensione degli edifici come forme inerti, popolate da sistemi meccanici artificiali per il loro sostentamento, deve essere analizzato criticamente e ripensato al fine di raggiungere uno stato di prestazioni continue attraverso l'adattamento in tempo reale della forma costruita e dei suoi componenti in modo sostenibile. Gli involucri edilizi adattivi o reattivi possono essere realizzati in diversi modi, utilizzando *approcci su macro-scala* come l'integrazione di sistemi smart, ma anche con *approcci su micro-scala* che gestiscono e migliorano le proprietà fisiche di alcuni materiali [Iommi, 2018]. Le istanze prestazionali e funzionali-tecnologiche acquisiscono così nuova valenza estetico-formale, divenendo generatrici di un processo progettuale rivolto alla produzione di *organismi capaci di travalicare culture e tradizioni architettoniche differenti* [Conato & Frighi, 2018].

Ciò avviene attraverso una nuova concezione architettonica in cui l'integrazione di materiali inediti e/o di materiali tradizionali innovati, che conferiscono al sistema capacità smart, siano in grado di rispondere in maniera appropriata agli attuali bisogni.

Il concetto di adattività dell'involucro con l'integrazione di *smart system* e di *materiali intelligenti*, capaci di controllare le prestazioni di consumo energetico degli edifici, conduce alla realizzazione di prototipi in grado di essere tradotti in componenti seriali per involucri evoluti capaci di fornire alte performances ambientali [Milardi, 2018].

Si tratta non solo di produrre conoscenze e metodologie necessarie per favorire l'attivazione dei processi legati all'innovazione ma soprattutto di concretizzare il trasferimento tecnologico dal settore scientifico al settore produttivo coinvolto per la stesura di soluzioni e prototipi, creando una sinergia utile ai soggetti coinvolti.

Emerge la necessità di analizzare il comportamento degli edifici e, in particolare, degli involucri edilizi, in funzione delle *aree geografiche* e delle *condizioni climatiche* in cui si trovano ad operare, al fine di stabilire delle regole affinché i sistemi tecnologici d'involucro non siano semplicemente esportati da una località all'altra – in funzione delle loro caratteristiche estetico-architettoniche – ma adattate in relazione all'area geografica di riferimento valutandone le prestazioni. Secondo questo approccio, ogni idea, disegno o calcolo non può essere svincolata dal contesto in cui si collocherà.

In conclusione, l'aspetto chiave del suddetto paragrafo è stato quello di analizzare il processo di progettazione degli involucri adattivi tramite l'integrazione dei sistemi smart, che siano componenti intelligenti o elementi realizzati con materiali intelligenti, nel processo di progettazione. Ne è emersa come la struttura di questo processo stia bloccando lo sviluppo di nuove soluzioni costruttive e come in realtà dovrebbe includere l'interazione delle parti interessate e il suo impatto sulla costruzione fisica delle facciate continue. Avendo affrontato la tematica del *Façade Design*, come processo di progettazione basato sulle prestazioni dell'involucro edilizio, risulta necessario menzionare una tra le più importanti trasformazioni nei metodi di gestione del progetto architettonico contemporaneo, facendo riferimento, senza alcun dubbio, al *BIM⁵⁴, Building Information Modeling*.

Le implicazioni dell'uso di questo sistema nel settore dell'involucro edilizio portano diversi vantaggi, il primo di tutti riguarda la gestione dell'intero processo di progettazione dal punto di vista economico, in particolare per quanto riguarda l'approvvigionamento dei materiali. Da questo ne deriva il secondo vantaggio, tale gestione consente di avvicinarsi all'obiettivo di *errore zero*, condizione nella quale i rischi, gli imprevisti e di conseguenza gli sprechi tendono idealmente allo zero [Rossetti, 2019].

Nello specifico caso dell'involucro edilizio, questo ha delle ricadute in una forte riduzione delle possibili criticità tra le componenti di involucro e le altre parti dell'edificio, quali la

struttura e gli impianti. Il punto centrale è che il concetto di BIM si spinge oltre la rappresentazione digitale e si configura invece come un "*processo di gestione informativa del progetto*" [Rossetti & Antonioli, 2013]. Oltre a tutti i possibili vantaggi, la progettazione di una facciata adattiva tramite procedura BIM è ancora un compito impegnativo.

Gli attori coinvolti nella fase di progettazione devono tenere presente che gli standard e le procedure attuali non possono essere sempre applicati. Inoltre, è necessario riflettere sulla gestione dei disastri, come i guasti funzionali o di alimentazione, e integrarli nel processo di pianificazione.

Per questo motivo, la *modellazione* e la *simulazione* possono essere intesi quali strumenti utili per comprendere l'influenza reciproca tra gli aspetti progettuali e le performance degli involucri edilizi adattivi e possono quindi contribuire fortemente alla loro diffusione nel mercato dell'edilizia, nonché allo sviluppo di tecnologie innovative.

Tuttavia, la simulazione di facciate adattive può essere significativamente più complessa rispetto alla previsione delle performance di facciate convenzionali e statiche, perché gli strumenti di simulazione esistenti non sono stati originariamente sviluppati per questo scopo. Ovviamente ci sono molti modi in cui viene eseguito ma nella pratica il processo varia a seconda delle aree culturali, ma reagisce anche ai diversi obiettivi del progetto. Come si vedrà nel paragrafo successivo, la costruzione di facciate svolge un ruolo particolare in questo senso, data la complessità del prodotto.

1.4 Il Curtain Wall e i sistemi connessi (componenti, elementi e materiali)

Risulta necessario riprendere alcuni fili del discorso tracciati nei precedenti paragrafi. All'interno della trattazione "*L'evoluzione dell'Involucro Edilizio: critical review sui passaggi evolutivi prestazionali dell'Involucro su macro ambiti e normative di settore*" (Cfr. paragrafo 1.1) sono emersi due concetti chiave:

- il primo, derivante dal mondo accademico, che riguarda *la necessità di concepire e quindi progettare l'involucro edilizio come un elemento in grado di interagire e rispondere in modo intelligente e adattivo con l'ambiente circostante* (i cui aspetti salienti sono stati discussi all'interno del paragrafo 1.2 "*Dal sistema passivo/massivo al sistema attivo/adattivo*"),

- il secondo che riguarda la stretta connessione dei termini involucro e facciata continua.

In accordo con la definizione espressa dal Committee on Curtain Wall Systems [2013], i sistemi di facciata continua/curtain wall vengono qui intesi come "*elementi che concorrono sinergicamente alla definizione dell'involucro edilizio*". Rispetto quest'ultimo concetto – focus del presente paragrafo – viene effettuata la disamina dei sistemi di facciata continua, rispetto ai componenti, elementi e materiali che li costituiscono, al fine di delineare gli aspetti critici utili alla lettura di tale sistema sollecitato alle azioni sismiche (Cfr. Capitolo 2 "*La progettazione antisismica degli Involucri Contemporanei*").

Come ormai acclarato, il termine curtain wall, viene riconosciuto, con un ruolo consolidato, all'interno della Cyclopedia of Architecture, Carpentry and Building⁵⁵ nel 1907. Il "*muro tenda*", letteralmente tradotto, definiva in realtà un ampio spettro di tipi di pareti diverse [American Technical Society, 1916; Pevsner et al., 1981], ma il riferimento quotidiano risiede nelle facciate continue in vetro e metallo [CMHC, 2004]. L'istanza determinante di "*ottenere massima quantità di luce nei grattacieli e nei grandi magazzini, portando a progressiva riduzione della dimensione degli elementi strutturali in facciata*" consegue la ricerca verso "*elementi di chiusura che siano completamente vetrati scindendoli dalla struttura portante dell'edificio*" [Fannelli, Gargiani, 1998]. La specializzazione strutturale ha comportato la separazione tra pelle e scheletro [Fitch, 1955]. Di fatti, l'esigenza di dotare gli edifici di pareti perimetrali leggere nasce dall'evidenza che nelle costruzioni dei grattacieli gli elementi di chiusura tradizionali – costituiti da materiali lapidei – non fossero in grado di supportare tutto il peso proprio⁵⁶ per altezze elevate [Marquis et al., 2017].

Per definizione, infatti, "la facciata continua è un rivestimento esterno non portante che non contribuisce alla rigidità della struttura dell'edificio" [UNI EN 13830:2015]. Da questo scenario, si evince come i principi di leggerezza e trasparenza (Cfr. Paragrafo 1.1) ritornano come paradigma di progetto [Altomonte, 2005], divenendo una *conditio sine qua non* per l'evoluzione dei sistemi di facciata.

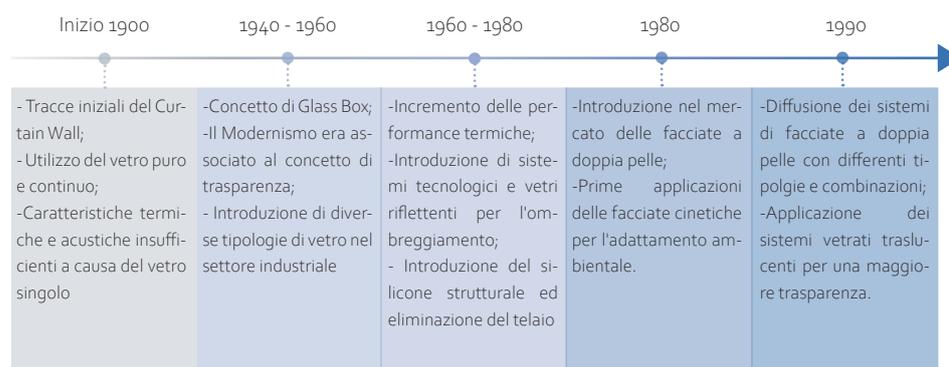


Fig. 6. Hallidie Building, Willis Polk. San Francisco (1918)

Rifacendoci in particolare alla componente trasparente dell'involucro è facile vedere come dopo l'avvento delle facciate continue⁵⁷ non vi siano state novità radicali in termini tipologici e concettuali⁵⁸. Il principio alla base di tale soluzione, infatti, è ancor oggi costituito dalla creazione di una maglia di profili estrusi in alluminio cui è affidato il compito di sostenere e riquadrare le vetrazioni [Lucarelli et al., 2012].

La diffusione del silicone, negli anni '60, segna l'introduzione di un materiale di fondamentale importanza per il settore delle facciate, intesa come tecnologia in grado di eliminare i profili metallici esterni e produrre facciate "liscie", cosiddette "*smooth façade*" [Rossetti, 2019].

Primi processi evolutivi del Curtain Wall



Per una maggiore chiarezza, segue uno schema sintetico consolidato di quali siano state le tappe principali per l'evoluzione tipologica dei sistemi di facciata continua.

Da molti versanti della critica, le tipologie dei sistemi di facciata⁵⁹ sono state ampiamente dibattute attraverso accurate metodologie che hanno messo in atto le diverse comparazioni⁶⁰. Il curtain wall ha attraversato un'intensa attività di regolamentazione, anche terminologica, in questo senso, la trattazione del seguente paragrafo risulta di non facile scrittura poiché si potrebbe incorrere in allitterazioni, forse inutili, già ampiamente comprese all'interno del mondo accademico. Tuttavia, la discussione degli aspetti costitutivi dei sistemi di facciata risulta essere strategica per preparare il terreno al focus principale della ricerca che riguarda, come espresso nell'introduzione, la sperimentazione di componenti antisismici per i sistemi di facciata continua.

In questa sede, ci si concentra sui componenti di facciate continue costituite da un'intelaiatura metallica in cui si innestano le specchiature, definita come sistema *Stick System* o a *montanti e traversi*. Questo tipo di sistema è realizzato da elementi verticali e orizzontali, montanti e traversi, metallici con pannelli trasparenti e pannelli opachi, spandrel⁶¹. A seconda del progetto, la combinazione dei pannelli di tamponamento e la loro opacità possono cambiare, ma il telaio metallico definito è costante.

In ogni caso le normative di settore asseverano gli aspetti prestazionali⁶² di questi sistemi in base ai quali sono stati definiti gli elementi costitutivi atti al raggiungimento delle prestazioni richieste. Facendo riferimento alla normativa di settore UNI EN 13830, questa viene ripresa dalla UNI EN 13119:2016 dando una classificazione dei principali elementi presenti nelle facciate continue intelaiate, di seguito riportati:

- asola di scarico, apertura attraverso la quale l'acqua è drenata verso l'esterno dell'edificio;
- barriera al vapore, strato comprendente un materiale o un rivestimento con resistenza alla trasmissione del vapore maggiore rispetto a quella degli altri strati della facciata e progettato per controllare il passaggio del vapore attraverso la facciata;
- carter (copertina), profilato esterno di copertura solitamente installato a scatto, applicato sul pressore del montante per fornire una finitura architettonica adeguata;
- canotto, elemento di connessione profilato sagomato per fornire continuità tra due profili cavi di un elemento dell'intelaiatura;

- cavallotto, elemento di connessione in acciaio, a pulsante, quadro o tondo, installato sull'estremità del traverso per fornire continuità tra i profili dell'intelaiatura, montanti e traversi;
- cimasa, componente protettivo tra la giunzione tra facciata continua e bordo del tetto;
- equalizzazione della pressione, metodo di sigillatura e di compartimentazione della facciata che consente di minimizzare rapidamente la differenza di pressione tra l'intercapedine della facciata fredda o le scanalature dei vetri e l'aria esterna;
- fermavetro, elemento di materiale profilato impiegato per tutto il perimetro di una lastra di vetro per assicurare il medesimo al telaio;
- giunto di dilatazione, giunto che compensa i movimenti termici o di altro tipo causati dalla facciata continua o dalla struttura di sostegno;
- guarnizione esterna della vetrata, strato rettilineo di materiale di tenuta resiliente preformato inserito tra la faccia esterna di una lastra di vetro e il pressore;
- guarnizione interna della vetrata, strato rettilineo di materiale di tenuta resiliente preformato inserito tra la faccia interna di una lastra di vetro e il pressore;
- pressore, profilo a pressione applicato ai montanti e ai traversi lungo tutto il perimetro di una lastra di vetro per vincolare e generalmente comprimere la guarnizione della vetrata;
- supporto vetro (manina), elemento di materiale idoneo, posto sotto il bordo inferiore di una lastra di vetro per garantire la tenuta del sistema;
- staffe di fissaggio, elementi che consentono l'assemblaggio del sistema di facciata, progettati per trasmettere alla struttura dell'edificio tutte le azioni agenti sulla facciata continua consentendo allo stesso tempo tutti i necessari movimenti;
- taglio termico, elemento a bassa conducibilità termica incorporato per ridurre il flusso di calore tra i materiali maggiormente conduttivi.

Il sistema di facciata continua in metallo può essere suddiviso in tre parti: testa, corpo e copertura. La testa è costituita da elementi metallici verticali, per lo più realizzati con profili di alluminio. La testa è il lato caldo del sistema di facciata continua. I pannelli di tamponamento sono installati nella parte del corpo. L'ultima è la parte di copertura e rappresenta il lato freddo della facciata continua. I pressori o i carter partecipano a questo lato. Le parti di testa e di copertura sono i lati più esposti della facciata continua. A causa di esigenze estetiche o tecniche, i componenti di queste due parti sono di diversi tipi nell'industria. Le interconnessioni tra le tre parti sono assicurate da elementi resistenti agli agenti atmosferici, come sigillanti e guarnizioni.

Rispetto ad altre chiusure esterne, le facciate continue in metallo e vetro sono composte da *pochi componenti strutturali*. La revisione dei componenti e delle funzioni è importante in relazione alle prestazioni dell'edificio. Non solo le scelte dei componenti della facciata continua sono importanti, ma anche lo schema di installazione del sistema e la successiva manutenzione da parte della direzione dell'edificio sono complementari alle prestazioni della facciata continua.

È necessario considerare diversi aspetti delle facciate continue in relazione alle prestazioni dell'edificio: parametri di progettazione, tipo di edificio, sistemi di connessione, componenti dei materiali, assemblaggio, manutenzione e retrofit. Nella trattazione tassonomica degli elementi che costituiscono i sistemi di facciata, infatti, un ruolo fondamentale per lo sviluppo della ricerca lo ricoprono le staffe di fissaggio/connessione (ulteriormente discusse all'interno del Capitolo 4 "*I sistemi di connessione flessibile*").

La facciata continua è connessa in modo univoco all'edificio con ancoraggi che sostengono i carichi della parete di chiusura. Gli ancoraggi sono *gettati in opera* o *forati* nel bordo del solaio. Se vengono annegati in un solaio in cemento, gli ancoraggi devono essere gettati molto prima dell'installazione della facciata continua e finiscono nel percorso critico della costruzione [CMHC, 2004]. La modalità di fissaggio dipende dalle campate, dal carico sismico o di vento e dalla temperatura.

La facciata continua può essere sostenuta da:

- ancoraggi in alluminio estruso;
- ancoraggi in lamiera d'acciaio o angolari in acciaio;
- bulloni in acciaio.

Poiché le condizioni perimetrali e il carico del vento e del sisma variano da progetto a progetto, gli schemi di ancoraggio devono essere valutati in base al progetto stesso. Infatti, soprattutto in riferimento al carico del vento e del sisma, che variano a seconda della posizione dell'edificio, tali schemi possono essere molto diversi, quindi la progettazione degli ancoraggi può variare anche nello stesso progetto.

Per comprendere i processi di produzione delle facciate continue è opportuno citare alcune definizioni. Si tratta di "fabbricazione", "assemblaggio", "vetratura" e "installazione".

La *fabbricazione* comprende tutte le operazioni di lavorazione, tra cui taglio, foratura, fresatura e punzonatura. Queste operazioni vengono eseguite sui componenti del telaio in alluminio estrusi. L'*assemblaggio* consiste nel fissare insieme i componenti del telaio in alluminio per creare un'intelaiatura che sostenga il rivestimento in vetro. I giunti del telaio devono essere ricoperti di sigillante per garantire la tenuta all'aria e all'acqua.

La *vetratura* prevede il fissaggio del sistema di tamponamento tra gli elementi verticali ed orizzontali dell'intelaiatura⁶³. Il processo di *installazione* combina l'assemblaggio e la vetratura, perché la maggior parte della produzione della parete avviene in loco⁶⁴. Nel caso degli Stick System la posa in opera avviene tramite due modalità principali: montaggio frontale e montaggio sequenziale. Le due modalità avvengono a seconda degli elementi di connessione, cavallotti, che sono stati progettati tra montante e traverso. Si evince come il sistema è costituito da materiali fondamentali, tipicamente elementi di intelaiatura in alluminio o acciaio e vetro, ed è completato da sigillanti, guarnizioni e prodotti isolanti. Su questa base si sono innestate una serie di piccole innovazioni che, senza modificare l'approccio complessivo, hanno consentito di esaltarne le prestazioni.

Particolarmente significativi, in questa ottica, sono stati da un lato il miglioramento qualitativo dei prodotti di base - estruso di alluminio e vetri. Dall'altro l'introduzione di soluzioni come il taglio termico, che risolveva il tipico problema di alta trasmittanza dell'alluminio⁶⁵, i giunti aperti, e la complessa vicenda delle facciate strutturali, che dopo un periodo di grande successo e interesse sono state oggetto di un parziale ripensamento dettato dal manifestarsi di una serie di problematiche, risolte con correttivi di tipo meccanico.

L'alluminio e l'acciaio rappresentano i due materiali maggiormente utilizzati per la realizzazione della parte strutturale delle facciate continue, per quanto riguarda sia il telaio che le parti di connessione.

In maggior misura per la realizzazione della struttura intelaiata è l'alluminio⁶⁶ che ricopre un ruolo fondamentale, le cui principali leghe utilizzate nel settore appartengono alla *serie 6000*, nello specifico la lega EN AW 6060 è quella impiegata per le lavorazioni di estrusione, quindi per montanti e traversi e i profilati a loro connessi: carter, pressori ecc. Un altro fronte in costante evoluzione è stato quello delle specchiature. Il vetro nell'architettura contemporanea rappresenta uno dei materiali più rappresentativi.

Nel corso degli anni, il suo ruolo si è progressivamente trasformato da semplice elemento di tamponamento a vero e proprio "dispositivo", in grado di garantire da un lato le funzioni essenziali, quali tenuta all'acqua e all'aria, l'abbattimento acustico, dall'altro di divenire elemento di controllo termico, generatore di energia, veicolo mediatico. La varietà dei vetri prodotti e introdotti - vetri colorati, bassoemissivi, riflettenti, ad alta resistenza meccanica e, più in generale, caratterizzati da prestazioni progettabili e calibrabili a seconda delle necessità, vetri termocromici e fotocromici - è vastissima, le cui declinazioni variano a seconda delle sue caratteristiche chimiche e meccaniche.

In sintesi, i sistemi di facciata continua risultano essere invariati nel tempo nella loro concezione di base, ma accompagnati da una spiccata evoluzione nella componentistica e nell'evoluzione progettuale [Lucarelli et al., 2012].

Seppur il vetro risulta essere le "discontinuità tecnologica più importante di tutta la storia dell'architettura" [Butera, 2007] alcuni aspetti critici risiedono nelle sue caratteristiche prestazionali, ovvero nel suo comportamento tipicamente fragile quando indotto a sollecitazioni estreme.

Infatti, in alcune località geografiche, gli eventi estremi richiedono una speciale considerazione progettuale per le forze d'impatto dovute ai detriti volanti nei venti di uragano o ai grandi movimenti interpiano causati da eventi sismici. Altre considerazioni particolari riguardano la riduzione della propagazione del fuoco da un piano all'altro o da un piano all'altro in corrispondenza del bordo del solaio strutturale e la prevenzione delle lesioni agli occupanti in caso di esplosione⁶⁷.

In conclusione, il momento congiunturale in cui ci troviamo ha visto i sistemi di facciata continua in notevole ripresa [Garzia, 2022] grazie alle sue funzioni estetiche, ambientali e strutturali, tuttavia, nella maggior parte dei casi gli attori coinvolti alla progettazione dei sistemi vetrati non sono coinvolti nella progettazione strutturale dell'edificio e ciò porta dei limiti notevoli per la realizzazione di tali sistemi. Di fatti, lo spessore del vetro, il materiale, la configurazione, l'intelaiatura e le connessioni devono essere progettati per gravità e carichi laterali ed eccezionali, es. vento e sisma. In riferimento a quest'ultimo all'interno del Capitolo 2 verranno trattate le osservazioni dei danni da terremoto dei sistemi di facciata.

1.5 Quadro di sintesi

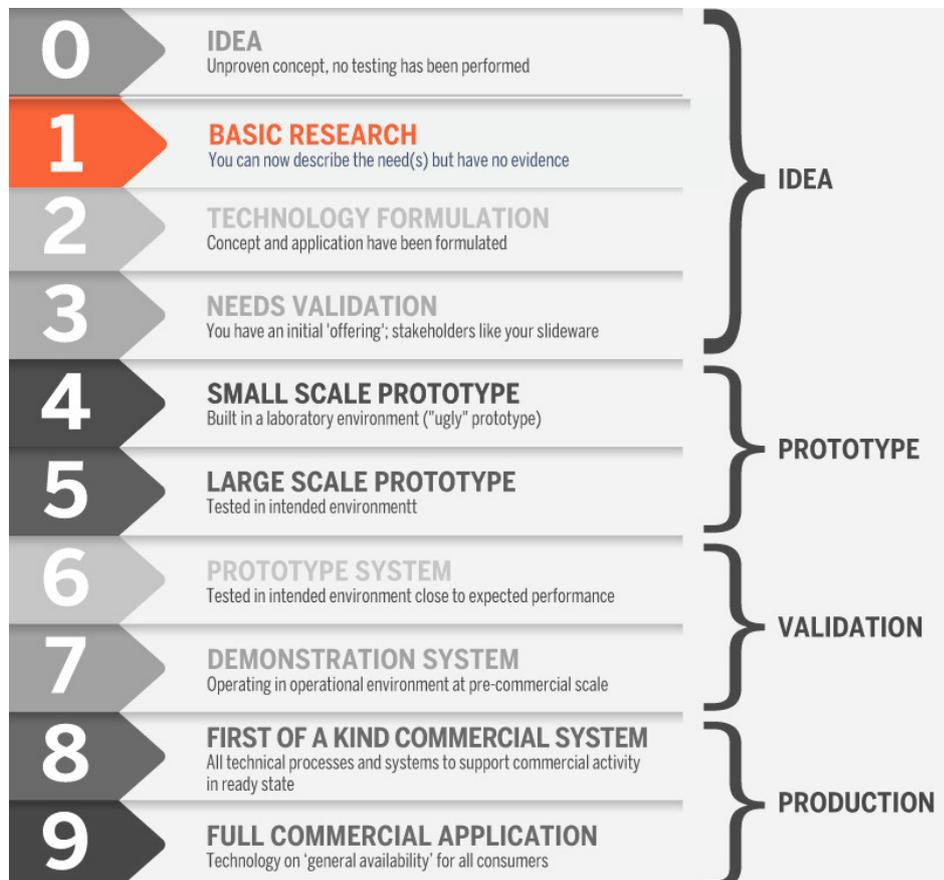


Fig. 7. Technologies Readiness Level TRL.

Volendo assumere la tesi dottorale come il percorso che ha portato all'evoluzione, nel senso più stretto, della Ricerca Industriale, attraverso un parallelismo che riecheggia il TRL Technology Readiness Level⁶⁸, si può definire il Capitolo 1 come il primo step dell'innovazione che si propone di mettere in atto: "*Osservazione dei principi fondamentali*".

Facendo un passo indietro, vengono riproposti, attraverso un quadro di sintesi gli aspetti salienti che hanno costituito questa prima trattazione, il cui carattere risiede nel delineare, attraverso livelli scalari dei macro-temi, una critical-review.

L'involucro edilizio è stato inteso nella sua accezione consolidata di frontiera, ovvero come un elemento che da un lato separa fisicamente l'ambiente esterno ed interno degli edifici, dall'altro ne è chiamato a dialogare. La sua funzione, infatti, è quella di mediare, separare e connettere l'interno con l'esterno, ma esso è anche un elemento ambientale che delimita e identifica gli spazi esterni circostanti, concludendo, dal punto di vista formale, l'organismo costruttivo e strutturale. Tematica chiave risulta l'involucro come parte dell'organismo architettonico che più di ogni altra reagisce oggi agli stimoli ambientali e ne assorbe i contenuti tecnologici e gli aspetti formali. Di fatti, la trasformazione nel tempo dei bisogni antropici, così come la variabilità delle condizioni al contorno, determinata da un ambiente costruito in mutamento a causa anche del frequente susseguirsi di fenomeni a carattere emergenziale, ha portato le prestazioni di base garantite dall'involucro ad evolversi in funzione di esigenze sempre più articolate, tra cui gestire gli effetti della risposta dinamica del contesto in cui si innesta il sistema, con particolare riferimento ai carichi sismici.

Da questi assunti derivano due quesiti:

- *quali sono le raccomandazioni in ambito normativo per la progettazione di un involucro edilizio antisismico?*

- *in che modo, in ambito accademico, l'involucro edilizio viene progettato quale elemento che è in grado di rispondere reattivamente ai carichi sismici?*

Rispetto al primo quesito – "*quali sono le raccomandazioni in ambito normativo per la progettazione di un involucro edilizio antisismico?*" – è necessario dichiarare che seppure dai diversi versanti della ricerca, l'involucro edilizio è considerato nella globalità delle parti che lo compongono (parete-copertura), in ambito normativo europeo, con il termine involucro edilizio si afferisce in maggior misura agli elementi di chiusura verticali. In questo senso il passaggio etimologico prestazionale dei sistemi di facciata è avvenuto menzionando le principali normative di settore in ambito comunitario, nazionale ed internazionale (UNI EN 13830, Eucodici, NTC18, ASCE 30-14), definendo le caratteristiche chiave che accompagnano i diversi attori nel processo progettuale dell'involucro edilizio. Nell'ultima parte del capitolo, è stata proposta la disamina dei sistemi di facciata continua attraverso componenti, elementi e materiali che la costituiscono, concentrandosi sulla tipologia Stick System o montanti e traversi. Nella trattazione tassonomica degli elementi che costituiscono i sistemi di facciata, infatti, un ruolo fondamentale per lo sviluppo della ricerca lo ricoprono le staffe di fissaggio/connessione e il comportamento fragile del vetro, aprendo la strada alla tematica della vulnerabilità sismica oggetto del seguente capitolo.

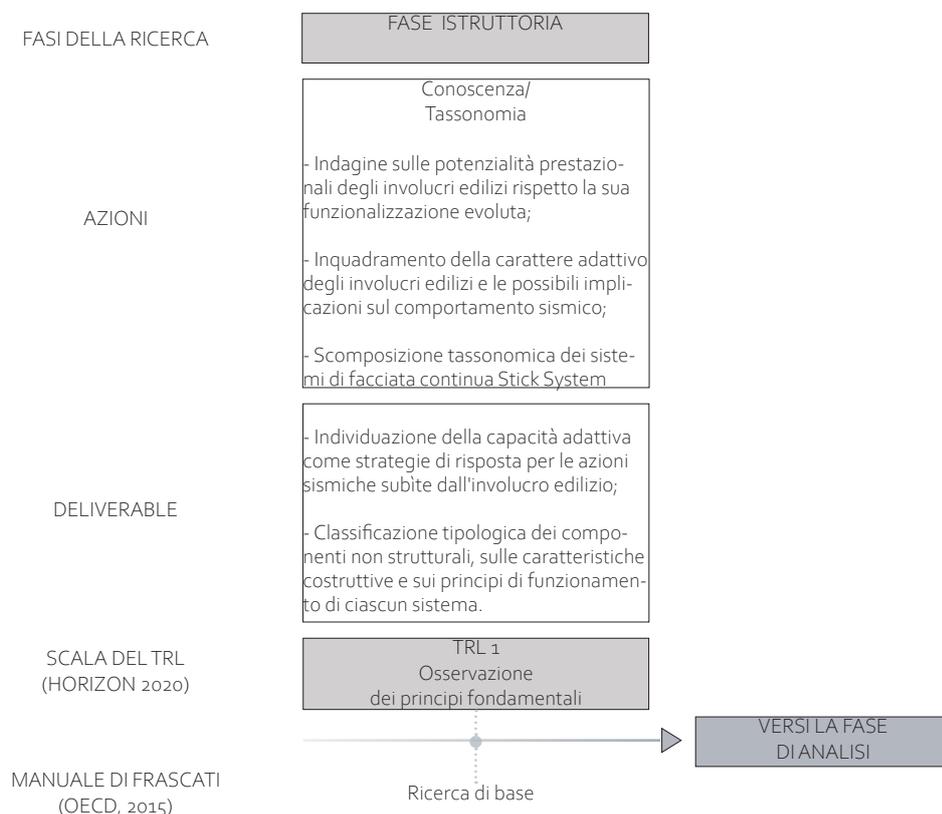
Rispetto al secondo quesito, – "*in che modo in ambito accademico l'involucro edilizio viene progettato quale elemento che è in grado di rispondere reattivamente ai carichi sismici?*" – due sono i riferimenti principali che convergono sulla stessa traiettoria. Il primo, derivante dal background scientifico dell'involucro edilizio, riguarda la capacità adattiva, intesa come la capacità di un sistema di cambiare forma, posizione, utilizzo o spazio.

L'attenzione è posta sull'evoluzione etimologica-funzionale-prestazionale dell'involucro edilizio, passando dal concetto di isolamento a quello di adattabilità, da "*funzione singola-comportamento singolo*" a "*multifunzione-integrazione*".

Nel settore della Ricerca e Sviluppo, infatti, si assiste non solo all'ampliamento delle tipologie di facciata ma, soprattutto, si registra uno straordinario incremento di innovazione sulle funzionalità e risposte attive dei componenti, orientato verso "superfici di involucro con

caratteristiche di adattabilità tali da rispondere in maniera efficiente al contesto dinamico e, allo stesso tempo, siano in grado di assorbire gli effetti da questo generati". Ma il concetto di "involucro adattivo" è per lo più legato alle prestazioni energetiche, agli aspetti del comfort termico, alla qualità dell'aria interna o alle prestazioni visive e acustiche. Tuttavia, nell'ultimo decennio, l'accezione di involucro adattivo si amplifica e si declina ulteriormente verso nuovi significati che comprendono la capacità dei sistemi di facciata di mutare la propria morfologia sostenendosi strutturalmente e non sovraccaricando la struttura primaria di supporto. Da questi assunti deriva il secondo riferimento. Proveniente dalla progettazione antisismica strutturale, il concetto di adattivo ritorna come elemento risolutivo della questione sismica. Diverse però sono le tecnologie con cui il carattere di adattività viene svolto per l'involucro energeticamente efficiente e l'involucro come membrana flessibile. Da un punto di vista strutturale, sotto l'azione di carichi eccezionali come impatti o pericoli in generale, gli involucri vetrati rappresentano un componente critico per gli edifici, a causa del comportamento tipicamente fragile e della limitata resistenza alla trazione delle lastre di vetro per cui vengono innestati nel sistema elementi quali attuatori e sensori in grado di rilevare e rispondere alle sollecitazioni esterne. Nell'ambito di efficientamento energetico il carattere di adattività viene in maggior misura rivolta alle potenzialità prestazionali dei vetri, grazie alle importanti innovazioni che hanno caratterizzato le ricerche degli ultimi decenni.

In apparente antitesi, i due quesiti sono chiamati a dialogare. Si evince come ad architetti e tecnologi sia richiesto un ampliamento delle competenze, non solo a ripensando le caratteristiche funzionali-prestazionali dei componenti che costituiscono l'involucro edilizio, ma modificando l'intero processo progettuale attraverso la contaminazione proveniente dal trasferimento tecnologico da altri settori di scienza e tecnica, proponendo un maggiore dialogo che risulti propositivo nel colmare i gap normativi.



Note

1. Gli obiettivi ultimi per il settore 2021-2027 sono facilmente individuabili e possono essere riassunti in:
- ridurre i consumi energetici degli edifici ed aumentare la quota di energie rinnovabili utilizzata per coprirli;
- ridurre l'impatto ambientale delle trasformazioni energetiche funzionali agli edifici;
- migliorare, nel rispetto degli obiettivi menzionati in precedenza, la qualità della vita degli occupanti sia dal punto di vista della salubrità degli ambienti che da quello del microclima.

Tratto da Programma Nazionale per la Ricerca 2021-2027 Grande Ambito Di Ricerca e Innovazione Clima, Energia, Mobilità Sostenibile.

2. Oggi è certamente matura la consapevolezza che le potenzialità strumentali e di processo connesse all'innovazione digitale e alla rivoluzione dell'informazione permettono di raggiungere risultati fino a qualche anno fa preclusi. Lo sviluppo e la diffusione delle tecnologie ICT consentono di disporre di immense potenzialità computazionali in grado di processare un'altrettanta enorme quantità di dati relativi contemporaneamente a processi ambientali, economici e sociali. In particolare, con riferimento al settore delle costruzioni, alle criticità proprie e alla correlata curva che descrive l'evolversi ed il peggiorare delle emergenze ambientali, [...] tra i pochi a non aver ancora innovato del tutto i propri processi di produzione – e le enormi opportunità connesse alle politiche attuative di Industria 4.0 e all'applicazione delle relative Tecnologie Abilitanti (Daniotti et al., 2020). Tratto da Azzalin, M. (2020). Istanze ambientali, cultura digitale, approccio manutentivo dalla ricerca gli strumenti operativi. In Perriccioli, M., Rigillo, M., Russo Ermolli, S., & Tucci, F. (a cura di) (2020). *Design in the digital age. Technology Nature Culture*, p. 104. Rimini: Maggioli Editore. ISBN: 978-88-916-4327-8.

3. Nel processo di ricerca e sperimentazione tecnologica-architettonica contemporanea, l'involucro si è lentamente evoluto da elemento-barriera prevalentemente protettivo in complesso sistema filtro selettivo e polivalente, in grado di – da una parte – di ottimizzare le interazioni tra microambiente interno e macroambiente esterno (e viceversa) al mutare delle diverse condizioni climatico-ambientali [...]; dall'altro, di rispondere sempre più spesso in senso "intelligente" agli stessi mutamenti. Tratto da Altomonte, S. (2005). *L'involucro architettonico come interfaccia dinamica*. Alinea Editrice, Firenze, p. 15.

4. Non si tratta dunque di porre l'involucro architettonico come elemento che impedisce uno "scambio dialettico" tra due opposte sponde, ma è necessario piuttosto concepire la frontiera come quella percepibile linea, materiale e immateriale, che separando unisce e definisce ambienti ed elementi differenti, mettendoli in relazione tra di loro. Tratto da Altomonte, S. (2005). *L'involucro architettonico come interfaccia dinamica*. Alinea Editrice, Firenze, p. 57.

5. L'involucro edilizio è costituito da tutte le unità tecnologiche ed elementi tecnici che morfologicamente e funzionalmente definiscono nelle tre direzioni il limite tra l'ambiente interno e l'ambiente esterno di un organismo edilizio, interagendo a sistema (insieme di elementi spaziali e unità ambientali, che devono garantire il soddisfacimento delle esigenze dell'utenza, e contesto ambientale, condizioni al contorno). Tratto da Milardi, M., Mandaglio, M., & Musarella, C. C. (2020). Involucro. In: Losasso, M., Lucarelli, M. T., Rigillo, M., & Valente, R. (2020). *Adattarsi al clima che cambia. Innovare la conoscenza per il progetto am-*

biennale, pp. 145–150. Rimini: Maggioli Editore. ISBN: 9788891643186.

6. La Gran Bretagna del XIX secolo è il luogo della Rivoluzione Industriale, durante la quale lo sviluppo della prefabbricazione e della produzione su larga scala, l'espansione di procedimenti meccanizzati, l'affermarsi di materiali quali ghisa, acciaio e vetro, hanno tra le naturali conseguenze la realizzazione di manufatti architettonici basati su tali tecniche e materiali. Nello stesso tempo, la scienza delle costruzioni diventa uno strumento pienamente a disposizione dei progettisti e questo permette il sovradimensionamento nelle costruzioni. La progettazione e costruzione di serre diventa un'occasione per applicare le tecniche costruttive contemporanee identificandosi come "strutture leggere" in metallo, rivestite in lastre di vetro, una sorta di antesignano delle facciate continue. Tratto da Rossetti, M. (2019). *L'involucro architettonico contemporaneo*. Rimini: Maggioli Editore, p. 18.

7. Realizzare organismi edilizi energeticamente efficienti, garantire il comfort degli utenti e di compatibilità ambientale sono strettamente legati all'innovazione del sistema involucro. Tratto da Wigginton, M., & Harris, J. (2013). *Intelligent skins*. Routledge.

8. L'architetto tedesco Thomas Herzog è stato uno dei primi a condurre delle sperimentazioni fin dall'inizio degli anni '70 sul tema dell'involucro quale membrana permeabile e selettiva; il centro della questione – sostiene Herzog – è la ricerca di un equilibrio nel rapporto tra uomo, habitat artificiale e ambiente esterno e questo equilibrio deve essere realizzato tramite quelle superfici [...] che costituiscono un'interfaccia dinamica. [...] lungo entrambe le interfacce, installiamo membrane artificiali per modulare il flusso di forze attraverso di esse. Tratto da Battisti, A. (2003). Intervista a Thomas Herzog. In: *The Plan. Architecture & Technologies in Detail*, n. 003.

9. La scelta di definire l'involucro come pelle nasce dall'analogia che si vuole creare tra questo elemento fisico e la pelle umana, che è il più esteso organo del corpo degli esseri viventi. 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 sua conformazione tecnologica più evoluta, riesce a regolare in modo attivo le dinamiche termico-funzionali che caratterizzano un edificio evoluto. Tratto da Milardi, M., Mandaglio, M., & Musarella, C. C. (2020). Involucro. In: Losasso, M., Lucarelli, M. T., Rigillo, M., & Valente, R. (2020). *Adattarsi al clima che cambia. Innovare la conoscenza per il progetto ambientale*, pp. 145–150. Rimini: Maggioli Editore. ISBN: 9788891643186.

10. Fino agli anni '50, le chiusure verticali rimangono degli efficienti dispositivi che rispondono bene a funzioni quali tenuta all'aria e all'acqua, la resistenza al vento, ecc. Ma è solo con il diffondersi delle politiche ambientaliste, preconizzate da alcuni lucidi e profetici contributi – Primavera silenziosa, di Rachel Carson, del 1962, I limiti dello sviluppo, di dieci anni più tardi o Gaia, del 1979, di James Lovelock – che si comincia a prendere coscienza dei problemi ambientalistici e viene svelato il drammatico impatto delle attività antropiche. Tratto da Rossetti, M. (2019). *L'involucro architettonico contemporaneo*, pp. 20-21. Rimini: Maggioli Editore.

11. Avere a disposizione una serie di criteri di tassonomia efficaci del funzionamento e del comportamento in uso dei materiali è un mezzo preliminare necessario per valutare i loro possibili scopi. Giglio, F. (2020) New

Functional Behaviours for Sustainable Building Skin Material Biometric Features for outer Envelope. In Perriccioli, M., Rigillo, M., Russo Ermolli, S., & Tucci, F. (a cura di) (2020). *Design in the digital age. Technology Nature Culture*, p. 276. Rimini: Maggioli Editore. ISBN: 978-88-916-4327-8.

12. Come indicato dalle normative di settore in campo nazionale e internazionale successivamente espresse, i sistemi di involucro non collaborano al supporto dei carichi dell'edificio; in tal senso essi gravano completamente su di esso ed è quindi fondamentale studiare in quale modo rispondano alle sollecitazioni imposte dall'esterno. Tratto da Rigone, P. (2014). *Progettazione e posa in opera di elementi di facciata* (Vol. 12). Maggioli editore.

13. Recenti analisi statistiche indicano che l'involucro edilizio è oggetto, direttamente e indirettamente, di circa il 70% dell'attività di normazione nel campo delle opere e dei prodotti per le costruzioni. Il dato è senza dubbio importante e singolare, ma, d'altra parte, trova una sua giustificazione nel fatto che oggi giorno, sia nel campo della nuova realizzazione come in quello della conservazione e ristrutturazione, l'industria delle costruzioni stia concentrando la maggior parte degli sforzi produttivi ed innovativi. Tratto da Rigone, P. (2015). *Facciate continue: il ruolo della normativa tecnica quale guida per la progettazione e la posa in opera*.

14. Con il termine di chiusura si definisce l'insieme delle unità tecnologiche ed elementi tecnici del sistema edilizio aventi la funzione di separare e di conformare gli spazi interni del sistema edilizio aventi funzione di separare e di conformare gli spazi interni del sistema edilizio stesso rispetto all'esterno". Tratto da UNI 8290-1:1981 + A122:1983: Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia.

15. La parete perimetrale verticale viene definita come la "classe di elementi tecnici con funzione principale di [...] regolare il passaggio di energia tra gli spazi interni ed esterni dell'organismo edilizio. La norma fornisce anche due diverse classificazioni, la prima di tipo funzionale, la seconda in base alla collocazione rispetto alla struttura portante. Tratto da UNI 8369-1:1988: Edilizia. Chiusure verticali. Classificazione e terminologia.

16. Parte dell'involucro edilizio realizzata con una struttura solitamente costituita da profili orizzontali e verticali, collegati insieme e ancora 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 esse, ma non contribuisce alla capacità portante o alla stabilità della struttura dell'edificio. Tratto da UNI EN 13830:2015: Facciate continue – Norma di prodotto.

17. L'asse portante dell'attività normativa europea è costituito dall'approccio "prestazionale", che ha come obiettivo quello di produrre norme che abbiano un contenuto esigenziale-prestazionale, al fine di permettere la progettazione e la costruzione di opere edilizie in grado di soddisfare i sette requisiti di "base" previsti dal CPR 305/2011. Il Regolamento Prodotti da Costruzione riguarda tutti i prodotti (materiali, manufatti, sistemi, ecc.) che sono realizzati per diventare parte permanente di opere di costruzione (edifici ed opere di ingegneria civile). Questi prodotti devono rispettare requisiti e prestazioni relazionate ai sette requisiti essenziali dell'opera da costruzione:

1. resistenza meccanica e stabilità;
2. sicurezza in caso di fuoco;
3. igiene, sicurezza e ambiente;
4. sicurezza in uso;

5. protezione contro il rumore;
6. risparmio energetico;
7. uso sostenibile delle risorse naturali per la realizzazione delle costruzioni.

Il settore dell'involucro non sfugge certo a tale approccio di metodo, anzi, risulta essere il campo più avanzato da questo punto di vista dato che, almeno per quanto riguarda il mondo dei serramenti e delle facciate. Tratto da Rigone, P. (2015). *Facciate continue: il ruolo della normativa tecnica quale guida per la progettazione e la posa in opera*.

18. Recenti studi hanno dimostrato come l'interruzione delle funzionalità di base dell'involucro edilizio in regime delle condizioni di servizio, legati al corretto uso dell'intero organismo, e le condizioni di sicurezza, legate alla sicurezza degli occupanti, implica un aumento della stima dei costi dell'intero ciclo di vita dell'edificio. Tratto da Rigone, P. (2015). *Facciate continue: il ruolo della normativa tecnica quale guida per la progettazione e la posa in opera*.

19. Penetrazione all'aria, assorbimento e penetrazione dell'acqua, penetrazione del vapore acqueo, asciugamento ed evaporazione, movimenti dovuti all'umidità, movimenti dovuti alle escursioni termiche, trasmissione termica, effetti delle alte e basse temperature, gelività, resistenza meccanica alla flessione e agli urti, resistenza meccanica intesa come capacità di ricevere e tenere sistemi di fissaggio, trasmissione acustica, effetti della luce solare, effetti del fuoco, effetti di agenti chimici, sicurezza e durabilità del componente o dei sistemi di componenti.

20. La norma contiene criteri, procedure e metodi per la verifica delle "caratteristiche essenziali" delle facciate, in particolare per quanto concerne il requisito di base BR4 "safety in use".

Per uniformarsi alle leggi e agli obblighi presenti nei diversi Stati Membri alcune caratteristiche essenziali sono state aggiunte rispetto alla precedente versione:

- Resistenza al carico della neve (per inclinazioni tra 0 e 60° rispetto all'orizzontale);
- Resistenza al sisma (espressa come sicurezza nell'impiego e funzionamento);
- Trasmissione laterale del rumore;
- Proprietà radiative delle superfici trasparenti e traslucide;
- Durabilità.

21. Le NTC 2008 trattano l'argomento degli elementi non strutturali al § 7.2.3 per ciò che concerne i "criteri di progettazione", al § 7.3.6.3 per quel che riguarda le "verifiche" e indirettamente al § 7.3.7.2 con riferimento alle "verifiche degli elementi strutturali in termini di contenimento del danno agli elementi non strutturali". Tratto da Pierini, C. (2018). Elementi costruttivi non strutturali negli edifici in C.A. in zona sismica. In *Ingenio*, p. 2.

22. Le NTC 2008 trattano l'argomento degli elementi non strutturali al § 7.2.3 per ciò che concerne i "criteri di progettazione", al § 7.3.6.3 per quel che riguarda le "verifiche" e indirettamente al § 7.3.7.2 con riferimento alle "verifiche degli elementi strutturali in termini di contenimento del danno agli elementi non strutturali". Tratto da Pierini, C. (2018). Elementi costruttivi non strutturali negli edifici in C.A. in zona sismica. In *Ingenio*, p. 2.

23. In particolar modo occorre porre l'accento sul problema della qualità del comfort e della salubrità degli ambienti di lavoro e di vita, inteso come un insieme di requisiti, funzionali ad un globale equilibrio del vivere e dell'abitare che devono essere soddisfatti. È ormai codificato che l'esigenza del benessere, quale termine

che sovrintende il controllo dei complessi fenomeni di interazione attraverso l'involucro, può essere studiata secondo diversi aspetti interrelati fra di loro; quali igrometrico, visivo, acustico e olfattivo. Tratto da Altomonte, S. (2005). *L'involucro architettonico come interfaccia dinamica*. Alinea Editrice, Firenze, pp. 66-67.

24. Il paradigma della firmitas vitruviana ha fissato nel tempo la percezione condivisa dell'architettura come stigma di persistenza e di radicamento, concepita come una struttura densa e rigida tradotta dalla massività dei materiali che la componevano. La ferma e rassicurante solidità del dimorare e stare in un luogo, la materia resistente alle variazioni, un'iconografia di "staticità" che supera anche la sua primaria accezione di sicurezza.

25. Il tema dell'immaterialità rappresenta uno spartiacque tra due differenti versanti: gli immateriali e i tettonici. L'attenzione viene qui focalizzata sulla prima categoria, gli immateriali, infatti, si rifanno alla poetica del "quasi nulla" di Mies Van Der Rohe ed ai gruppi avanguardisti degli anni Settanta. Più avanti architetti quali Toyo Ito, Rem Koolhaas e Bernard Tschumi propongono una spazialità fondata non più sulla opprimente materialità delle pareti, ma sul libero movimento dei corpi.

26. Nella definizione fornita dall'Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC nel Quinto Rapporto di Valutazione (WGII AR5) del 2014 l'adattamento è definito in termini generali come il processo di adeguamento al clima (in atto o prevedibile) e ai suoi effetti. Su questa linea si sono attestati da un lato gli indirizzi dell'Unione Europea (Commissione Europea, Strategia dell'UE di adattamento ai cambiamenti climatici, 2013; Conclusioni del Consiglio Europeo Una Strategia europea di Adattamento al Cambiamento Climatico, 2013), dall'altro quelli nazionali (MATTM, Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici SNAC, 2015; CMCC Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici PNACC, 2017 ancora in corso di approvazione). Va ricordata, inoltre, l'attività sul tema svolta negli ultimi anni da numerose Agenzie intergovernative e governative, tra cui spicca la European Environment Agency (EEA).

27. Behnam individua tre principali "modelli di controllo ambientale", a ciascuno dei quali può essere associata una tipologia di involucro edilizio con delle specifiche caratteristiche. Il primo modello è quello conservativo ed è caratterizzato da un tipo di controllo ambientale che utilizza grandi masse murarie con poche aperture per ridurre le dispersioni termiche nei climi freddi e, allo stesso tempo, per attenuare gli effetti di riscaldamento dovuti alla radiazione solare diretta nei climi (o periodi) caldi. Il secondo modello, definito come selettivo, è particolarmente adatto ai climi caldo-umidi ed è caratterizzato da principi generali analoghi a quello precedente, ma "adopera la struttura non solamente per conservare le condizioni ambientali desiderate, ma per far entrare dall'esterno queste condizioni". Il terzo modello, quello rigenerativo, caratterizza gli edifici tipici della tradizione costruttiva americana privi di pareti "massicce" in cui il controllo ambientale è affidato totalmente ai sistemi impiantistici, definiti appunto come "installazioni rigenerative" mentre l'involucro è inteso solo come una barriera in grado di limitare le interazioni tra interno ed esterno. Banham, R. (1969). *Architecture of the Well-tempered Environment*. Architectural Press, Londra.

28. Il principio di base utilizzato per la costruzione di un'architettura adattabile è il "principio della leggerezza", che si basa sull'uso ottimale del materiale e

della massa costruita. Tratto da Möller, E., & Nungesser, H. (2015, August). Adaptable Architecture by Frei Otto—a case study on the future viability of his visions and some forward ideas. In *Proceedings of IASS Annual Symposia* (Vol. 2015, No. 18, pp. 1-12). International Association for Shell and Spatial Structures (IASS).

29. Attuale paradigma progettuale orientato a prestazioni tecnologico-sostenibili con l'implementazione di materiali con proprietà reattive integrate. Shahin, H. S. M. (2019). Adaptive building envelopes of multistory buildings as an example of high-performance building skins. *Alexandria Engineering Journal*, 58(1), 345-352.

30. Ferguson et al. (2007) definiscono la flessibilità di un sistema come la semplicità dei suoi possibili cambiamenti. Secondo Olewnik et al. (2004), i sistemi flessibili eseguono adattamenti in tempo reale. Le loro prestazioni sono migliorate dalla loro adattabilità in ambienti prevedibili e sono robusti a causa di influenze imprevedibili. Tratto da Böke, J., Knaack, U., & Hemmerling, M. (2019). State-of-the-art of intelligent building envelopes in the context of intelligent technical systems. *Intelligent Buildings International*, 11(1), p. 12.

31. Questi argomenti sono discussi nell'ambito delle attività svolte dal 'Structural' Task Group (TG) of the European COST Action TU14_03 'Adaptive Facades Network' (2014–2018). L'azione COST europea è stata istituita nel 2014, dalla necessità di tenere conto degli aspetti strutturali quando si tratta di sviluppo, progettazione, test e standardizzazione di facciate adattive. Le principali attività dell'azione comprendono:

- Armonizzazione, condivisione e diffusione delle conoscenze tecnologiche tra centri di ricerca e tra centri di ricerca e industrie;
- Sviluppo di nuovi concetti, tecnologie e nuove combinazioni di tecnologie esistenti per le facciate adattive;
- Sviluppo di nuove conoscenze in merito a strumenti di valutazione e metodi di progettazione efficaci.

32. L'evento estremo è spesso associato al concetto di disastro, ma non sempre ne è la causa primaria: assume la caratteristica di hazard se esistono condizioni tali da trasformarlo in minaccia, dunque la pericolosità, spesso rappresentata come la probabilità del verificarsi di eventi o trend pericolosi moltiplicata per la magnitudo di quest'ultimi, ossia le conseguenze che si avrebbero se questi eventi si verificassero, relativamente ad eventi climatici e meteorologici è legata più alle peculiarità degli elementi e sistemi colpiti che non all'evento in sé (IPCC, 2018).

33. La vulnerabilità sismica degli elementi che compongono i sistemi di facciata viene discussa nel Capitolo 2 "La prestazione antisismica degli Involucri Contemporanei".

34. Componenti che modificano la geometria o le caratteristiche principali degli elementi o del sistema, ad esempio la rigidità o le dimensioni, per ottenere le prestazioni desiderate.

35. Componenti che rilevano i parametri mutevoli dell'ambiente e monitorano anche le prestazioni della struttura.

36. Le membrane statiche (passive) per sostenere i carichi di base del progetto e membrane dinamiche (attive) per estendere la capacità della struttura di resistere a carichi dinamici straordinari.

37. Ciò può avvenire nei seguenti modi:

1) manipolazione dei carichi esterni, cioè adattando la forma della struttura (sistemi passivi). In una facciata, questo potrebbe essere la rotazione degli elementi per ridurre al minimo l'esposizione al vento;
2) manipolare i parametri strutturali, cioè adattare le proprietà dei materiali o degli elementi, come la rigidità, la lunghezza o lo smorzamento, per influenzare le forze o le deformazioni interne (sistemi attivi). In una facciata, ciò potrebbe essere la regolazione della precompressione in risposta al carico del vento;
3) una combinazione di (1) e (2), dando luogo a sistemi ibridi. Tratto da Bedon, C., Honfi, D., Kozłowski, M., Vokáč Machalická, K., Santos, F., Wüest, T., ... & Vokáč, M. (2018). *Key structural aspects for adaptive facades-Activity progress from the EU-COST Action TU1403'Structural' Task Group*.

38. La modifica del sistema descrive il modo in cui avviene l'adattamento del sistema strutturale della facciata. La forma più comune è la modifica della geometria complessiva della facciata. Ciò può avvenire modificando la posizione e/o l'orientamento di alcuni (o di tutti) gli elementi attraverso la traslazione e la rotazione (sia nel piano che fuori dal piano). Potrebbe anche comportare la modifica della forma (distorsione) e/o del volume degli elementi. Inoltre, qualsiasi combinazione di questi elementi sarebbe teoricamente possibile.

39. Il sistema di attivazione si riferisce al modo in cui la risposta ai cambiamenti dell'ambiente viene avviata e controllata. Questo può essere fatto a livello di materiale, cioè utilizzando materiali che reagiscono ad alcuni tipi di esposizione. Queste soluzioni in genere non richiedono input esterni. Un'altra opzione comune è l'applicazione di attuatori meccanici, che in genere richiedono un apporto di energia, sotto forma di elettricità, energia idraulica o lavoro manuale. La terza opzione è l'uso di un sistema gonfiabile, che consente di modificare la forma e la rigidità della facciata utilizzando la pressione dell'aria.

40. Un ultimo aspetto importante da considerare è quello relativo alla situazione che innesca la risposta e porta al cambiamento del sistema adattivo. Questo concetto è strettamente legato a quello di facciata adattiva, in quanto la facciata stessa è l'elemento principale in grado di modificare la propria struttura per garantire le prestazioni richieste. Si possono distinguere due categorie specifiche, ovvero associate a:

- circostanze ordinarie/normali (ad esempio, autopeso, vento ordinario, temperatura, umidità, ecc.)
- situazioni straordinarie (ad esempio, pericoli naturali, incidenti, attacchi intenzionali, ecc.)

Nel primo caso, l'adattamento è tipicamente un processo più lento, la risposta è ben controllata e proporzionale al cambiamento per ottenere una prestazione ottimizzata. Nel secondo caso, un evento improvviso scatena una risposta immediata per mitigare le conseguenze devastanti dovute all'evento disastroso.

41. Arup in collaborazione con la Ellen McArthur Foundation ha condotto una ricerca sulla dismissione degli elementi che costituiscono i sistemi di facciata, operando una vera e propria autopsia, in cui sono state indagate le proprietà prestazionali degli elementi a fine vita.

42. Oggi l'industria delle costruzioni rappresenta il maggior contributore alla produzione di carbonio, con un aumento della domanda e dei costi energetici e la mancanza di soluzioni progettuali che rispondano sufficientemente ai cambiamenti del nostro ambiente; la progettazione adattiva è necessaria per superare que-

sta scoraggiante prospettiva del nostro futuro e permetterci di entrare in una nuova era di innovazione. Tratto da Dewidar, K.M., Mohamed, N.M., & Ashour, Y.S. (2013). *Living Skins: A New Concept of Self Active Building Envelope Regulating Systems*.

43. Se la progettazione della facciata è regolata da carichi variabili e soprattutto da situazioni di carico straordinarie, ad esempio forti tempeste di vento o terremoti, la struttura è spesso sovradimensionata per la maggior parte della vita utile (Senatore et al., 2011). Uno degli scopi principali dell'adattabilità strutturale è quello di ottimizzare la risposta strutturale, risparmiando così materiale e consumo energetico. Senatore et al. (2011, 2013, 2018) hanno sviluppato una metodologia per la progettazione di strutture adatte con un consumo energetico ottimizzato per l'intero ciclo di vita, considerando sia l'energia incorporata nei materiali sia l'energia necessaria per l'adattamento strutturale. Tratto da Bedon, C., Honfi, D., Kozłowski, M., Vokáč Machalická, K., Santos, F., Wüest, T., ... & Vokáč, M. (2018). *Key structural aspects for adaptive facades-Activity progress from the EU-COST Action TU1403'Structural' Task Group*.

44. I sistemi intelligenti sono un aspetto parziale della quarta rivoluzione industriale (industria 4.0). Gli aspetti di progettazione dei moderni sistemi intelligenti riflettono anche le attuali sfide socioeconomiche come la progettazione elettronica sostenibile, l'analisi del ciclo di vita o la progettazione per l'affidabilità. Secondo la strategia di implementazione della piattaforma industria 4.0, gli obiettivi sono l'aumento dell'efficienza produttiva, una maggiore flessibilità, l'implementazione di servizi a valle (Bitkom et al., 2015). I sistemi intelligenti sono dispositivi miniaturizzati che incorporano funzioni di rilevamento, attuazione e controllo per descrivere e analizzare una situazione e prendere decisioni in base ai dati disponibili in modo predittivo o adattivo, eseguendo così azioni intelligenti. Si tratta di uno sviluppo dei sistemi meccanici per quanto riguarda l'elaborazione delle informazioni (Dumitrescu, Jürgenhake e Gausemeier 2012). I sistemi intelligenti sono in grado di apprendere e di reagire in modo flessibile e intelligente a requisiti e condizioni mutevoli. La capacità di apprendimento si basa sulle informazioni elaborate e si svolge, secondo Dumitrescu, Jürgenhake e Gausemeier (2012), sui tre livelli di controllo cognitivo, associativo e non cognitivo. Un altro aspetto dei sistemi tecnici intelligenti è la loro stretta connessione in rete. Ciò è garantito da un sistema di comunicazione che consente lo scambio di informazioni tra i sistemi intelligenti e i loro sottosistemi. Tratto da Böke, J., Knaack, U., & Hemmerling, M. (2019). *State-of-the-art of intelligent building envelopes in the context of intelligent technical systems. Intelligent Buildings International*, 11(1), 27-45.

45. Il National Institute of Building Sciences definisce Smart Building l'edificio in grado di fornire "funzionalità avanzate attraverso una rete intelligente di dispositivi elettronici progettati per monitorare e controllare l'impianto meccanico, elettrico, di illuminazione e altri sistemi". Lo scopo quindi è di mirare alla potenzialità di un involucro edilizio intelligente nel quale la componente tecnologica avanzata lo rende capace di gestire e regolare i flussi energetici materiali e immateriali input/output provenienti dai vari contesti. Tratto da Buckman, A. H., Mayfield, M., & Beck, S. B. (2014). *What is a smart building?. Smart and Sustainable Built Environment*.

46. Intesa come "la capacità di un sistema di interpretare correttamente i dati esterni, di imparare da tali dati e di utilizzare tali apprendimenti per raggiungere obiettivi e compiti specifici attraverso un'applicazione flessibi-

le" (Kaplan e Haenlein, 2019). In termini più semplici, l'intelligenza artificiale può essere vista come un programma informatico che migliora sé stesso per eseguire un compito specifico, imparando dalle esperienze precedenti per ottenere risultati migliori a ogni iterazione. Tratto da Trabucchi, D. (2021). Will artificial intelligence kill architects? An insight on the architect job in the AI future. *TECHNE-Journal of Technology for Architecture and Environment*, 128-132.

47. Si tratta della trasformazione da produzione automatizzata a intelligente. Dopo la meccanizzazione, l'uso dell'elettricità e l'applicazione delle tecnologie informatiche, l'implementazione dei sistemi cyber-fisici (CPS) rappresenta il quarto grande passo di sviluppo nella produzione industriale (Kagermann, Wahlster e Helbig 2013). Oltre allo sviluppo di prodotti intelligenti, comporta la realizzazione e la messa in rete di macchine intelligenti (Weyer et al. 2015). Questi sistemi tecnici intelligenti sono destinati a rendere la produzione industriale più veloce, più efficiente e più flessibile. Tratto da Böke, J., Knaack, U., & Hemmerling, M. (2019). State-of-the-art of intelligent building envelopes in the context of intelligent technical systems. *Intelligent Buildings International*, 11(1), 27-45.

48. Parallelamente alla capacità di raggiungere la variabilità, la facciata deve "sapere" quando agire e perché. Nel corso del tempo, la pelle intelligente, con alcune delle caratteristiche dell'intelligenza umana, dovrebbe sviluppare una capacità di apprendimento, una capacità di regolazione e adattamento, per far fronte a nuove situazioni e una capacità di anticipare il futuro. I progressi della scienza cognitiva significano che la pelle intelligente può effettivamente sviluppare capacità di apprendere modelli di utilizzo e la risposta ottimale a specifiche condizioni climatiche. Questo fa parte dell'evoluzione dell'edificio intelligente. Tratto da Wigginton, M., & Harris, J. (ed.) (2013). *Intelligent skins*. Routledge.

49. In questo senso, è importante sottolineare che la letteratura più consolidata ed affidabile Report sui trend al 2050, mettono in luce quanto il ruolo dell'involucro edilizio risulti strategico. È infatti noto, quanto oggi l'innovata prassi edilizia si ponga come obiettivo quello di "realizzare" involucri adattivi intelligenti, anche in grado di fornire energia, attraverso l'adozione di sistemi smart, in cui involucro edilizio e impianti si integrano per garantire una gestione energetica ottimizzata.

50. Per anni, architetti hanno immaginato la possibilità che gli edifici del futuro possedessero involucri in grado di replicare la risposta adattiva della pelle alle mutevoli condizioni ambientali. Solo negli ultimi anni la ricerca tecnologica ha indagato nuove frontiere di sperimentazione in grado di riaffermare la qualità osmotica di un processo di scambio che riguarda flussi energetici passati e scambiati proprio attraverso l'involucro (Altomonte, 2005). Nuove ricerche, sono in corso, per dimostrare se la superficie di chiusura verticale possa essere dotata di sistemi progettati per garantire un dinamismo che permetta di controllare i flussi energetici come un organismo biologico. Tratto da 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), 65-76.

51. In base alle definizioni fornite da diversi autori (Bar Cohen, 2005; Hu, 2017; Pietroni, 2015; Vincent, Bogatyreva, Bogatyrev, Bowyer, & Pahl, 2006a, 2006b) sono apparsi una pluralità di nuovi concetti, insieme a nuove parole che mirano a identificare le fasi dell'evoluzio-

ne degli approcci scientifici nel campo. A partire dal caso del termine "Bionica" (dal greco βίος: vita, e il suffisso nics per elettronica), insieme ai sinonimi "Biomimesi" e "Biomimetica" (dal greco βίος: vita e μίμησις: imitazione) e anche "Biomimetica", che letteralmente significa "imitare la natura" e che evoca un adattamento o una derivazione dalla biologia. Come la Bionica - conosciuta da Jack Steele (Vincent et al., 2006a, 2006b) della US Air Force nel 1960 - si riferisce a un approccio tecnico che sviluppa nuove tecnologie applicando metodi biologici, così la Biomimetica trae ispirazione dalle strategie, dai processi, dalle logiche di funzionamento e dai modelli organizzativi dei sistemi biologici (Colombo, 2010; Gallo, 2018; Pietroni, 2015). Il termine Biomimetica è stato utilizzato per la prima volta nel 1969 da Otto Schmitt per definire "una disciplina che simula le strutture biologiche per realizzare prodotti più efficienti" (Schmitt, 1969). La stessa etimologia e lo stesso significato di Biomimetica sono quelli del termine Biomimetica, che, dopo essere apparso per la prima volta nel 1980, è stato reintrodotta dalla stessa J. Benyus, che è tuttora il principale riferimento scientifico della disciplina (Benyus, 1997). Tratto da Antonini, E., Boeri, A., & Giglio, F. (2022). Classification criteria and markers for biomimetic building envelope within circular economy principles: a critical review. *Architectural Engineering and Design Management*, 18(4), 387-409.

52. Essi definiscono le caratteristiche dei materiali intelligenti come: "immediatezza" (risposta in tempo reale), "transitorietà" (risposta a più di uno stato ambientale), "auto-attuazione" (intelligenza interna), "selettività" (una risposta è discreta e prevedibile). Tratto da Addington, M. (2008). *Smart Material*. In *Wörterbuch Design* (pp. 370-373). Birkhäuser Basel.

53. Nel capitolo 4 "I sistemi di connessione "flessibile" (gli elementi non-strutturali delle facciate continue)" è stata svolta un'indagine che mira anche ad approfondire la tematica dei materiali intelligenti con capacità adattive che cambiano forma, come compositi sintetici che hanno materia cinetica incorporata e come questi siano applicati per condizioni di carico estreme, conferendo notevoli vantaggi per la progettazione antisismica.

54. Sistema di gestione informativa che permette un maggior controllo del progetto lungo tutto il suo processo, dalla fase di concept, alla progettazione integrata, fino alla produzione di componenti necessari alla realizzazione dell'opera. Una definizione di BIM viene dall'NBIMS (National Building Information Modeling StandardTM).

55. I curtain wall – cioè le pareti costruite tra montanti in ferro o acciaio, le quali non portano altro peso che quello proprio – hanno soltanto lo spessore necessario a proteggere l'esterno dell'edificio e a sostenere le pareti superiori. Tratto da Fanelli, G., & Gargiani, R. (1998). *Storia dell'architettura contemporanea*. Bari: Laterza, p. 20.

56. Nel XIX secolo, a Chicago gli architetti e i costruttori cercarono di raggiungere altezze maggiori. In quel periodo, l'inizio dell'uso degli ascensori nelle costruzioni facilitò il raggiungimento di altezze maggiori. D'altra parte, con le pareti in muratura era difficile raggiungere altezze maggiori. Perché le pareti portanti in muratura dovevano essere spuntate alla base quando l'altezza dell'edificio aumentava. Questa condizione li ha costretti a costruire con la struttura a telaio e il suo corollario di facciate continue. In questo senso, il Reliance Building di Chicago è stato una pietra miliare per la tecnologia architettonica della Scuola di Chicago. L'edificio per uffici di quindici pia-

ni rappresentava una radicale reinterpretazione della facciata dell'edificio. La facciata a cortina era caratterizzata da ampie vetrate con strette finestre apribili. La combinazione delle colonne in acciaio, mascherate dal rivestimento esterno ha dato vita a un nuovo dialogo tra la struttura e la pelle dell'edificio. Tratto da Altunkeyik, E. (2019). *Curtain wall. Analysis of European office buildings with design and retrofitting strategies of the curtain wall*, p. 48.

57. Le facciate in vetro sono state notoriamente introdotte su larga scala con il Crystal Palace (1851) a Londra per la Grande Esposizione. Un ruolo fondamentale per l'evoluzione di tali sistemi vetrati, come sopraccitato, fu svolto dalla Scuola di Chigaco. Innegabile il riferimento alle opere degli architetti come William Le Baron Jenney, Louis Sullivan, lo studio Holabird & Roche. Da più versanti della ricerca si sostiene che la moderna facciata in vetro come la conosciamo, nota anche come facciata continua in vetro e metallo, sia apparsa per la prima volta con l'Hallidie Building di San Francisco nel 1918 (Yeomans, 2001). Tratto da 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*.

58. È interessante notare come già dagli anni '60, grazie alle architetture progettate da Mies Van Der Rohe, dopo la Seconda guerra mondiale, il curtain wall avesse raggiunto una sua maturità. Tratto da Rossetti (2019). *L'involucro architettonico contemporaneo*. Rimini: Maggioli Editore, p. 20.

59. Per quanto concerne la tematica delle "facciate continue" risulta necessario fare riferimento a diverse opere in cui sono state illustrate le tipologie di tali sistemi. Di seguito vengono riportati solo alcuni testi. Fitch, J. M. (1955). *The Curtain Wall*. Scientific American, 192(3), 44-49. Nistri, M. (2001). Sistemi di facciata: oltre la tradizione. Herzog, T., Krippner, R., & Lang, W. (2004). *Facade construction manual*. Walter de Gruyter. Klein, T. (2013). *Integral Facade Construction: Towards a new product architecture for curtain walls*. TU Delft. Committee on Curtain Wall Systems. (2013, November). *Curtain wall systems: a primer*. American Society of Civil Engineers. Rigone, P., & Bianchi, L. (2015). Le facciate continue: tipologie e aspetti legati al requisito di sicurezza all'uso. In Inarch Istituto Nazionale di Architettura-Statica delle facciate continue (pp. 1-298). Rossetti (2019). *L'involucro architettonico contemporaneo*. Rimini: Maggioli Editore.

60. Le facciate vetrate possono essere classificate in due tipi principali, vale a dire i sistemi di facciata vetrata con telaio e senza telaio. Il sistema di facciata continua unificato è un metodo di inquadramento più contemporaneo che comprende un pannello di vetro per la visione e un pannello di protezione montato in un telaio di alluminio prefabbricato e illustrato come unità completa. In alternativa, è disponibile un sistema di facciata vetrata senza telaio che fornisce trasparenza e un'estetica migliore, noto come sistema di facciata continua vetrata a fissaggio puntuale.

61. È con la scuola di Chicago che appare per la prima volta lo spandrel, inteso come il pannello cieco generalmente collocato in corrispondenza del solaio, sostenuto da una struttura metallica di estrusi di alluminio. I tamponamenti spandrel sono isolati per aumentare le performance termiche e opachi per nascondere il bordo della lastra e la cavità del soffitto. Una tipica tamponatura spandrel è costituita da un isolante aderente a una lastra di acciaio zincato, chiamata backpan o lamina posteriore, un isolante

prefabbricato aderente a una lamina di alluminio, all'interno di una singola finestra o di un'unità di vetro isolante (IGU). Il backpan o lamina è la barriera all'aria e al vapore che impedisce all'aria e all'acqua di infiltrarsi all'interno. Tratto da Morris, F. A., (2013) *Definition and Types of Curtain Walls*, in: Committee on Curtain Wall Systems. (2013, November). *Curtain wall systems: a primer*. American Society of Civil Engineers, pp. 4-5.

62. La sua funzione principale è quella di separare e moderare l'ambiente interno dell'edificio. Come separatore ambientale, deve tenere fuori l'aria e l'acqua; ridurre la perdita di calore con il freddo e il guadagno di calore solare con il caldo; sostenere in modo sicuro i carichi del vento, che diventano significativi nei grattacieli; assecondare i movimenti termici dovuti alle fluttuazioni di temperatura durante il giorno e ai cambi di stagione; assecondare i movimenti tra i piani dell'edificio causati da vento, carichi vivi e sismici. Tratto da Committee on Curtain Wall Systems. (2013, November). *Curtain wall systems: a primer*. American Society of Civil Engineers.

63. Il metodo di base per progettare la connessione è l'uso di piastre di pressione, pressori. Il vetro è tenuto in posizione da una piastra di pressione metallica all'esterno, fissata ai componenti metallici del telaio all'interno. Per tenere in posizione i vetri si possono utilizzare anche profili in gomma sintetica. Per ridurre al minimo la parte esterna del telaio per motivi estetici, sono state sviluppate le vetrate strutturali sigillate. Gli adesivi siliconici permettono al vetro di aderire strutturalmente direttamente al telaio interno. Il silicone sostiene parte del peso del vetro stesso e trasferisce la pressione del vento al telaio. Spesso la facciata continua è una combinazione di diversi tipi di sistemi, combinati per esprimere l'intento architettonico e definire esteticamente il profilo dell'edificio. Gli schemi di sistema possono essere una facciata interamente, una facciata opaca o una combinazione di schemi a seconda dell'intento dell'edificio. Tratto da 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*.

64. Risulta necessario considerare che il principale svantaggio dei sistemi di facciata montanti e traversi è che l'installazione (montaggio e vetratura) avviene all'aperto, in piena esposizione alle intemperie. I sigillanti sono un componente importante delle facciate continue che impediscono l'infiltrazione di aria e acqua. La durata dei sigillanti dipende dalla buona adesione alle superfici dei giunti che devono sigillare, e una buona adesione richiede superfici dei giunti pulite e asciutte, che possono essere difficili da ottenere in condizioni climatiche variabili all'esterno. Una temperatura e un'umidità regolari, come quelle di un ambiente interno, favoriscono un'applicazione più affidabile del sigillante.

65. Poiché l'alluminio è altamente conduttivo, le performance termiche si ottengono separando gli estrusi di alluminio interni da quelli esterni con dei tagli termici. Questi sono realizzati con materiali plastici, come il PVC o il nylon (poliammide), per migliorare le prestazioni termiche separando fisicamente gli estrusi di alluminio altamente conduttivi.

66. La valutazione della conformità delle strutture in acciaio e alluminio è regolamentata dalle norme UNI EN 1090:2012, suddivise in quattro parti. Per le strutture in alluminio è necessario riferirsi all'Eurocodice 9, suddiviso a sua volta in cinque parti, diversamente per la normazione sulle leghe dell'alluminio ci si può riferire

re alle UNI EN 573 e UNI EN 755.

67. All'interno della Guida per la determinazione dei "Requisiti di sicurezza antincendio delle facciate degli edifici" emanata dal Ministero dell'interno, Dipartimento dei Vigili del Fuoco, del Soccorso Pubblico e della Difesa Civile, emanata nel 2010 e aggiornata nel 2013 determina alcuni aspetti necessari e sufficienti per la fase progettuale dei sistemi di facciata continua in caso di sicurezza al fuoco.

68. L'innovazione delle tecniche costruttive spinge produttori industriali ed enti pubblici a collaborare, spesso servendosi di finanziamenti emessi da quest'ultimi e di coloro che svolgono le attività di ricerca e sviluppo. L'obiettivo è di incrementare le performance dei componenti edilizi per l'involucro architettonico, attraverso un glossario comune che sia in grado di fornire termini dichiarati e definiti e favorire la disseminazione tra i diversi paesi con lingue diverse. Inoltre, queste innovazioni devono essere di fatto "misurate". Un importante strumento – sviluppato originariamente dalla NASA ed emesso per la prima volta dalla Commissione Europea nel Programma Horizon 2020 – è, in questo senso, il Technology Readiness Level TRL. Questa metodologia misura il grado di "maturità" tecnologica attraverso una scala di valori – da 1 a 9 – tangibili e intangibili ed è fortemente connessa all'indice di rendimento nel caso delle aziende. Questa digressione finale risulta strategica per comprendere la logica secondo cui l'innovazione della ricerca viene misurata attraverso un parallelismo in cui ogni capitolo delle tesi di dottorato viene assimilato al livello corrispondente nella scala del TRL.

Riferimenti bibliografici

- Arnold, C. (2009). Building Envelope Design Guide—Introduction. *Whole Building Design Guide*.
- Addington, M. (2008). Smart Material. *Wörterbuch Design*, 370-373. Birkhäuser Basel.
- Addington, M. (2009). Contingent behaviours. *Architectural Design*, 79(3), 12-17.
- Addington, D. M., & Schodek, D. L. (2012). *Smart materials and new technologies: for the architecture and design professions*. Routledge.
- Aelenei, D., Aelenei, L., & Vieira, C. P. (2016). Adaptive Façade: concept, applications, research questions. *Energy Procedia*, 91, 269-275.
- Aelenei, L. E., Aelenei, D., Romano, R., Mazzucchelli, E. S., Brzezicki, M., & Rico-Martinez, J. M. (2018). Case studies: Adaptive facade network. *Case studies: adaptive facade network*.
- Altomonte, S. (2005). *L'involucro architettonico come interfaccia dinamica*. Alinea Editrice, Firenze.
- Altunkeyik, E. (2019). *Curtain wall. Analysis of European office buildings with design and retrofitting strategies of the curtain wall*.
- American Society of Civil Engineering. (2000). Guideline for Condition Assessment of the Building Envelope. American Society of Civil Engineers.
- American Society of Civil Engineering. (2014). Guideline for Condition Assessment of the Building Envelope. American Society of Civil Engineers.
- Antonini, E., Boeri, A., Gaspari, J., & Longo, D. (2014). Innovazione di prodotto: esperienze e prospettive di collaborazione tra Università e PMI. *TECHNE: Journal of Technology for Architecture & Environment*, 7.
- Antonini, E., Boeri, A., & Giglio, F. (2022). Classification criteria and markers for biomimetic building envelope within circular economy principles: a critical review. *Architectural Engineering and Design Management*, 18(4), 387-409.
- Arnesano, M., Bueno, B., Pracucci, A., Magnagni, S., Casadei, O., & Revel, G. M. (2019). Sensors and control solutions for Smart-IoT façade modules. In *2019 IEEE International Symposium on Measurements & Networking (M&N)*, 1-6. IEEE.
- Atkin, B. (1989). *Intelligent buildings*.
- Attia, S., Favoino, F., Loonen, R., Petrovski, A., & Monge-Barrio, A. (2015, November). Adaptive façades system assessment: An initial review. In *10th Conference on Advanced Building Skins*. 978-3-98120538-1, Munich, Germany.
- Attia, S., Bilir, S., Safy, T., Struck, C., Loonen, R., & Goia, F. (2018a). Current trends and future challenges in the performance assessment of adaptive façade systems. *Energy and Buildings*, 179, 165-182.
- Attia, S. (2018b). Challenges and Future Directions of Smart Sensing and Control Technology for Adaptive Façades Monitoring. In *COST Action TU1403—Adaptive Facades Network Final Conference*. Lucerne University of Applied Sciences and Arts, Lucerne, Switzerland.
- Attia, S. (2019). *Adaptive Facades Performance Assessment, interviews with facade experts*.
- Azzalin, M. (2020). Istanze ambientali, cultura digitale, approccio manutentivo dalla ricerca gli strumenti operativi. In Perriccioli, M., Rigillo, M., Russo Ermolli, S., & Tucci, F. (a cura di) (2020). *Design in the digital age. Technology Nature Culture*. Rimini: Maggioli Editore. ISBN: 978-88-916-4327-8.
- Banham, R. (1969). *Architecture of the Well-tempered Environment*. Architectural Press, Londra.
- Bar-Cohen, Y. (2005). *Biomimetics: biologically inspired technologies*. CRC press.
- Battisti, A. (2003). Intervista a Thomas Herzog. In: *The Plan. Architecture & Technologies in Detail*, n. 003.
- Bedon, C., Marcin, K., Daniel, H., Klara, M., Martina, E., Filipe, S., ... & Christian, L. (2017). Evaluating the structural performance of adaptive facades: general rules and guidelines for classification, experimental testing and numerical modeling. *Next facades-COST Action TU1403 Adaptive Facades Network Mid Term Conference*, 98-99. Philipp Lionel Molter, Moritz Mungenast, Matej Banozic, Oliver Englhardt, Tillmann Klein.
- Bedon, C., Honfi, D., Kozłowski, M., Vokáč Machalická, K., Santos, F., Wüest, T., ... & Vokáč, M. (2018). *Key structural aspects for adaptive facades-Activity progress from the EU-COST Action TU1403 'Structural' Task Group*.
- Bedon, C., Honfi, D., Machalická, K. V., Eliášová, M., Vokáč, M., Kozłowski, M., ... & Portal, N. W. (2019). Structural characterisation of adaptive facades in Europe—Part I: Insight on classification rules, performance metrics and design methods. *Journal of Building Engineering*, 25, 100721.
- Beesley, P., Hirose, S., & Ruxton, J. (2006). *Toward responsive architectures*.

- Benyus, J. M. (1997). *Biomimicry: Innovation inspired by nature*.
- Bitkom E. V., VDMA, & V., ZVEI E. V. (2015). Umsetzungsstrategie Industrie 4.0: Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0, S. 8. https://www.its-owl.de/fileadmin/PDF/Industrie_4.0/2015-04-10_Umsetzungsstrategie_Industrie_4.0_Plattform_Industrie_4.0.pdf (2015).
- Bilir, S., & Attia, S. (2018, November). Performance Evaluation of Adaptive Façades: A case study with electrochromic glazing. In *COST Action TU1403 Adaptive Facades Conference*. Lucerne University of Applied Sciences and Arts, Luzern, Switzerland.
- Böke, J., Knaack, U., & Hemmerling, M. (2019). State-of-the-art of intelligent building envelopes in the context of intelligent technical systems. *Intelligent Buildings International*, 11(1), 27-45.
- Buckman, A. H., Mayfield, M., & Beck, S. B. (2014). *What is a smart building?. Smart and Sustainable Built Environment*.
- Busa, L. (2006). Tecnologie di involucro. *Tecnologie di involucro*, 1000-1007.
- Butera, F. (2004). *Dalla caverna alla casa ecologica. Storia del comfort e dell'energia* (pp. 1-254). Edizioni ambiente.
- CMHC. (2004). *Glass and Metal Curtain Walls: Best Practice Guide Building Technology*. Canada: CMHC.
- Colombo, B. (2008). *Bionic Design, lo sviluppo del prodotto industriale attraverso lo studio della Natura*. Aracne editrice Srl.
- Committee on Curtain Wall Systems. (2013). *Curtain wall systems: a primer*. American Society of Civil Engineers.
- Compagno, A. (1999). *Intelligent glass facades. Current trends in facade construction; Intelligente Glasfassaden*. Aktuelle Trends im Fassadenbau. Fassade-Facade.
- 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.
- Corrado, V. F. (2020). Proceedings of Building Simulation 2019. *Proceeding of 16th Conference of IBPSA International Building Performance Simulation Association*, Rome, Italy, 2-4 September 2019.
- Croce, S., & Poli, T. (2013). Transparency. Facciate in vetro tra architettura e sperimentazione. *Il Sole 24 Ore*.
- Daniotti, B., Gianinetto, M., & Della Torre, S. (2020). *Digital transformation of the design, construction and management processes of the built environment* (p. 400). Springer Nature.
- Dewidar, Y., Mohamed, N., Ashour, Y., Dewidar, K. M., Mohamed, N. M., & Ashour, Y. S. (2013). Living skins: A new concept of self-active building envelope regulating systems. *Advancing the green agenda; technology, practices and policies conference-BUID* 1-8.
- Drossel, W. G., Kunze, H., Bucht, A., Weisheit, L., & Pagel, K. (2015). Smart3-smart materials for smart applications. *Procedia Cirp*, 36, 211-216.
- Dumitrescu, R., Jürgenhake, C., & Gausemeier, J. (2012). Intelligent Technical Systems OstWestfalenLippe. *Proceedings of the 1st Joint International Symposium on System-integrated Intelligence*, Hannover, Germany, 27-29.
- Fanelli, G., & Gargiani, R. (1998). *Storia dell'architettura contemporanea*. Bari: Laterza.
- Favoino, F., & Overend, M. (2015). A simulation framework for the evaluation of next generation Responsive Building Envelope technologies. *Energy Procedia*, 78, 2602-2607.
- Feigh, K. M., Dorneich, M. C., & Hayes, C. C. (2012). Toward a characterization of adaptive systems: A framework for researchers and system designers. *Human factors*, 54(6), 1008-1024.
- Ferguson, S., Siddiqi, A., Lewis, K., & de Weck, O. L. (2007). Flexible and reconfigurable systems: Nomenclature and review. In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 48078, 249-263.
- Fitch, J. M. (1955). The Curtain Wall. *Scientific American*, 192(3), 44-49.
- Floridi, L. (2014). *The fourth revolution: How the infosphere is reshaping human reality*. OUP Oxford.
- Fox, M. (Ed.). (2016). *Interactive architecture: adaptive world*. Chronicle Books.
- Gallo, M. (2018). *Biomimicry: "Learning from nature for sustainable solutions"*.
- Garzia, C. (a cura di), (2022). *Rapporto sul mercato italiano dell'involucro edilizio. Il mercato dei serramenti e delle facciate continue nell'edilizia per il 2022 e proiezioni 2023*.
- Giglio, F. (Ed.). (2011). *Tecniche materiali progetto: Declinazioni di innovazione*. Gangemi Editore spa.

- Giglio, F. (2018). Materia è progetto. *TECHNE: Journal of Technology for Architecture & Environment*, 16, 337-338.
- Giglio, F. (2020) New Functional Behaviours for Sustainable Building Skin Material Biometric Features for outer Envelope. In Perriccioli, M., Rigillo, M., Russo Ermolli, S., & Tucci, F. (a cura di) (2020). *Design in the digital age. Technology Nature Culture*, 276-278. Rimini: Maggioli Editore. ISBN: 978-88-916-4327-8.
- Goia, F., Perino, M., Serra, V., & Zanghirella, F. (2010). Towards an active, responsive, and solar building envelope. *Journal of Green Building*, 5(4), 121-136.
- Gregory, D.P. (1986). *Adaptive Building Envelopes*. Bracknell UK: BSRIA-TN-3/86.
- Hartkopf, V., & Loftness, V. (1999). *Global relevance of total building performance*. *Automation in construction*, 8(4), 377-393.
- Herzog, T. (1984). *Habiller de verre et de bois*. Losanna: Presses polytechniques Romandes.
- Herzog, T., Krippner, R., & Lang, W. (ed.) (2012). *Facade construction manual*. Walter de Gruyter.
- Hu, M. (2017). The Art of performance-driven design—Biomimicry and structure. *Proceedings of the Building Technology Educators' Society*, 295-303.
- Iommi, M. (2018). The mediterranean smart adaptive wall. An experimental design of a smart and adaptive facade module for the mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 158, 1450-1460.
- Jang, S. Y., Lee, S., & Kim, S. A. (2013, September). Collaborative responsive facade design using sensor and actuator network. In *International Conference on Cooperative Design, Visualization and Engineering*, 11-18. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Jencks, C. (2013). Nonlinear Architecture (1997). *The Digital Turn in Architecture 1992–2012*, 80-107.
- Kagermann, H., W. Wahlster, and J. Helbig. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Acatech – *National Academy of Science and Engineering*.
- Kaplan, A., & Haenlein, M. (2019). Siri, Siri, in my hand: Who's the fairest in the land? On the interpretations, illustrations, and implications of artificial intelligence. *Business Horizons*, 62(1), 15-25.
- Khoraskani, R. A. (2015). *Advanced connection systems for architectural glazing*. Springer International Publishing.
- Klein, T. (2013). *Integral Facade Construction: Towards a new product architecture for curtain walls*. TU Delft.
- Klooster, T. (2009). Smart surfaces and their application in architecture and design. In *Smart Surfaces and their Application in Architecture and Design*. Birkhäuser.
- Kormaníková, L., Kormaníková, E., & Katunský, D. (2017). Shape design and analysis of adaptive structures. *Procedia Engineering*, 190, 7-14.
- Knaack, U., Klein, T., Bilow, M., & Auer, T. (2014). *Façades: principles of construction*. Birkhäuser.
- Kronenburg, R. (2007). *Flexible: architecture that responds to change*. London: Laurence King.
- 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, 483-493.
- Lucarelli, M. T., Mandaglio, M., & Pennestrì, D. (2012). *The building envelope between process and product innovation*. Franco Angeli.
- 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.
- Mandaglio, M. (2019). Chameleon Building. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 296(1). IOP Publishing.
- 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. (2018). L'involucro di edifici complessi: aspetti progettuali e costruttivi. *Modulo, Voi*, 415, 78-83.
- Milardi, M. (2017). Adaptive models for the energy efficiency of building envelopes. *Journal of Technology Innovations in Renewable Energy*, 6(4), 108-117.
- Milardi, M., & Mandaglio, M. (2019). Indicatori e criteri di progettazione adattiva dell'ambiente costruito resiliente in area mediterranea per la sfida dei cambiamenti climatici. *ArchistoR*, 6(12), 688-697.
- Milardi, M., Mandaglio, M., & Musarella, C. C. (2020) Involucro. in: Losasso M Lucarelli Mt Rigillo M Valente R, *Adattarsi al clima che cambia. Innovare la conoscenza per il progetto ambientale*, Maggioli Editore, Rimini - Ita, 2020,

ISBN: 9788891643186

Milardi, M., & Mandaglio, M. (2020). Architettura e biomimesi: la natura come risorsa per il progetto. In Perriccioli, M., Rigillo, M., Russo Ermolli, S., & Tucci, F. (a cura di) (2020). *Design in the digital age. Technology Nature Culture*, 346-349. Rimini: Maggioli Editore. ISBN: 978-88-916-4327-8.

Modin, H. (2014). *Adaptive building envelopes* (Master's thesis).

Möller, E., & Nungesser, H. (2015). Adaptable Architecture by Frei Otto—a case study on the future viability of his visions and some forward ideas. In *Proceedings of IASS Annual Symposia 2015(18)*, 1-12. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS).

Moloney, J. (2011). *Designing kinetics for architectural facades: state change*. Routledge.

Morales-Beltran, M., & Teuffel, P. (2013). Towards smart building structures: adaptive structures in earthquake and wind loading control response—a review. *Intelligent Buildings International*, 5(2), 83-100.

Morris, F. A., (2013) Definition and Types of Curtain Walls, in: Committee on Curtain Wall Systems. (2013, November). *Curtain wall systems: a primer*. American Society of Civil Engineers, 4-5.

Nastri, M. (2001). *Sistemi di facciata: oltre la tradizione*.

Nastri, M. (2008). *Involucro e architettura*. Rimini: Maggioli Editore.

Nastri, M. (2020). *Alperia Tower. Tecnologie dell'involucro e interazione percettiva delle membrane*.

OECD-IEA (2013), Technology Roadmap. Energy efficiency building envelopes, Paris: International Energy Agency IEA, OECD-IEA.

Olewnik, A., Brauen, T., Ferguson, S., & Lewis, K. (2004). A framework for flexible systems and its implementation in multiattribute decision making. *J. Mech. Des.*, 126(3), 412-419.

Otto, F., & Rasch, B. (1995). *Finding form*. Axel Menges.

Park, C. S., Augenbroe, G., Sadegh, N., Thitisawat, M., & Messadi, T. (2004). Real-time optimization of a double-skin facade based on lumped modeling and occupant preference. *Building and Environment*, 39(8), 939-948.

Pevsner, N., Fleming, J., & Honour, H. (1981). *Dizionario di Architettura*. Torino: Einaudi.

Peretti, G. (1997). *Verso l'ecotecnologia in architettura: un percorso attraverso la tecnologia dell'architettura*. Milano: BE-MA.

Pierini, C. (2018). Elementi costruttivi non strutturali negli edifici in C.A. in zona sismica. In *Ingenio*, p. 2.

Pietroni, L. (2015). Bio-Inspired Design. La Biomimesi come promettente prospettiva di ricerca per un design sostenibile. *Scienze e Ricerche*, 4, 18-20.

Programma Nazionale per la Ricerca 2021-2027 GRANDE AMBITO DI RICERCA E INNOVAZIONE CLIMA, ENERGIA, MOBILITÀ SOSTENIBILE.

Regolamento (UE) n. 305/2011: Prodotti da Costruzione

Rigone, P. (2014). *Progettazione e posa in opera di elementi di facciata* (Vol. 12). Maggioli editore.

Rigone, P. (2015). *Facciate continue: il ruolo della normativa tecnica quale guida per la progettazione e la posa in opera*.

Rigone, P., & Bianchi, L. (2015). Le facciate continue: tipologie e aspetti legati al requisito di sicurezza all'uso. In *Inarch Istituto Nazionale di Architettura-Statica delle facciate continue*, 1-298.

Rizor, A. L., & Corn, A. (2020), Design Criteria and Solutions to Common Issues in Building Envelope Design. *Building Science and the Physics of Building Enclosure Performance*, DJ Lemieux and J. Keegan, Eds. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 195-210.

Rodonò, G., Monteleone, A., & Sapienza, V. (2021). Novel component for smart sustainable. *Building Envelopes. TECHNÉ-Journal of Technology for Architecture and Environment*, 144-148.

Romano, R. (2011). *Smart Skin Envelope: Integrazione architettonica di tecnologie dinamiche e innovative per il risparmio energetico* (p. 330). Firenze University Press.

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), 65-76.

Rossetti, M., & Antoniol, E. (2013). BIM, Building Information Modeling. *Rivista tecnologia. Software di progettazione e involucro*.

Rossetti, M. (2019). *L'involucro architettonico contemporaneo*. Rimini: Maggioli Editore.

- Sanders R.M. (2006). Curtain Walls: Not Just Another Pretty Façade. *Hoffman Architects*, 1, 23(1).
- Schmid, F. C., & Marinitsch, S. (2016, October). Methods and Technologies for Advanced Building Skin Design. In *Proceedings of the Advanced Building Skins Conference Proceedings*, Bern, Switzerland, 10-11.
- Schmitt, O. (1969). Some interesting and useful biomimetic transforms. *Third International Biophysics Congress*.
- Schumacher, M., Schaeffer, O., & Vogt, M. M. (2012). *Move: architecture in motion-dynamic components and elements*. Walter de Gruyter.
- Senatore, G., Duffour, P., Hanna, S., Labbé, F., & Winslow, P. (2011). Adaptive structures for whole-life energy savings. *Journal of the international association for shell and spatial structures*, 52(4), 233-240.
- Senatore, G., Duffour, P., Winslow, P., Hanna, S., & Wise, C. (2013). Designing adaptive structures for whole life energy savings. *International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)*, 52, 2105-2110.
- Senatore, G., Duffour, P., Winslow, P., & Wise, C. (2017). Shape control and whole-life energy assessment of an 'infinitely stiff' prototype adaptive structure. *Smart Materials and Structures*, 27(1), 015022.
- Shahin, H. S. M. (2019). Adaptive building envelopes of multistory buildings as an example of high-performance building skins. *Alexandria Engineering Journal*, 58(1), 345-352.
- Sinopoli, N., & Tatano, V. (Eds.). (2002). *Sulle tracce dell'innovazione: tra tecniche e architettura* (Vol. 31). Franco Angeli.
- Slessor, C. (1997). *EcoTech. Sustainable Architecture and High Technology*. Thame and Hudson, Londra.
- Sobek, W., & Teuffel, P. (2001, July). Adaptive systems in architecture and structural engineering. In *Smart Structures and Materials 2002: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*, 4330, 36-45. SPIE.
- Soong, T. T., & Manolis, G. D. (1987). Active structures. *Journal of Structural Engineering*, 113(11), 2290-2302.
- Tabadkani, A., Roetzel, A., Li, H. X., & Tsangrassoulis, A. (2021). Design approaches and typologies of adaptive facades: A review. *Automation in Construction*, 121, 103450.
- Trabucco, D. (2021). Will artificial intelligence kill architects? An insight on the architect job in the AI future. *TECH-NE-Journal of Technology for Architecture and Environment*, 128-132.
- Tucci, F. (2014). *Involucro, Clima, Energia, Qualità bioclimatica ed efficienza energetica in architettura nel progetto tecnologico ambientale della pelle degli edifici*. Altralinea Edizioni, Florence.
- Tucci, F. (2021). *Variable properties envelopes: Evoluzione e sperimentazione negli involucri selettivi ea configurazioni dinamiche*. Altralinea Edizioni.
- UNI 8290-1:1981 + A122:1981: Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia.
- UNI 8369-1:1988: Edilizia. Chiusure verticali. Classificazione e terminologia.
- UNI EN 13830:2015: Facciate continue – Norma di prodotto.
- UNI EN 13119:2016: Facciata continue – Terminologia.
- Vincent, J. F. (2006a). The materials revolution. *Journal of Bionic Engineering*, 3(4), 217-234.
- Vincent, J. F., Bogatyreva, O. A., Bogatyrev, N. R., Bowyer, A., & Pahl, A. K. (2006). Biomimetics: its practice and theory. *Journal of the Royal Society Interface*, 3(9), 471-482.
- Wada, B. K., Fanson, J. L., & Crawley, E. F. (1990). Adaptive structures. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1(2), 157-174.
- Weyer, S., Schmitt, M., Ohmer, M., & Gorecky, D. (2015). Towards Industry 4.0-Standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems. *Ifac-Papersonline*, 48(3), 579-584.
- Wigginton, M., & Harris, J. (2002). *Intelligent skins*. Oxford: Architectural Press.
- Yiannoudes, S. (2016). *Architecture and adaptation: From cybernetics to tangible computing*. Routledge.
- Zemella, G., & Faraguna, A. (2014). *Evolutionary optimisation of facade design: A New approach for the design of building envelopes*. Springer Science & Business Media.
- Zinzi, M., & Agnoli, S. (2014). *Involucro trasparente ed efficienza energetica: Tecnologie, prestazioni e controllo ambientale*. Dario Flaccovio Editore.
- Zuk, W., & Clark, R. H. (1970). *Kinetic Architecture*. New York: Van Nostrand Reinhold.

Lo stato dell'arte
**La progettazione antisismica degli Involucri
Contemporanei**

Abstract

In recent years, it has emerged that curtain walls play a key role in earthquake-resistant design. It has been shown that although regulations do not consider them as primary structures, curtain walls stress the entire building system, causing devastating effects with economic losses and, more importantly, loss of life. The extensive case studies on the failure of curtain walls, developed from research following past seismic events, have turned toward the consideration that the design of such systems must respond to a fail-safe approach, anticipating ex-ante the possible damage that arises during such extreme events. The focus is placed on two critical aspects corresponding respectively to glazed elements and details of connections insufficient to withstand seismic loads by overloading the primary supporting structure. From the realization that structural behavior can and should be safely predicted and evaluated, several comprehensive procedures, such as Performance Based Design and Building Performance Simulation, have been developed over the past decades. These are compared to outline the advantages of adopting the most congruent procedures to be used for research development, identifying the steps necessary to initiate appropriate design for facades in the seismic environment. This chapter aims to illustrate state of the art on seismic design, pointing out some of the critical limitations coming from industry regulations, which are often overcome thanks to the support coming from international standards, such as FEMA (USA) recommendations and the Japanese Code.

Highlights

- Framing of the impact scenarios of façade systems subjected to seismic actions and identification of the importance of the seismic vulnerability requirement for the implementation of such systems;
- Identification of critical aspects related to the dynamic behavior of the elements constituting curtain wall systems concerning past seismic events;
- Critical comparison of national-community-international regulatory recommendations for the design of curtain wall components;
- Framing of the innovative anti-seismic design concept for curtain wall systems to implement performance through predictive character.



2.1 La valutazione della vulnerabilità sismica, scenari di impatto sui sistemi di facciata

Nel primo capitolo sono stati affrontati, in modo scalare, i concetti chiave che investono le innovazioni nel campo della progettazione dell'involucro edilizio, "come parte dell'organismo architettonico che più di ogni altra reagisce oggi agli stimoli ambientali e ne assorbe i contenuti tecnologici e gli aspetti formali" [Nastri, 2020]. La crescente richiesta di involucri risiede nell'aumento degli aspetti prestazionali demandati agli elementi di chiusura, grazie ai recenti sviluppi e l'incremento della varietà dei materiali utilizzati insieme alla tecnologia. A rafforzare tale concetto, l'esponentiale diffusione dei sistemi di facciate continue, soprattutto in edifici alti [Trabucco, 2021], aumenta anche grazie al raggiungimento di requisiti come *leggerezza, estetica* e alla *facilità di installazione*.

Per questo motivo, risulta necessario sviluppare processi di progettazione che siano affidabili e coerenti con le richieste prestazionali che si stanno mettendo in atto, rafforzando il carattere predittivo di tali processi.

In questo scenario, la progettazione di tali sistemi deve tenere in considerazione due aspetti fondamentali. Il primo riguarda il *comfort indoor* degli occupanti, come ad esempio l'*impermeabilità all'aria o all'acqua* [Naggatz et al., 2014], la *resistenza al vento* [Hitchcock et al., 2010], il *controllo solare* [Hossain, 2017].

Il secondo aspetto riguarda il *comportamento prestazionale sismico* dei sistemi di facciata continua dovuto a un forte movimento del terreno [Pakdamar & Bozkurt, 2020]. Alla luce di tali considerazioni, l'attenzione si focalizza sull'indagine della valutazione della vulnerabilità sismica dell'involucro edilizio. Per fare questo passaggio, risulta necessario compiere un'analisi critica dello stato dell'arte, finalizzata all'implementazione delle conoscenze specifiche per la progettazione dei sistemi di facciata continua.

Come postulato in ambito normativo comunitario, il comportamento sismico dei sistemi di facciata, come quello degli altri componenti portanti di un edificio, richiede la considerazione di aspetti strutturali quali la sicurezza, la funzionalità, la robustezza e la durabilità [EN 1990]. Anche per i componenti non strutturali, il primo aspetto riguarda la minimizzazione della probabilità di cedimenti strutturali, che hanno conseguenze sia sulla sicurezza della vita che economiche [Stefanazzi, 2012].

Per queste ragioni, verificare la sicurezza strutturale comporta la definizione di uno scenario predittivo in cui circostanze o condizioni che la struttura potrebbe sperimentare durante il suo ciclo di vita devono essere messe in conto già nella fase di progettazione. In questo senso, i danni causati dai terremoti del passato confermano come, nella maggior parte dei casi, gli attori coinvolti nella progettazione dei sistemi di facciata non abbiano valutato la possibilità che alcuni fenomeni – come ad esempio gli eventi sismici – si sarebbero potuti verificare mettendo in pericolo la vita umana [Dhakal et al., 2016].

Infatti, una delle funzioni essenziali degli involucri edilizi è quella di fornire riparo agli occupanti e agli utenti contro i rischi naturali e antropici, definiti dalla letteratura come *hazard*². Tale funzione di "riparo" può essere asseverata attraverso il requisito di *robustezza*, intesa come la capacità di una struttura di resistere a eventi accidentali come esplosioni, incendi, impatti o conseguenze di errori umani, senza essere danneggiata in misura sproporzionata rispetto alla sua capacità di resistere a eventi accidentali [Beden et al., 2019].

Man mano che gli edifici diventano più complessi con sistemi involucrati performanti, maggiore attenzione viene posta alla valutazione della vulnerabilità sismica degli elementi non strutturali [Mazzucchelli et al., 2017]. In questo scenario, la comunità scientifica sta diventando sempre più consapevole delle perdite potenziali associate ai danni non strutturali³.

Questa crescente consapevolezza fornisce un'opportunità, mentre gli impatti dei recenti terremoti sono oggetto di alcuni importanti filoni di ricerca [Mahendran & Moor, 1999; Li et al., 2009; Sev & Tuğrul, 2014], finalizzati ad attuare un cambiamento nell'industria delle costruzioni con ricadute sul miglioramento delle prestazioni degli elementi non strutturali.

Fig. 1. Lavori di demolizione a seguito di eventi estremi

È quindi necessario valutare attentamente il comportamento di un sistema o di un elemento non strutturale per comprendere il processo di cedimento e di collasso che ne deriva [Galli, 2012], in modo da poter adottare adeguate misure di prevenzione e intervenire in fase di progettazione.

Da normativa le facciate continue – come emerso nel capitolo precedente – vengono definite come “*elementi non strutturali*”, questa considerazione potrebbe portare ad incorrere verso un’errata concezione dell’involucro edilizio.

Di fatti, in linea teorica, un elemento non strutturale, per sua natura, non è necessario perché l'edificio resista e non crolli, il suo possibile cedimento, non influisce realmente sulla capacità portante del sistema strutturale. Tuttavia, gli eventi sismici sono in grado di indurre un alto livello di accelerazione del basamento⁴.

Considerando che i sistemi di facciata sono ancorati alla struttura primaria di supporto è possibile che il comportamento dinamico dell’elemento non strutturale non sia in grado di accogliere le azioni che ne derivano, sovraccaricando la struttura primaria di supporto e arrivando alla rottura di alcuni elementi [Arnold, 2016].

In quest’ottica, l'elemento non strutturale non deve essere, in ogni caso, un pericolo per la vita delle persone, né all'esterno né all'interno dell'edificio. Inoltre, i componenti non strutturali non devono essere, in caso di rottura, in grado di pregiudicare la funzionalità di un altro sistema non strutturale. Infine, in caso di eventi sismici di normale e ordinaria magnitudo, o comunque non straordinari, gli elementi non strutturali devono rimanere funzionali, sicuri e consentire, se necessario, un'eventuale sostituzione non immediata ma posticipata [Xiang et al., 2020].

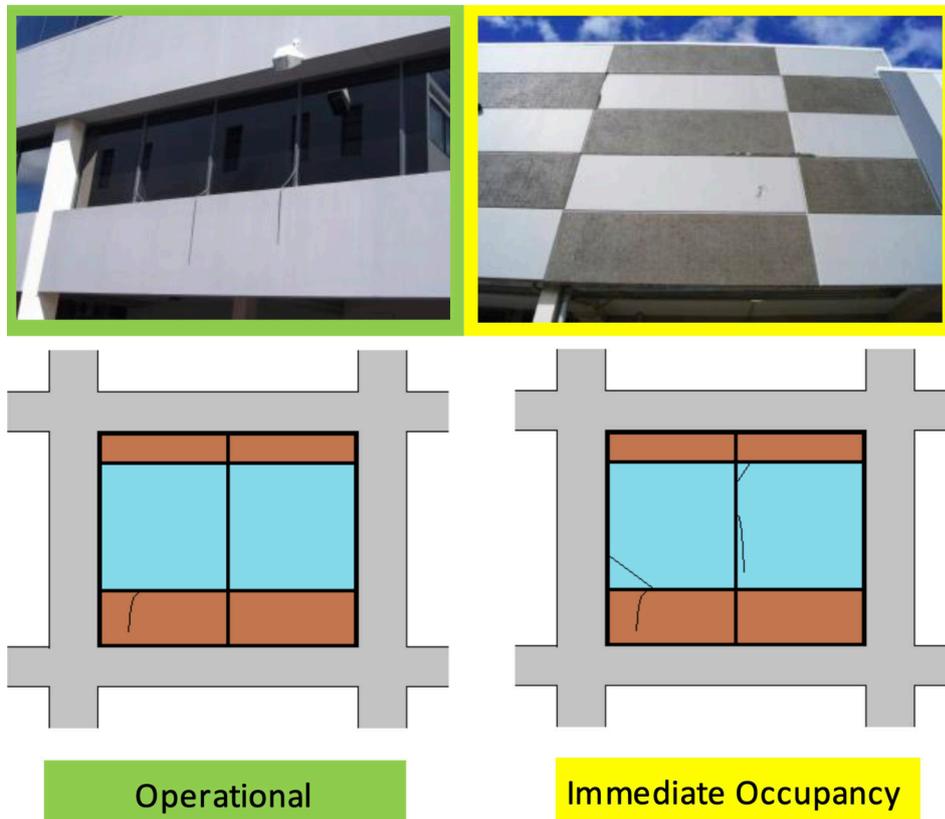
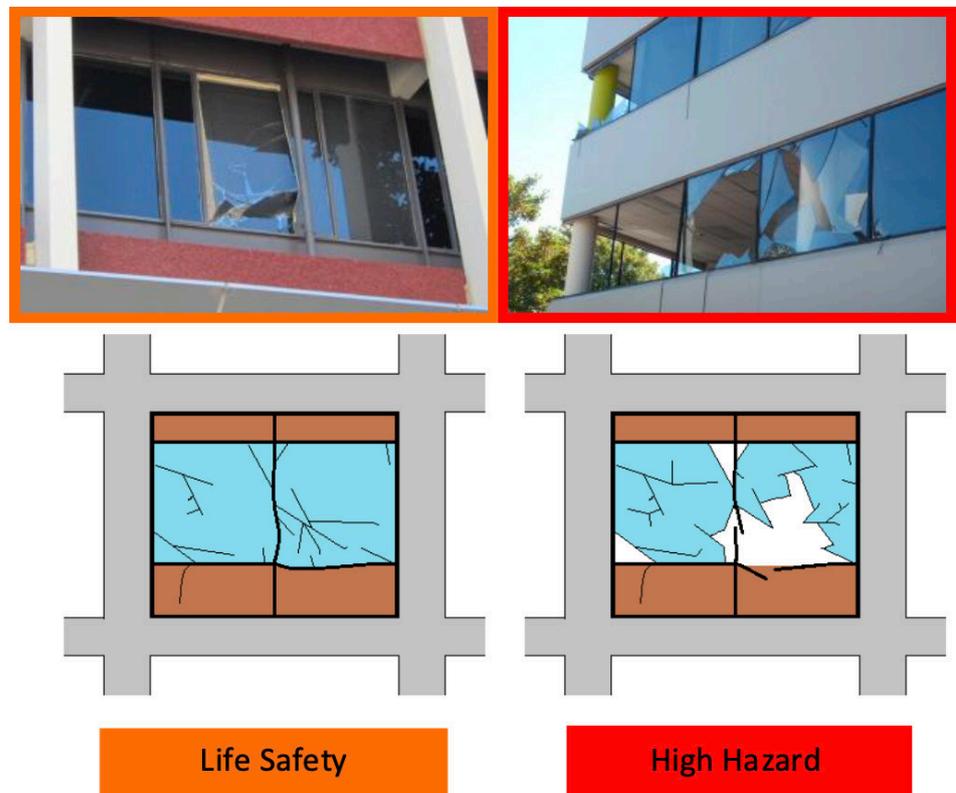


Fig. 2. Façade Performance Level - Operativo e Occupazione immediata (Source: FEMA, 2000)

In questo scenario, il fallimento degli elementi non strutturali ha forti ricadute sulla vulnerabilità sismica dell'edificio causando diverse problematiche legate a:

- in primo luogo, il cedimento di un elemento non strutturale può essere un pericolo diretto per le immediate vicinanze, cadendo e colpendo qualcuno;
- il cedimento e la conseguente non funzionalità di un sistema non strutturale può influire anche sulla funzionalità di un altro sistema non strutturale, o addirittura strutturale;
- l'edificio sarà molto probabilmente inagibile per un periodo molto lungo, fino a quando non sarà di nuovo sicuro per l'utilizzo. Se l'edificio è la base di un business, questo potrebbe essere un periodo di inattività molto costoso e il costo può anche essere maggiore del costo di riparazione.



Alla luce di tali considerazioni, uno studio condotto da Bachman [2004], rafforza l'importanza di indagare gli aspetti sismici durante i processi progettuali che investono l'involucro edilizio.

L'autore ha dimostrato come le perdite associate ai danni agli elementi non strutturali e al contenuto degli edifici rappresentano il 50% dei costi totali di un terremoto in un paese sviluppato [Bachman, 2004].

Negli edifici commerciali questa percentuale può aumentare costituendo una parte considerevole pari al 70-80% del costo totale di costruzione [Miranda & Taghavi, 2003], dove l'implicazione economica dei danni non strutturali è maggiore a causa dell'interruzione dell'attività.

Oltre a contribuire significativamente alle perdite finanziarie dirette e ai tempi di inattività, i danni agli elementi non strutturali e al contenuto possono anche essere pericolosi per la vita. Queste osservazioni stabiliscono indubbiamente che le prestazioni dei componenti non strutturali e dei contenuti nei terremoti sono di uguale – se non maggiore – importanza rispetto ai componenti strutturali, e necessitano di maggiore attenzione.

In linea con quanto espresso da Lucchini et al., [2013], *"il comportamento degli elementi non strutturali è stato preso in considerazione solo recentemente nella progettazione sismica degli edifici; tutti gli sforzi e le decisioni di progettazione sono stati in effetti principalmente focalizzati sui componenti strutturali"*.

La consapevolezza che le facciate hanno effettivamente un contributo strutturale alla rigidità laterale degli edifici deriva grazie a risultati analitici e sperimentali condotti [Behr et al., 1995; Pantelides et al., 1996] che hanno verificato la capacità delle facciate di influenzare in modo significativo la risposta e il comportamento degli edifici durante i terremoti.

Come espresso da Hareer [2007], durante un terremoto, il comportamento della facciata sarà dettato dall'interazione ciclica tra i pannelli e la struttura primaria di supporto, e in genere la facciata e le connessioni sono simultaneamente soggette a tre effetti principali:

- *forze di inerzia* generate dall'accelerazione del pannello, trasmesse dal pannello alla struttura principale tramite carico di taglio dei connettori,
- *spostamento orizzontale* tra i piani dei pannelli che provoca forze di taglio orizzontali nella connessione;
- *carico gravitazionale* del pannello supportato dalle connessioni.

Per quanto riguarda i sistemi non strutturali, a seconda della loro tipologia, del sistema di fissaggio e della posizione all'interno dell'edificio, sarà necessario valutare quale sia la condizione di carico peggiore da applicare ad ogni singolo elemento: spostamenti, accelerazioni o forze [Memari et al., 2011].

Il meccanismo di rottura di un elemento dipende dall'elemento stesso, ma anche dal tipo di carico che agisce su di esso [Romano, 2011]. Il comportamento sismico del sistema telaio-facciata dell'edificio, infatti, è influenzato dalle *proprietà dinamiche degli elementi strutturali di tali sistemi, vale a dire il telaio, la connessione della facciata e le proprietà del terremoto* [Loopez et al., 2003a, b]. Quindi, a seconda del sistema non strutturale e delle sue caratteristiche, sarà necessario valutare quale siano le condizioni di carico peggiore e procedere alla sua verifica [Filiatrault & Sullivan, 2014].

Alla luce di ciò, è opportuno che la progettazione degli elementi non-strutturali si basi sulla consapevolezza che questi, sollecitati al carico del sisma e del vento, diventino *strutturalmente reattivi* [Bedon & Amadio, 2018], prevedendo, quindi, che il comportamento del sistema telaio-facciata risponda in modo dinamico a seconda della sollecitazione a cui è sottoposto.

In letteratura, sono attualmente disponibili molteplici metodi per la valutazione del comportamento sismico di un edificio, questi possono essere suddivisi in due macro-categorie: *metodi empirici ed analitici* [Perrone et al., 2015].

I *metodi empirici* appaiono per la prima volta negli anni '70 con l'introduzione delle *matrici di probabilità di danneggiamento*. In questi si collocano anche quelli basati sulla definizione di indici e curve di vulnerabilità. La metodologia basata sulla definizione di indici di vulnerabilità, inizialmente proposta da Benedetti e Petrini [1984], consente di valutare la propensione di un edificio a danneggiarsi in funzione di una serie di parametri che sono ritenuti indicativi per la valutazione della vulnerabilità sismica [Baird et al., 2012].

I *metodi analitici* consentono di valutare nel dettaglio la vulnerabilità sismica di singoli edifici facendo riferimento alle loro reali caratteristiche geometriche e meccaniche attraverso la definizione di opportuni modelli di calcolo. In questo senso, *l'analisi dinamica non lineare* rappresenta lo strumento attualmente più avanzato per lo studio del comportamento dinamico delle strutture.

L'analisi dinamica incrementale, sviluppata da Vamvatsikos e Cornell [2002], sfrutta l'analisi dinamica non lineare per ottenere accurate curve di fragilità delle strutture e consente di studiare in modo probabilistico l'influenza delle numerose variabili che influenzano i modelli di calcolo.

Per questo motivo, sarebbe necessario, in primo luogo, procedere con *analisi e calcoli esauritivi del comportamento della struttura* dell'edificio, successivamente, si dovrebbe ottenere una risposta della storia temporale dell'edificio stesso all'azione sismica e infine si dovrebbe considerare l'applicazione all'unità di facciata di un'accelerazione in funzione del tempo. Comunque, anche supponendo di effettuare tutte queste analisi e studi sul comportamento dell'edificio, per di più in funzione dello specifico contesto sismico, il risultato dell'applicazione di questa accelerazione all'unità di facciata sarebbe ancora una volta che lo stress indotto ai diversi componenti, in primo luogo al sistema di fissaggio, è estremamente inferiore al valore di stress normalmente raggiunto considerando il carico del vento ad altezze elevate.

Quindi è già possibile prevedere in questa fase che sarà lo spostamento relativo tra due piani adiacenti il principale pericolo per l'integrità dei vari componenti della facciata, che di conseguenza dovranno essere in grado di sopportare questo spostamento. Allo stesso tempo risulta necessario prevedere che la lastra di vetro fissata dal telaio di alluminio sarà il componente più influenzato e a rischio della facciata, proprio a causa del suo comportamento fragile [Bedon & Amadio, 2018].

La vulnerabilità dei sistemi di vetrate ai danni del vetro in caso di terremoti è ben nota [EERI 1990, 1995a, 1995b, 2001]. Infatti, il danno al vetro può verificarsi in edifici che possono subire danni minimi o nulli alle componenti strutturali [FEMA 1994].

In generale, si prevede che il danno al vetro indotto da un terremoto nelle aree metropolitane si verifichi su una scala molto più ampia rispetto alle aree più piccole che subirebbero danni strutturali [Memari & Schwartz, 2009]. Infatti, un elemento non strutturale globalmente duttile, come il telaio di alluminio tende a seguire facilmente gli spostamenti relativi attraverso lo spostamento di sé stesso o la deformazione elastica della sua forma [Aiello et al., 2018].

Quindi il rischio principale per il vetro, che invece si comporta come un elemento rigido che si muove e non si deforma, sarà il contatto con il telaio.

Questo contatto potrebbe causare una rottura fragile e, nel peggiore dei casi, anche la caduta completa del vetro dal telaio, identificandosi come detrito volante, *flying debris*⁵ e quindi un grave pericolo per la sicurezza delle persone che si trovano in adiacenza. Per cui da un punto di vista strutturale, tuttavia, sotto l'azione di carichi eccezionali come impatti o pericoli in genere, gli involucri vetrati rappresentano una componente critica per gli edifici multipiano, a causa del comportamento tipicamente fragile e della limitata resistenza a trazione delle lastre di vetro, nonché dei dettagli di connessione insufficienti, richiedendo quindi concetti di progettazione specifici e a *prova di errore fail-safe*⁶.

A questo proposito, la stima appropriata della vulnerabilità dei sistemi di vetrate sotto carichi estremi, così come la previsione del loro effettivo comportamento dinamico sotto carichi eccezionali – inclusa l'interazione tra un dato involucro e la struttura secondaria/edificio principale –, o l'implementazione e lo sviluppo di tecniche avanzate di miglioramento sono attualmente argomenti aperti che attirano ancora l'attenzione di diversi studi.

In letteratura si possono trovare ricerche analitiche, sperimentali e/o numeriche agli elementi finiti, FE per gli involucri vetrati sotto eventi sismici [Bârnaure & Voiculescu, 2013; Caterino et al., 2017; Huang et al., 2017]. Ciò conferma la necessità di sviluppare metodi affidabili per prevenire le perdite economiche e umane.

L'uso diffuso di sistemi di facciate continue vetrate come involucri esterni ha incoraggiato i ricercatori a studiare la *risposta di questi elementi non strutturali quando si verifica un terremoto*.

Prima di fare questo passaggio, risulta necessario indagare le criticità che sono insorte durante gli eventi sismici del passato al fine di poter individuare gli aspetti ricorrenti e procedere verso lo studio delle prescrizioni normative per la progettazione dei componenti non strutturali attraverso un confronto critico tra gli standard nazionali, comunitari e internazionali.

2.2 Casi studio sul fallimento delle facciate continue sottoposte ad eventi sismici e casistica degli aspetti ricorrenti delle tipologie di rotture della facciata

Con la diffusione di vari tipi di sistemi di facciate continue in vetro, cresce l'esigenza di comprendere meglio il comportamento di questi sistemi sotto gli effetti del terremoto e di capire come progettarli in funzione dei requisiti "sicurezza" e "funzionalità".

Ciò può avvenire attraverso lo studio degli effetti indotti e subiti dai sistemi di facciata a seguito degli eventi sismici del passato. Allo stato attuale vi è un'ampia rassegna critica sullo stato dell'arte, in cui il settore scientifico [Hosseini, 2005; Behr, 2006; Memari & Schwartz, 2009; Baird et al., 2011; Miranda et al., 2012; Perrone et al., 2017] ha focalizzato l'attenzione sui danni registrati dagli involucri edilizi a seguito degli eventi sismici del passato.

I terremoti hanno rivelato la vulnerabilità dei sistemi vetrati ai danni sismici, grazie ai rapporti di ricognizione [EERI, 1990, 1995a, 1995b, 2001]. Tali rapporti – successivi a terremoti dannosi come Loma Prieta del 1989 [EERI 1990], Northridge del 1994 [EERI 1995a] e Nisqually [EERI 2001] – descrivono danni a componenti strutturali e non strutturali degli edifici, oltre a danni ad altri componenti degli edifici e ad altri sistemi infrastrutturali.



Fig. 4 Fallimento degli elementi vetrati (Terremoto Northridge 1994)

Con riferimento al report di ricognizione [EERI, 1995a] elaborato a seguito del terremoto di Northridge sono state identificate alcune importanti osservazioni che includono:

- maggiori danni alle vetrate di negozi in edifici bassi rispetto ai danni alle facciate continue in vetro di edifici alti;

- potenziale di danni cumulativi al vetro a causa di scosse di assestamento,
- caduta dell'intera unità di vetro rivestita da pellicola quando la pellicola non è ancorata;
- migliori performance delle facciate continue in vetro con sigillatura strutturale (SSG) rispetto ai sistemi con vetri a secco.

Successivamente, da uno studio di sintesi condotto da Memari e Schwartz [2009], gli autori hanno dimostrato come i *danni più ricorrenti riguardano i sistemi vetrati* attraverso la frattura del vetro, la deformazione eccessiva e permanente dei telai delle vetrate e la perdita di fissaggio nei sistemi di vetro aderente.

I danni al vetro sono stati osservati sia in caso di terremoti forti che di eventi moderati, con livelli e tipi diversi. Le performance dei sistemi vetrati in caso di terremoti [Lingnell 1994; FGMAJ 1995; Gates & McGavin 1998] dipendono da diversi parametri 7.

In questo senso, il terremoto di Canterbury⁸ (2011) può costituirsi come un esempio esplicativo dei danni subiti dagli involucri edilizi a causa degli spostamenti di interpiano [Baird et al., 2011]. In seguito all'evento sismico, molti edifici all'interno del Christchurch CBD sono rimasti non occupati a causa dei danni non strutturali⁹, nonostante il fatto che gli edifici abbiano mantenuto l'integrità strutturale. Oltre a contribuire significativamente alle perdite finanziarie dirette e ai tempi di inattività, i danni agli elementi non strutturali e al contenuto si sono dimostrati come pericolosi per la vita.

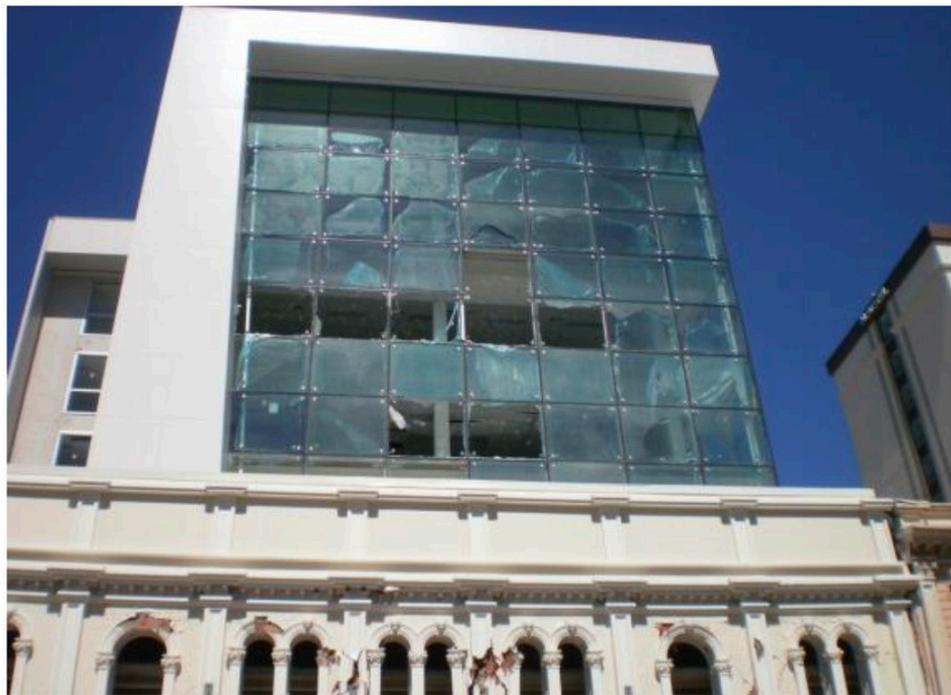


Fig. 5. Fallimento degli elementi vetrati (Terremoto Christchurch 2011)

In modo analogo a seguito dei terremoti che hanno colpito L'Aquila (2009) e l'Emilia-Romagna (2012), Perrone et al. [2017] hanno osservato – da una prima stima dei danni – che una cospicua parte delle perdite economiche è connessa al danneggiamento degli elementi non-strutturali.

Questo versante di ricerca è basato su alcune analisi statistiche [Kircher, 2003; Bachman, 2004] che hanno analizzato i dati raccolti a seguito di numerosi eventi sismici avvenuti nel

mondo ed hanno messo in evidenza come in molti casi il danneggiamento degli elementi non-strutturali sia uno dei fattori dominanti nell'ottica della valutazione delle perdite totali. Tali effetti subiti compromettono la funzionalità degli edifici, ed in particolar modo degli edifici strategici, in cui le perdite connesse al danneggiamento degli elementi non-strutturali possono essere sia di natura diretta che indiretta. Chiari esempi dell'influenza delle prestazioni sismiche degli elementi non-strutturali sulla funzionalità degli edifici sono stati osservati durante il terremoto che ha colpito il Cile nel 2012 [Ferner et al., 2014]. Un altro aspetto critico emerso dagli eventi sismici del passato è rivolto verso l'indagine del *comportamento di dettagli di connessioni insufficienti* [Lucchini & Stefanazzi, 2013].



Fig. 6. Fallimento degli elementi di connessione (Terremoto Christchurch 2011)

Una facciata continua è, come abbiamo detto in precedenza, un elemento non strutturale appeso e/o fissato alla struttura dell'edificio mediante un sistema di staffe che lo ancorano permettendo le necessarie tolleranze di installazione e i movimenti naturali dell'edificio (Cfr. Paragrafo 1.4).

Una particolare facciata e un sistema di collegamento che si comportano bene se connessi a un determinato telaio, in un particolare terremoto, possono rispondere in modo diverso se connessi a un altro telaio o sottoposti a forze di terremoto differenti. Questo perché le proprietà di connessione alla facciata potrebbero non essere compatibili con le caratteristiche dinamiche dell'edificio e del terremoto [Pakdamar & Bozkurt, 2020].

In questo scenario, numerosi filoni di ricerca [Khoraskani; 2015; Bedon & Amadio, 2017b; Gong et al., 2019] stanno focalizzando l'attenzione verso lo studio ed analisi di connettori e dispositivi di fissaggio meccanici "avanzati", necessari per evitare gravi danni. Tale tematica viene ripresa ulteriormente all'interno del Paragrafo 4.2 – "Le variabili del sistema costruttivo e le fasi di progettazione antisismica degli elementi di connessione nei sistemi di facciata continua".

Alla luce di tali osservazioni, i danni riportati dagli elementi non-strutturali sono spesso il risultato di una scarsa attenzione dedicata a tale problematica dai codici normativi [Perrone & Nascimbene, 2017].

A livello europeo non sono attualmente disponibili indicazioni specifiche che forniscano ai progettisti indicazioni precise e/o oggettive sulla progettazione sismica degli elementi non-strutturali, sia dal punto di vista della valutazione della domanda che delle verifiche da effettuare.

A questo si deve aggiungere che la ricerca nell'ambito delle prestazioni sismiche degli elementi non-strutturali si è sviluppata recentemente, di conseguenza ulteriori sforzi da parte dei ricercatori sono ancora necessari per colmare il *gap* attualmente presente tra le conoscenze in ambito strutturale e quelle in materia di elementi non-strutturali [Filiatrault & Sullivan, 2014; Cosenza et al. 2015; Di Sarno et al., 2015; Perrone & Nascimbene, 2017].

In conclusione, i terremoti del passato hanno evidenziato un'importante considerazione critica. I danni subiti nelle vetrate a causa del *comportamento tipicamente fragile* dei sistemi vetrati e/o di *dettagli di connessioni insufficienti* dimostrano l'esigenza di ampliare la conoscenza sul comportamento sismico dell'involucro edilizi al fine di implementare le attuali prescrizioni normative.

Come emerso nel corso del presente paragrafo, infatti, le informazioni sono attualmente limitate, per questo motivo non è sorprendente che in molti terremoti del passato le perdite dovute ai danni ai componenti non strutturali degli edifici abbiano superato le perdite dovute ai danni strutturali. In questo scenario, la trattazione persegue, incentrando l'attenzione sulle disposizioni normative esistenti per la progettazione sismica degli elementi non strutturali, mettendo a confronto le normative antisismiche nazionali e comunitarie con alcune stringenti normative internazionali.

2.3 La progettazione dei componenti per le facciate continue secondo le normative antisismiche nazionali, comunitarie ed internazionali

L'esigenza della valutazione della vulnerabilità sismica degli involucri edilizi è indicata nelle normative antisismiche *internazionali, comunitarie e nazionali* [Perrone et al, 2015]. Tra le variabili fortemente dipendenti per la vulnerabilità sismica influiscono gli aspetti di progettazione e posa in opera [Rigone & Bianchi, 2015]. Infatti, una progettazione o un'installazione errata di parti di un sistema di facciate continue influisce negativamente sul benessere e sul comfort dei residenti dell'edificio [Baniotopoulos et al., 2016].

Per queste ragioni, è necessario progettare correttamente le facciate continue tenendo in considerazione che i carichi sismici che influiscono sulla progettazione del sistema di facciate continue, giocando un ruolo importante [Pakdamar & Bozkurt, 2020].

In questo scenario, il *focus* del presente paragrafo è incentrato sullo studio e valutazione delle prescrizioni normative applicabili per la progettazione delle facciate continue. Ciò, attraverso il confronto di diversi codici nazionali, comunitari e internazionali – con particolare riferimento ai codici americani, neozelandesi e giapponesi – e del loro approccio alla progettazione sismica di elementi non strutturali, al fine di individuare sia i punti in comune che le differenze per la risoluzione di questa criticità.

In questo senso, lo studio condotto da Galli [2012] – successivamente ripreso da altri studi scientifici [Pakdamar & Bozkurt, 2020; Rizzo et al., 2021] – si presenta come un esempio cardine per l'indagine di confronto tra le normative di settore di seguito esposta.

Partendo dalla normativa nazionale [NTC18] e comunitaria [Eurocodice 8], risulta necessario dichiarare che si tratta per lo più di *procedure prescrittive, linee guida* da seguire durante la fase di progettazione – in caso di nuova costruzione – o adeguamento – in caso di edifici esistenti – di soluzioni tecnologiche atte ad assolvere la funzione di mitigazione sia per la struttura primaria che per gli elementi non-strutturali.

In linea generale, le norme europee per la progettazione sismica degli edifici possono essere applicate alle facciate continue in vetro, con la necessità di avvalersi di metodologie di analisi sia in campo lineare che non lineare.

Di fatto, però, i sistemi di facciata sono classificati come "componenti secondari"²⁰ e non sono disponibili norme di progettazione specifiche che tengano conto dell'importanza della tipologia di appartenenza della facciata continua, ma anche dei dettagli, dei sistemi di ancoraggio, ecc.

L'Eurocodice 8 [2004], postula che all'edificio nel suo complesso sia richiesto solo di non superare specifici valori di deriva interpiano, evidenziando l'assenza delle procedure relative all'applicazione delle diverse tecnologie disponibili sul mercato.

Per cui, il codice europeo – seppur riconoscendo l'importanza della progettazione degli elementi non strutturali *per la sicurezza generale delle persone e per l'utilizzo dell'edificio stesso, affermando che il loro cedimento potrebbe esporre le persone a un grave pericolo e compromettere la struttura e gli impianti dell'edificio* – utilizza un metodo semplificato per determinare l'azione sismica da considerare, calcolando una forza statica orizzontale da applicare al centro di massa dell'elemento non strutturale [British Standards Institution, 1996]. Ciò evidenzia come la normativa comunitaria non tiene conto dell'importanza e del comportamento dell'edificio o della sua tipologia.

Il contesto legislativo prescrittivo americano fa riferimento alle disposizioni emesse dal *National Earthquake Hazards Reduction Program*, NEHRP, costituito da diverse agenzie federali chiave²¹ che possono contribuire agli sforzi di mitigazione dei terremoti. In questo contesto, la normativa inerente "criteri e requisiti per la progettazione e la verifica di edifici soggetti a movimenti tellurici del suolo" riguarda le raccomandazioni FEMA¹² [2001].

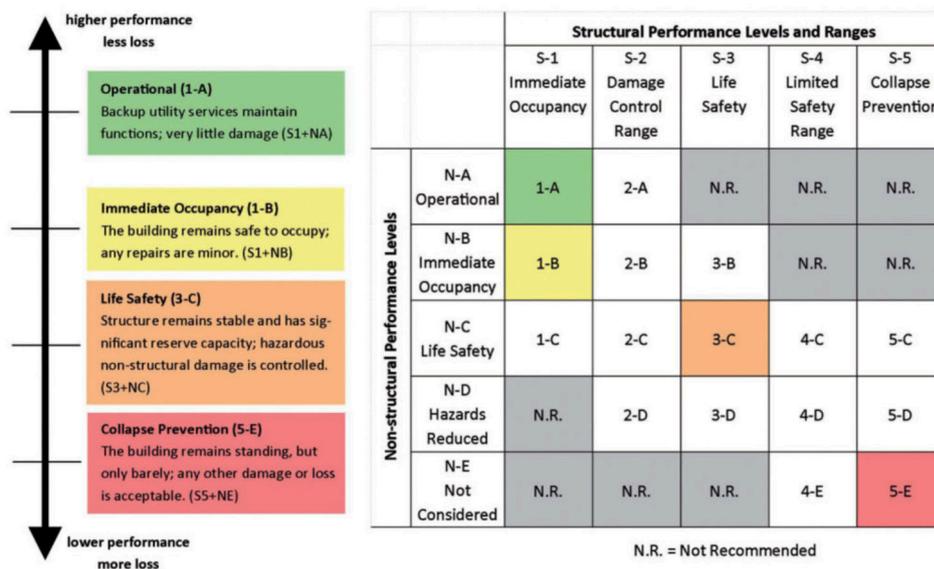


Fig. 7. Livelli di Performance fissati dalla norma FEMA 356 (Source: FEMA, 2000)

Queste fanno un esplicito riferimento a metodologie di analisi in campo lineare, al fine di ottenere un indice di rischio sismico per le strutture con la possibilità di avvalersi di analisi dinamiche per uno studio più accurato, richiedendo specifici valori limite di deriva per le facciate continue vetrate²³ al fine di evitare la caduta del vetro.

Nello specifico la normativa FEMA 450 [2003] pone grande attenzione su due requisiti fondamentali. Il primo, relativo alla capacità del sistema di facciata di accogliere e consentire le deformazioni indotti dagli spostamenti sismici, il secondo invece, utile per definire requisiti specifici per la progettazione dei sistemi di connessione.

Nel contesto neozelandese, le disposizioni sui requisiti prestazionali da asseverare nella progettazione antisismica sono raccomandate per funzionalità e per stati limite ultimo, afferendo al codice "Azioni di progettazione strutturale" AS/NZS 1170.0 [2002].

Tale normativa fornisce criteri di *stato limite di servizio* fuori dal piano e dentro il piano per gli "elementi da costruzione". Tali criteri riguardano in maggiore misura i limiti da rispettare per la progettazione degli elementi strutturali. Il comportamento prestazionale dei sistemi di facciata continua è trattato all'interno della Sezione 8 "Requirements for parts and components", [AS/NZS 1170.0, 2002] costituendosi, nella scomposizione degli elementi da costruzione, come "parte".

Nello specifico la norma impone che "tutte le parti delle strutture, compresi i componenti permanenti non strutturali e le loro connessioni, nonché i servizi e le attrezzature permanenti supportati dalle strutture, siano progettati per le azioni sismiche specificate". Per la sua verifica durante un evento sismico, lo standard richiede di considerare l'applicazione di un'azione sia verticale che orizzontale a ogni singola parte, ponendo particolare attenzione sulla progettazione degli elementi di connessione.

Infine, l'attenzione si focalizza sui codici normativi antisismici giapponesi facendo riferimento al codice JASS₁₄ [1996]. A causa dell'elevata sismicità²⁴ tali codici occupano un ruolo importante per le fasi di progettazione e postulano in modo specifico il comportamento dei sistemi di facciata continua. La norma tratta una prima analisi strutturale "semplice" ma si concentra sul metodo di studio delle deformazioni secondarie delle facciate continue dovute agli spostamenti indotti dall'azione sismica. Infatti, mentre da un lato prevede una progettazione "tradizionale" basata sulle forze – considerando sia le accelerazioni orizzontali che quelle verticali indotte dal terremoto sugli elementi della facciata – dall'altro identifica tre diversi livelli.

A ognuno di questi livelli o gradi – distinti da diversi requisiti di performance specifici – è associato un livello di pericolosità crescente, che varia dal "massimo evento sismico probabile", passando per il "più grande terremoto mai avvenuto in passato", fino a raggiungere "il più grande terremoto previsto per i prossimi 100 anni" [Galli, 2002]. Per cui, in fase di progettazione si devono garantire performance diverse in funzione dell'evento sismico²⁵ che potrebbe verificarsi.

In questo senso, le procedure giapponesi si pongono come precursori della progettazione basata sulle performance, meglio esplicitata nel paragrafo successivo.

Costruito il quadro teorico di riferimento, in cui sono stati trattati in modo sintetico le normative più rilevanti per i processi di progettazione antisismica degli elementi non strutturali, l'attenzione si focalizza sul confronto di tali normative.

Le normative sopraesposte, ad eccezione di quella giapponese, postulano la verifica di un metodo di calcolo dettagliato, basato su diversi coefficienti, attraverso il quale è possibile ottenere l'azione sismica orizzontale da applicare al centro di massa dell'elemento non strutturale considerato [Galli, 2012].

Le principali analogie si possono verificare soprattutto tra le equazioni fornite dalle normative americane e neozelandesi, basate su diversi coefficienti attraverso i quali è possibile considerare diversi tipi di elementi non strutturali, strutture edilizie, condizioni del terreno del sito, sistemi di staffe o fattori di importanza. Il limite però riguarda il fatto che le norme si riferiscono alla "progettazione degli elementi non strutturali", definendo coefficienti in modo generale e non specifico per ognuno dei diversi possibili elementi da verificare. Per cui tali prescrizioni non sono mirate al metodo di calcolo specifico per i sistemi di facciata continua.

Diversamente la norma giapponese JASS₁₄, come emerso precedentemente, è incentrata sulla verifica del comportamento sismico delle facciate continue. La norma prevede che la facciata debba essere verificata sia per l'accelerazione orizzontale che per quella verticale, ma non fornisce alcuna equazione specifica per il calcolo del loro valore.

Equazioni specifiche da applicare agli elementi non strutturali ma inerenti solo l'accelerazione verticale sono fornite dalle norme americane e neozelandesi

Nel tentativo di delineare aspetti in comune e principali differenze tra le normative discusse, un'importante considerazione riguarda la valutazione del valore di drift interpiano¹⁶ durante la fase di progettazione strutturale [International Code Council, 2000]. Queste limitazioni si basano principalmente sul *comfort psicologico* degli abitanti in situazioni di pericolo – evitare grandi oscillazioni dei piani – e sulla funzionalità delle tecnologie costruttive tipiche – evitare cedimenti delle pareti divisorie e delle apparecchiature meccaniche.

Tra le normative affrontate, l'Eurocodice 8 non tiene conto di questo parametro e non richiede alcuna verifica specifica al riguardo, in netta antitesi con le normative americane e quelle giapponesi che pongono particolare attenzione al drift interpiano.

Nello specifico, la FEMA richiede che in ogni caso l'elemento non strutturale debba accogliere lo spostamento relativo tra due piani adiacenti. Nel processo di calcolo del valore di drift, la normativa americana postula ulteriori riferimenti per eseguire le prove sperimentali di performance e per valutare, sempre attraverso una prova sperimentale¹⁷, il cosiddetto $\Delta_{fallout}$, inteso come lo *spostamento che può provocare la caduta della lastra di vetro dal telaio della facciata*, rimandando alle prescrizioni postulate all'interno della normativa AAMA 501.6.

La JASS₁₄ in realtà non considera specificamente il parametro del *drift*, ma al contrario richiede che *“la facciata sia in grado di accogliere uno spostamento orizzontale applicato, relativo tra il solaio superiore e quello inferiore, calcolato e basato sull'altezza interpiano H e specificando diversi obiettivi di performance per ciascuno dei tre gradi riportati”*.

L'approccio utilizzato nella normativa neozelandese, invece, prende in considerazione la *deriva interpiano*, ma solo in modo secondario¹⁸. Durante la fase di progettazione, se la deriva di interpiano – *drift* – è maggiore dello spostamento consentito dagli elementi non strutturali, allora si dovrà procedere ad isolare alla base la struttura dell'edificio.

In ogni caso, la norma non suggerisce alcuna indicazione su come isolare l'elemento non strutturale, tali indicazioni sono generiche. A colmare tali *gap*, all'interno del codice neozelandese grande attenzione viene posta sul *valore minimo di duttilità* del sistema di fissaggio dell'elemento non strutturale, chiamato *“parte”*, che deve essere almeno pari a 1,25. Tale limite non viene riscontrato nelle normative europee e internazionali discusse precedentemente.

In conclusione, al fine di proteggere gli elementi non strutturali degli edifici, i codici di progettazione sismica – in maggiore misura quelli americani e giapponesi – prevedono limitazioni alla deriva dei piani. Queste limitazioni, però, non sono sufficienti per le facciate in vetro e occorre fare ulteriori considerazioni.

Durante la fase di progettazione strutturale, al fine di studiare l'effetto delle deformazioni all'interno della struttura dell'edificio sulle facciate e sugli involucri in vetro dell'edificio, si consiglia agli ingegneri strutturali di fornire un elenco di queste deformazioni e derive dalle loro simulazioni numeriche e dai risultati delle analisi per diversi casi e combinazioni di carico. Tuttavia, in caso di assenza di tali dati, si utilizzeranno come dati di input i rapporti di deriva massimi consentiti dal codice sismico utilizzato per la progettazione strutturale.

In un quadro di sintesi emerge come al momento, i codici ai quali si fa maggiore riferimento sono quelli degli Stati Uniti [ASCE 7-16; ASCE 41-17] poiché risultano essere più avanzati per la progettazione di componenti non-strutturali, descrivendo step by step le procedure da attuare e le metodologie di analisi sia in campo lineare che non lineare, al fine di ottenere un indice di rischio sismico. Di fatto, tali prescrizioni risultano carenti per raggiungere modelli di calcolo esaustivi. In quest'ottica, la ricerca affronta le tematiche inerenti alle procedure globali incentrate sull'utilizzo di software computazionali che siano in grado di simulare il reale comportamento del sistema facciata sollecitato alle azioni sismiche. Queste tematiche strutturano la trattazione del paragrafo successivo.

2.4 Il Performance Based Seismic Design e Building Performance Simulation, processi a confronto

Come emerso nel precedente paragrafo e in linea con quanto espresso da Filiatrault e Sullivan [2014], le informazioni rispetto alle prescrizioni normative in ambito progettuale, inerenti componenti e sistemi non strutturali, risultano relativamente limitate.

La carenza di codici e linee guida disponibili è solitamente, per la maggior parte, basata su esperienze passate, giudizi ingegneristici e intuizioni, piuttosto che su risultati sperimentali e analitici oggettivi. A seguito di eventi sismici, infatti, i progettisti sono costretti a rimettere in discussione tutti gli aspetti tecnici e tecnologici progettati, al fine di *analizzare il comportamento reale del sistema facciata* ed identificare le cause dei danni insorti [Perrone et al., 2019]. Ciò in un'ottica che mira a definire in modo mirato i *deficit* degli involucri edilizi e prevenirli.

Le conseguenze di una progettazione non appropriata – per la risposta prestazionale dei sistemi di facciata – risiedono nella natura empirica delle attuali normative sismiche e delle linee guida per i componenti non strutturali [Calvi et al., 2014]. In questo scenario, si rafforza il concetto di una progettazione di tipo predittivo, in cui – durante il processo edilizio – gli attori coinvolti utilizzino strumenti e/o procedure che siano in grado di simulare gli stress a cui sono sottoposti gli involucri edilizi nel ciclo di vita [Anwar et al., 2016].

Il *focus* del presente paragrafo risiede nella trattazione degli attuali strumenti e metodi impiegabili per la verifica del comportamento dinamico dei sistemi di facciata continua contrapponendo due filoni di ricerca importanti, il cui sviluppo proviene dall'ambito strutturale.

In modo analogo alla progettazione sismica dei componenti strutturali, anche il comportamento degli elementi non strutturali può essere valutato attraverso una *progettazione sismica basata sulle prestazioni* attingendo ai recenti sviluppi nel campo della simulazione computazionale e accennando alle considerazioni specifiche richieste per i componenti non strutturali.

Dalla consapevolezza che il comportamento strutturale può essere previsto e verificato con sicurezza, si sta sviluppando da alcuni anni una procedura globale quale il Performance Based Design¹⁹ [Priestley, 2000], inteso come orientamento che si basa sul principio di produrre, nella fase di progettazione, requisiti prestazionali a seconda delle esigenze, integrando *design* e *analisi*. Per fare questo l'analisi si divide in due parti, infatti bisogna avere un *modello di analisi*²⁰ e un *metodo di analisi*.

Le procedure di progettazione basate sulle prestazioni sono usate per colmare i *gap* delle prescrizioni normative [Muscio, 2010]. L'intento della PBD è quello di dimostrare esplicitamente, attraverso l'analisi di previsione delle prestazioni, che gli obiettivi di prestazione sismica pre-identificati per la struttura dell'edificio sono soddisfatti [Almufti & Willford, 2013].

Questo viene generalmente fatto attraverso una simulazione computazionale avanzata che sottopone una rappresentazione matematica 3D della struttura a movimenti reali del suolo registrati da terremoti passati. In rare occasioni, i proprietari possono volontariamente puntare a obiettivi di prestazione che superano quelli del codice, ma di solito il PBD è usato solo per verificare che gli obiettivi di prestazione previsti dal codice siano soddisfatti, al fine di aggirare certi requisiti del codice.

In quest'ultimo caso, il PBD fornisce una maggiore fiducia che la prestazione prevista sarà raggiunta durante un terremoto. Tuttavia, l'analisi computazionale non è sufficiente a simulare i danni reali soprattutto se in fase di progettazione strutturale sono previsti ingenti danni sull'edificio. Questo perché l'affidabilità dei modelli per registrare il reale comportamento dell'edificio diventa più incerta quando la struttura viene spinta ai suoi limiti.

Né gli approcci di progettazione basati sul codice né quelli basati sulle prestazioni includono tipicamente la verifica esplicita delle prestazioni dei componenti non strutturali e non considerano altri fattori esterni che possono influenzare la funzionalità dell'edificio dopo il terremoto.

In antitesi, la procedura globale sviluppata per la simulazione delle performance – *Building Performance Simulation*, BPS – degli edifici può rispondere all'esigente di valutare il comportamento sismico *ex ante* [Hensen & Lamberts, 2011]. La simulazione delle performance è una disciplina di ricerca ben consolidata e uno strumento di supporto alla progettazione ampiamente utilizzato nel campo dell'ingegneria edilizia.

La funzionalizzazione evoluta dell'involucro edilizio – come emerso nei paragrafi precedenti – riguarda oggi l'utilizzo di elementi e materiali complessi finalizzati a conferire all'intero sistema la capacità adattiva. Dal background scientifico derivano diversi modelli sviluppati per le facciate adattive [Loonen et al., 2018]. Sebbene questi strumenti abbiano comunità di sviluppo attive e ricevano regolarmente aggiornamenti ed estensioni delle capacità di modellazione, i loro concetti di base e l'architettura software di base non cambiano.

La maggior parte degli strumenti deriva da un'epoca in cui l'adattabilità dei componenti dell'edificio non era una considerazione primaria [Ayres & Stamper 1995; Oh & Habert 2016]. Di conseguenza, in questi strumenti la forma dell'edificio e le proprietà dei materiali non sono solitamente modificabili durante l'esecuzione della simulazione, il che limita le opzioni per la modellazione di sistemi di involucro edilizio adattivi.

I requisiti e le limitazioni degli strumenti BPS esistenti possono essere raggruppati in cinque aspetti, classificati in base alle loro caratteristiche e all'assunto di base. La simulazione delle performance degli edifici è un campo in cui le caratteristiche dei modelli, quasi per definizione, sono in ritardo rispetto ai più recenti sviluppi tecnologici e alle proposte progettuali più creative.

Le strategie di simulazione di ripiego hanno quindi una lunga tradizione in questo campo [Brahme et al., 2009] e possono essere utilizzate per varie ragioni legittime, come ad esempio: la completa assenza di modelli esistenti per alcune tecnologie adattive dell'involucro edilizio; la mancanza di competenze ed esperienza dell'utente; le risorse limitate del progetto (tempo, denaro) per passare a modelli più complessi; l'assenza di opzioni di controllo avanzate per determinare le proprietà dinamiche ottimali dell'involucro edilizio.

In molti di questi casi, la possibilità di riutilizzare modelli convalidati e ad alta risoluzione è un importante argomento a favore dell'utilizzo di software esistenti anziché dello sviluppo di codice di simulazione personalizzato da zero [Wetter, 2011].

Uno dei principali svantaggi dell'uso di questi modelli di calcolo è che tendono a basarsi su approssimazioni o semplificazioni che potrebbero violare la fisica delle rappresentazioni dei modelli e, di conseguenza, mettere a rischio la credibilità dei risultati delle simulazioni.

Alla luce di tali considerazioni, emerge quindi come i filoni di ricerca attuali finalizzati all'uso di strumenti predittivi nei processi di progettazione si stia evolvendo velocemente. Di fatto, però, il carattere incerto di tali strumenti e metodo di verifica porta a sviluppare processi di progettazione che non possono basarsi sulla valutazione *ex-ante* dei possibili deficit che insorgono durante gli eventi sismici nei sistemi di facciata.

Per queste ragioni, la tesi dottorale si propone di ampliare la conoscenza sull'utilizzo di strumenti di simulazione computazionale in riferimento agli stress sismici che risultino coerenti con il comportamento reale di un sistema di facciata continua sollecitato alle azioni sismiche.

2.5 Quadro di sintesi

La metodologia di parallelismo con lo strumento di misurazione dell'innovazione rispetto il livello di maturità tecnologica, TRL, adottata all'interno del primo capitolo, viene qui ripresa con l'obiettivo di delineare i passaggi strategici – che hanno contribuito allo sviluppo della ricerca – e di condurre la stessa verso un'innovazione misurabile in tutto il suo processo evolutivo. Il presente capitolo risponde all'esigenza di collocare la tematica delle prestazioni dell'involucro edilizio rispetto l'ampio stato dell'arte che si è sviluppato nel corso degli anni, focalizzando l'attenzione sull'aspetto di vulnerabilità sismica. In questo scenario la trattazione si inquadra rispetto al TRL 1 "Osservazione dei principi fondamentali" – come nel caso del precedente capitolo.



Fig. 8. Technologies Readiness Level TRL.

Al fine di motivare le ragioni per cui è stato in parte soddisfatto il livello di maturità tecnologica sopracitato e comprendere i passaggi che hanno costituito la trattazione e le considerazioni che sono emerse, vengono ripresi alcuni *concetti chiave*. Infatti, se nel primo capitolo la trattazione ha riguardato l'indagine sulle linee di ricerca rivolte verso l'innovazione dell'in-

volucro edilizio, in questo capitolo l'indagine ha riguardato le *problematiche che insorgono durante gli eventi sismici e la necessità di spingere l'innovazione verso sistemi che rispondano alla capacità adattiva, intesa come strategia virtuosa per il miglioramento delle prestazioni sismiche dei sistemi di facciata*. In passato, tali sistemi sono stati intesi come elementi non strutturali appesi e fissati alla struttura primaria di supporto all'edificio, il cui comportamento sismico non veniva previsto, valutato e di conseguenza progettato. Nel corso della trattazione è emersa la necessità di considerare gli involucri edilizi soggetti alle azioni sismiche come "*strutturalmente reattivi*" – in netta antitesi con la definizione proveniente dai diversi standard normativi – e di conseguenza indagare le criticità che sono insorte nel corso degli anni a seguito di eventi sismici. Ciò ha portato all'individuazione di alcuni elementi critici e vulnerabili dei sistemi di facciata che i processi di progettazione devono tenere in conto per mettere in atto procedure appropriate; questi sono sintetizzabili in:

- il *comportamento tipicamente fragile delle lastre di vetro*, la cui rottura può compromettere da un lato la funzionalità dell'edificio dall'altro considerarsi come un pericolo per la vita umana.

- il *posizionamento dei sistemi di ancoraggio*, intesi come sistemi tecnologici di filtro per il trasferimento delle azioni dal sistema facciata alla struttura primaria di supporto.

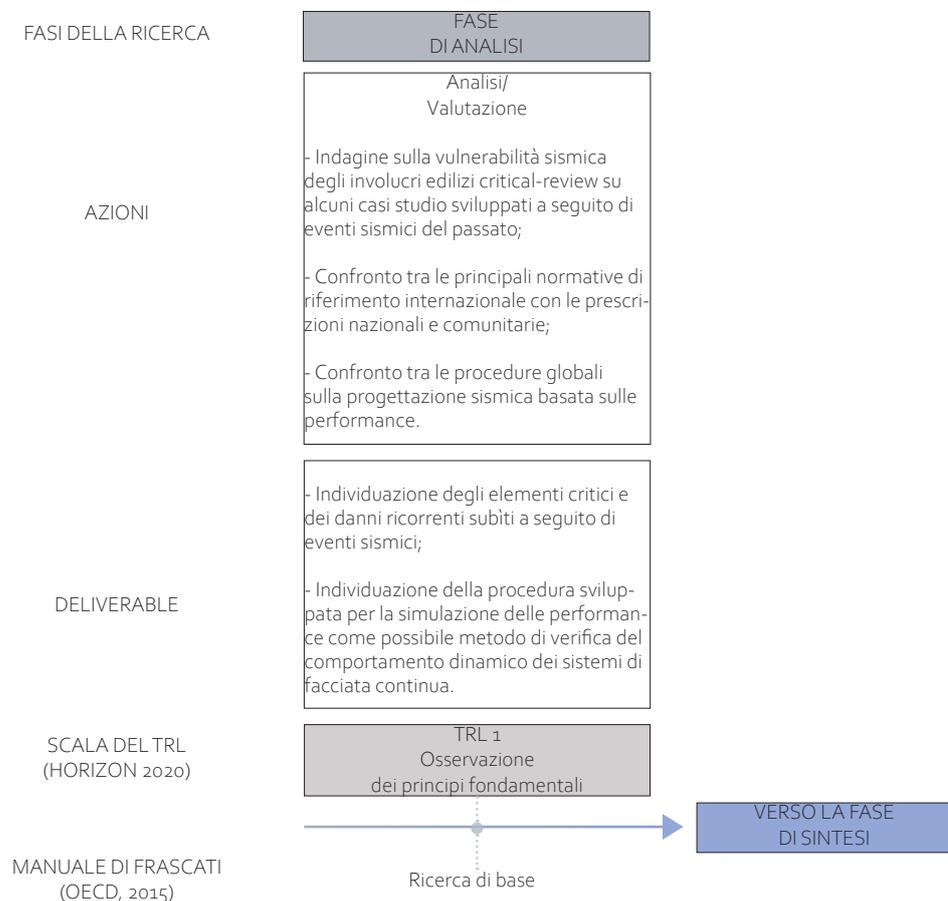
Rispetto al comportamento fragile dei sistemi vetrati, l'indagine sullo stato dell'arte ha fatto emergere alcune problematiche aperte che sono tutt'ora oggetto di indagine. Durante gli spostamenti dovuti ai carichi sismici, la lastra di vetro tra i due telai dovrebbe deformarsi seguendo il comportamento del telaio. La rigidità del vetro, soprattutto nel caso di specchiature di grandi dimensioni, non consente questa deformazione, per questo motivo quando gli elementi vetrati entrano in contatto con il telaio, questi, a causa delle forze esercitate, arrivano a fessurazione o addirittura a rottura. In alcuni casi, la rottura è avvenuta attraverso l'espulsione dell'elemento vetrato dal telaio, cadendo a terra e configurandosi come detrito volante, *flying debris*. In questo scenario, è emersa la necessità – che durante i processi di progettazione – il comportamento tipicamente fragile del vetro debba essere previsto e di conseguenza evitato. Ciò può avvenire attraverso un approccio di progettazione *fail-safe* basato sulla proposta di strategie di mitigazione sismica tali da evitare il contatto critico vetro-telaio, che di fatti rappresentano la sfida maggiore per i progettisti del settore. Il comportamento tipicamente fragile del vetro viene ripreso e analizzato nei suoi aspetti tecnici e tecnologici all'interno del Paragrafo 4.1 "*Il comportamento dinamico del sistema telaio e delle specchiature nella facciata a montanti e traversi*" al fine di indagare gli studi condotti nel settore scientifico per il miglioramento delle prestazioni sismiche del vetro e verso lo sviluppo di strategie atte ad evitare il contatto critico dello stesso con il telaio-facciata.

In seconda battuta la trattazione ha riguardato il ruolo strategico che ricopre il *posizionamento degli elementi di connessione* per dei sistemi di facciata rispetto la struttura primaria di supporto. I sistemi di connessione infatti sono chiamati a trasferire i carichi di progetto delle facciate continue al sistema strutturale. Nel dimensionamento delle facciate, infatti, grande attenzione viene posta a questi sistemi. Di fatti, citando quanto è stato emerso nel Capitolo 1, "*un involucro deve essere in grado di supportare il peso proprio e gestire gli effetti della risposta adattandosi alle sollecitazioni esterne indotte*". La mancanza di procedure prescrittive e linee guida per la progettazione dei sistemi di facciata continua porta di fatto a sovradimensionare i sistemi di connessione, attraverso soluzioni che prevedono sezioni piene con un aumento di materiale. La *critical review* condotta, attraverso alcuni casi studio, per l'indagine del comportamento dinamico dei sistemi di facciata ha portato l'attenzione sulla consapevolezza che il comportamento strutturale può – e deve – essere previsto e valutato con sicurezza. Nella trattazione sono state indagate alcune procedure globali, sviluppate negli ultimi decenni, che contribuiscono al cambiamento del paradigma del processo progettuale.

L'attenzione viene posta, in particolar modo, su due approcci specifici quali il *Performance Based Seismic Design* PBSD e il *Building Performance Simulation* BPS. Il primo, viene inteso

come orientamento che si basa sul principio di produrre, nella fase di progettazione, requisiti prestazionali a seconda delle esigenze. Il *PBSD* costituisce un orientamento, una filosofia di approccio organizzata con una trama a maglie larghe che si sostanzia secondo l'applicazione di un principio prestazionale basato sulla teoria di progettazione *fail-safe*. Il secondo, invece, è una disciplina di ricerca ben consolidata e uno strumento di supporto alla progettazione utilizzato nel campo dell'ingegneria edilizia. Si basa sulla proposta di utilizzare strumenti di simulazione che possano valutare le prestazioni "reali" dell'involucro progettato. Per cui, se il primo è relativo al *processo che definisce i requisiti prestazionali da asseverare* durante la fase di progettazione, il secondo può essere inteso come uno *strumento utile alla valutazione delle prestazioni* dopo una prima fase di progettazione tramite tools rappresentati dai software di modellazione e simulazione. In questo senso, l'"*Osservazione dei principi fondamentali*" per lo sviluppo della ricerca ha individuato negli strumenti di simulazione una strategia valida per verificare le performance sismiche durante i processi di progettazione dei sistemi di facciata. Tuttavia, per il raggiungimento degli obiettivi prefissati, al fine di soddisfare il primo livello di maturità tecnologica, rimangono aperte alcune problematiche legate ai ricorrenti elementi critici che insorgono durante gli eventi sismici e che sono stati affrontati durante il presente capitolo.

Da questi assunti, emerge la necessità di indagare le *strategie di mitigazione sismica* che sono state sviluppate nel corso degli anni con particolare riferimento a sistemi tecnologici con capacità di smorzamento. Questi temi delineano il focus della trattazione del seguente capitolo.



Note

1. In questo senso, dimostrativi appaiono i "rapporti sul mercato italiano dell'involucro edilizio" (Garzia, 2022) redatti da UNICMI (Unione Nazionale delle Industrie delle Costruzioni Metalliche dell'Involucro e dei serramenti). Tali rapporti hanno comprovato, attraverso analisi statistiche di mercato, l'esponentiale crescita della domanda di produzione dei sistemi di facciata, esimendo il macro-settore dalla crisi globale del 2020.

2. Dalle definizioni emerge la seguente classificazione (UNISDR, 2009; UN, 2015) del termine hazards naturali associati prevalentemente ai processi e ai fenomeni naturali. L'evento estremo è spesso associato al concetto di disastro, ma non sempre ne è la causa primaria, assume la caratteristica di hazard se esistono condizioni tali da trasformarlo in minaccia.

3. In ambito normativo americano (FEMA, 2000), questi sforzi sono stati delineati attraverso i livelli di performance delle facciate (o stati di danno) che riguardano: Operativo, Occupazione immediata, Sicurezza della vita e Riduzione dei pericoli. In base allo stato di danno, infatti, importanti studi scientifici hanno dimostrato rispetto al requisito di "occupazione" quale fosse lo stato in cui versava l'edificio a seguito di un evento sismico finalizzato ad una stima dei danni più specifica. Tratto da Baird, A., Palermo, A., & Pampanin, S. (2012). Façade damage assessment of concrete buildings in the 2011 Christchurch earthquake. *Structural Concrete*, 13(1), 3-13.

4. Questa accelerazione, così come lo spostamento alla base, viene "tradotta" dall'edificio stesso in una risposta. Quindi il sistema strutturale, caratterizzato anche da tutti gli altri sistemi non strutturali, ha un suo modo di vibrare che è essenzialmente definito dal periodo fondamentale dell'edificio. Attraverso questo parametro è possibile descrivere come la struttura risponde alle eccitazioni, come l'attività sismica. Tratto da Galli, U. (2012). *Seismic behaviour of curtain wall facades: a comparison between experimental mock-up test and finite element method analysis*.

5. Durante eventi estremi, uno dei rischi maggiori è legato al distacco di elementi e materiali che divenendo detriti "volanti" rappresentando una grave minaccia per le persone e i vari contesti, costruiti o naturali che siano. Tratto da Wang, K. (2003). *Flying debris behavior* (Doctoral dissertation, Texas Tech University).

6. La filosofia di progettazione si baserà sul concetto di "fail safe", secondo il quale in una struttura in vetro la crisi di uno o più componenti non deve compromettere la sicurezza dell'intera struttura per salvaguardare le vite umane. Un'adeguata sicurezza può essere garantita facendo riferimento ai concetti di gerarchia, robustezza e ridondanza che possono fornire la duttilità che manca nel materiale o in un singolo elemento strutturale. È essenziale verificare che la struttura sia in grado di ridistribuire i carichi in caso di rottura di alcuni elementi strutturali, fornendo percorsi alternativi per le sollecitazioni. Tratto da Feldmann, M., Kasper, R., Abeln, B., Cruz, P., Belis, J., & Beyer, J. (2014). *Guidance for European structural design of glass components*. Publications Office of the European Union, 1-196.

7. I sistemi di vetrate possono essere suddivisi nelle categorie di finestre forate, finestre a nastro, vetrine e facciate continue. Poiché la costruzione di ciascuno di questi sistemi di vetrate dipende dal modo in cui è connesso all'edificio, la risposta sismica sarà funzione

dell'interazione tra il telaio della vetrata e il suo attacco alla parete o alla struttura portante dell'edificio. Tratto da Memari, A. M., & Schwartz, T. A. (2009). Glazing and curtain wall systems to resist earthquakes. *Architectural glass to resist seismic and extreme climatic events*, 28-63.

8. Circa 185 persone hanno perso la vita a causa del terremoto che ha colpito Christchurch il 22 febbraio 2011- il secondo più grande bilancio di un disastro naturale in Nuova Zelanda. In: New Zealand Police <http://www.police.govt.nz>

9. Su 173 edifici sono stati rilevati in totale 298 sistemi di facciata, pari ovvero a due sistemi di facciata per edificio, occupando almeno il 10% della superficie dell'edificio. L'indagine ha classificato i sistemi di facciata in 11 tipologie individuali, basate su quelle utilizzate nel modulo di valutazione delle performance degli edifici post-terremoto. Queste tipologie sono state raggruppate nelle sottocategorie: rivestimenti pesanti, rivestimenti leggeri e tamponamenti. I danni subiti sono stati organizzati in base a queste sottocategorie. L'indagine condotta ha dimostrato che 31 sistemi di facciata (10 %) che sono stati considerati ad alto rischio, al di fuori degli obiettivi degli standard di progettazione. Tratto da Baird, A., Palermo, A., & Pampanin, S. (2012). Façade damage assessment of concrete buildings in the 2011 Christchurch earthquake. *Structural Concrete*, 13(1), 3-13.

10. Nella norma europea [28] il capitolo 4.3 è dedicato all'analisi strutturale. Qui è possibile trovare, al paragrafo 4.3.5, i requisiti dell'Eurocodice 8 per gli elementi non strutturali degli edifici. In primo luogo, un punto interessante da analizzare è come la norma classifica gli elementi non strutturali. Essi sono denominati "appendici", per identificare chiaramente con una sola parola la loro caratteristica principale di comportamento che è quella di essere attaccati agli elementi strutturali. Vengono poi elencati alcuni esempi: "parapetti, timpani, antenne, appendici e attrezzature meccaniche, facciate continue, partizioni, parapetti". Il primo requisito generale della norma richiede che tutti questi elementi costruttivi "devono, insieme ai loro supporti, essere verificati per resistere all'azione sismica di progetto". Si può quindi notare come sia già stata data grande importanza al sistema di supporto e fissaggio. Questo sistema, infatti, ha un ruolo chiave nel meccanismo di rottura dell'elemento non strutturale. Successivamente, prima di procedere al metodo semplificato, si specifica che nel caso di "elementi non strutturali di grande importanza o di natura particolarmente pericolosa, l'analisi sismica deve essere basata su un modello realistico delle strutture pertinenti e sull'uso di spettri di risposta appropriati derivati dalla risposta degli elementi strutturali di supporto del sistema di resistenza sismica principale". Per tutti gli altri casi viene descritto un metodo semplificato, che consiste nella verifica di una forza orizzontale sismica statica applicata all'elemento non strutturale considerato. Tratto da Galli, U. (2012). *Seismic behaviour of curtain wall facades: a comparison between experimental mock-up test and finite element method analysis*.

11. Le agenzie federali chiave sono:
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) of the Department of Homeland Security;
- National Institute of Standards and Technology (NIST) of the Department of Commerce (NIST is the lead NEHRP agency);
- National Science Foundation (NSF);
- United States Geological Survey (USGS) of the Department of the Interior.

12. Federal Emergency Management Agency (FEMA) of the Department of Homeland Security. Tra gli obiettivi specifici dell'agenzia federale è quello di incoraggiare pratiche di progettazione e costruzione che affrontino il rischio sismico e riducano al minimo il rischio di danni e lesioni.

13. Per il calcolo e la verifica dei componenti architettonici, le Disposizioni dedicano un'ampia sezione, nel Capitolo 6. In particolare, c'è anche una parte che riguarda specificamente gli elementi non strutturali, come i pannelli delle pareti esterne. Tratto da Galli, U. (2012). *Seismic behaviour of curtain wall facades: a comparison between experimental mock-up test and finite element method analysis*.

14. Il Giappone è una delle aree a più alta sismicità del mondo, a causa della sua posizione sul cosiddetto "Pacific Ring of Fire". Tratto da Galli, U. (2012). *Seismic behaviour of curtain wall facades: a comparison between experimental mock-up test and finite element method analysis*.

15. Un'altra importante considerazione, è che i tre diversi gradi di performance richiesti si basano e dipendono da un unico parametro che varia in funzione della pericolosità del livello di performance. Questo valore è uno spostamento che deve essere applicato staticamente alla facciata. Pertanto, questa volta la progettazione della facciata è basata sullo spostamento e non sulla forza, come avviene di solito. Infine, il requisito specifico che lo spostamento da applicare dipende da una caratteristica della facciata stessa: l'altezza interpiano "H". Tratto da Galli, U. (2012). *Seismic behaviour of curtain wall facades: a comparison between experimental mock-up test and finite element method analysis*.

16. Intesa come la differenza tra gli spostamenti del solaio superiore e del solaio inferiore in cui è connessa la facciata divisa per l'altezza del piano. Pertanto, definisce l'angolo di rotazione medio che subirà ogni sottoinsieme trave-colonna in un dato piano. Tratto da Krawinkler, H., & Gupta, A. (1998). Deformation and ductility demands in steel moment frame structures. In *Stability and Ductility of Steel Structures (SDSS'97)* (pp. 167-178). Pergamon.

17. Nel dibattito tecnico-scientifico grande attenzione è stata posta sulle strumentazioni che sia in grado di simulare "dal vero" in ambiente di laboratorio gli spostamenti indotti sui sistemi di facciata dagli eventi sismici. In questo contesto, dimostrativi risultano gli studi condotti da Wang (1987); Cupples (1985) e Behr (1991), i cui risultati hanno portato a una serie di revisioni per le disposizioni raccomandate dal National Earthquake Hazards Reduction Program, NEHRP, per le norme sismiche per i nuovi edifici e altre strutture (FEMA 302), che costituiscono il corpus delle Disposizioni NEHRP del 2000 (FEMA 368). Tale tematica viene ripresa e ulteriormente discussa nel Paragrafo 4.1- "Il comportamento dinamico del sistema telaio-vento nei sistemi di facciata a montanti e traversi".

18. Lo standard raccomanda un limite di *drift in-plane* di H/600 per la parete in muratura fragile (dove H è l'altezza della parete) ma nessun limite è specificato per i sistemi di facciata vetrata. Questo è finalizzato allo stato limite di servizio dell'edificio principalmente per il carico del vento. Mentre lo standard per "Struttura in acciaio" AS 4100 (1998) raccomanda la conformità con AS 1170.4 (2007). Le clausole 5.4.4 e 5.5.4 di tale standard specificano che "la deriva interpiano allo stato limite ultimo, calcolato dalle forze determinate secondo le disposizioni di forza e stabilità non deve superare l'1,5% dell'altezza del piano per ogni livello e "il

fissaggio dei rivestimenti e dei pannelli di facciata al sistema di resistenza alle forze sismiche deve avere sufficiente capacità di deformazione e rotazione". Tratto da Galli, U. (2012). *Seismic behaviour of curtain wall facades: a comparison between experimental mock-up test and finite element method analysis*.

19. Il PBD non costituisce una tecnica di calcolo o di progetto specifica ma piuttosto un orientamento, una filosofia di approccio organizzata con una trama a maglie larghe che si sostanzia secondo l'applicazione di un principio prestazionale modificando gli obiettivi del progettista. Piuttosto che pensare a strutture passivamente resistenti a terremoti di grande intensità, diventa necessario verificare le prestazioni di un edificio che debba subire un'azione sismica di magnitudo variabile, in modo tale che questo possa conservare una piena o parziale operatività. Una delle applicazioni pratiche di calcolo è quella del *Capacity Design*, attraverso la quale si riesce a programmare la risposta strutturale dell'edificio e a indurre la formazione di cerniere plastiche in punti specifici della struttura favorendo, in tal modo, il comportamento duttile dell'insieme. Tratto da Muscio, M. (2010). Protezione sismica mediante dispositivi antisismici. In: *Modulo*. N. 360.

20. Facendo riferimento al metodo sviluppato dal PEER (Pacific Earthquake Engineering Research), il PBD si sviluppa in quattro step:

- analisi di pericolosità;
- analisi della struttura;
- analisi del danno;
- analisi delle perdite.

In cui a seconda del metodo di analisi scelto verrà determinato il modello di analisi.

Tratto da Marin, A. (2015). *Verifica sismica di un edificio prefabbricato esistente con il metodo del "Performance-Based Design"*.

Riferimenti bibliografici

- Abtahi, P., Samali, B., Zobec, M., & Ngo, T. (2012). Application of flexible façade systems in reducing the lateral displacement of concrete frames subjected to seismic loads. *From Materials to Structures: Advancement through Innovation*, 241.
- Aiello, C., Caterino, N., Maddaloni, G., Bonati, A., Franco, A., & Occhiuzzi, A. (2018). Experimental and numerical investigation of cyclic response of a glass curtain wall for seismic performance assessment. *Construction and Building Materials*, Vol. 187, pp. 596-609.
- Almufti, I., & Willford, M. (2013). *REDi™ rating system: Resilience-based earthquake design initiative for the next generation of buildings*. Arup Co.
- Anwar, N., Najam, F. A., Aung, T. H., & Norachan, P. (2016). *From Performance to Resilience—A Recent Account of Seismic Design Philosophy*. ASEP a-16 Concept.
- Ansal, A. (2015). *Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology: Volume 1*. Springer Nature.
- Arnold, C., (2016). *Seismic Safety of the Building Envelope*. Whole Building Design Guide.
- AS 1170.4. (2007). "Structural design actions, Part 4: Earthquake Actions in Australia." Australian Standard, Standards Australia, 1 The Crescent, Homebush, NSW 2140.
- AS 1288. (2006). "Glass in buildings - Selection and installation." Australian Standard, Standards Australia, 1 The Crescent, Homebush, NSW 2140.
- AS 3600. (2001). "Concrete structures." Australian Standard, Standards Australia, 1 The Crescent, Homebush, NSW 2140.
- AS 4100. (1998). "Steel strutures." Australian Standard, Standards Australia, 1 The Crescent, Homebush, NSW 2140.
- AS/NZS 1170.0. (2002). "Structural design actions, Part 0: General principles." Australian/ New Zealand Standard.
- ASCE 7-02. (2002). "Minimum design loads for buildings and other structures." The American Society of Civil Engineers, 1801 Alexander Bell Drive, Reston, Virginia 20191-4400.
- Ayres, J. M., & Stamper, E. (1995). Historical development of building energy calculations. *ASHRAE Journal*, 37(2).
- Bachman RE (2004) *The ATC 58 Project, plan for non-structural components, performance-based seismic design: concepts and implementation. Peer Report 2004/05*. Pacific Engineering Research Centre, University of California, Berkeley, California.
- Baird, A., Palermo, A., & Pampanin, S. (2011). Facade damage assessment of multi-storey buildings in the 2011 Christchurch earthquake. *Bulletin of the New Zealand Society for earthquake engineering*, 44(4), 368-376.
- Baird, A., Palermo, A., Pampanin, S., Riccio, P., & Tasligedik, A. (2011). Focusing on reducing the earthquake damage to facade systems. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 44(2), 108–120. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.44.2.108-120>
- Baird, A., Palermo, A., & Pampanin, S. (2012). Façade damage assessment of concrete buildings in the 2011 Christchurch earthquake. *Structural Concrete*, 13(1), 3-13.
- Baniotopoulos, C. C., Nikolaidis, T. N., & Moutsanidis, G. (2016). Optimal structural design of glass curtain-wall systems. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 169(6), 450-457.
- Bârnaure, M., & Voiculescu, M. (2013). The seismic behaviour of curtain walls: an analysis based on numerical modelling. *Mathematical Modelling in Civil Engineering*, 9(4), 1-8.
- Bedon, C. & Amadio, C (2017a). Enhancement of the seismic performance of multi-storey buildings by means of dissipative glazing curtain walls. *Engineering Structures*, Volume 152, Pages 320-334. ISSN 0141-0296, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.09.028>.
- Bedon, C., & Amadio, C. (2017b). Passive control systems for the blast enhancement of glazing curtain walls under explosive loads. *The Open Civil Engineering Journal*, 11(1).
- Bedon, C., & Amadio, C. (2018). Numerical assessment of vibration control systems for multi-hazard design and mitigation of glass curtain walls. *Journal of Building Engineering*, 15, 1-13.
- 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, 921-937.
- Bedon, C., Fasan, M., & Amadio, C. (2019). Vibration analysis and dynamic characterization of structural glass elements with different restraints based on operational modal analysis. *Buildings*, 9(1), 13.

- Behr, R. A., Karson, M. J., & Minor, J. E. (1991). Reliability analysis of window glass failure pressure data. *Structural safety*, 11(1), 43-58.
- Behr, R. A., Belarbi, A., & Culp, J. H. (1995). Dynamic racking tests of curtain wall glass elements with in-plane and out-of-plane motions. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 24(1), 1-14.
- Behr, R. A. (1998). Seismic performance of architectural glass in mid-rise curtain wall. *Journal of Architectural Engineering*, 4(3), 94-98.
- Behr, R. A. (2006). Design of architectural glazing to resist earthquakes. *Journal of architectural engineering*, 12(3), 122-128.
- Benedetti, D., & Petrini, V. (1984). Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: proposte di un metodo di valutazione. *L'Industria delle Costruzioni*, 149: 66-74.
- Bouwkamp, J. (1960). *Behavior of Window Panels under In-Plane Forces, UCB/SESM Report 1960/06*. University of California, Berkeley, CA.
- Brahme, R., O'Neill, Z., Sisson, W., & Otto, K. (2009). Using existing whole building energy tools for designing net-zero energy buildings—challenges and workarounds. *Proceedings of building simulation*, 9-16.
- British Standards Institution (1996). *Eurocode 8: Design provisions for earthquake resistance of structures. Pt. 1.1, General rules: Seismic actions and general requirements for structures*. London: British Standards Institution.
- Calvi, G. M., Pinho, R., Magenes, G., Bommer, J. J., Restrepo-Vélez, L. F., & Crowley, H. (2006). Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years. *ISET Journal of Earthquake Technology*, 43(3), 75-104.
- Calvi, G. M., Sullivan, T. J., & Welch, D. P. (2014). A seismic performance classification framework to provide increased seismic resilience. *Perspectives on European earthquake engineering and seismology*, 361-400.
- Casagrande, L., Bonati, A., Occhiuzzi, A., Caterino, N., & Auricchio, F. (2019). Numerical investigation on the seismic dissipation of glazed curtain wall equipped on high-rise buildings. *Engineering Structures*, 179, 225-245.
- Caterino, N., Del Zoppo, M., Maddaloni, G., Bonati, A., Cavanna, G., & Occhiuzzi, A. (2017). Seismic assessment and finite element modelling of glazed curtain walls. *Structural Engineering and Mechanics*, 61, 77-90.
- Cosenza, E., Di Sarno, L., Maddaloni, G., Magliulo, G., Petrone, C., & Protà, A. (2015). Shake table tests for the seismic fragility evaluation of hospital rooms. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(1), 23-40.
- Cupples (1985). *Curtain Wall Tests for Cupples Horizon Series of World Wall. Cupples test report No. STL-33*, St. Louis, MO.
- Cwyl, M., Michalczyk, R., Grzegorzewska, N., & Garbacz, A. (2018). Predicting performance of aluminum-Glass composite facade systems based on mechanical properties of the connection. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62(1), 259-266.
- Dhakal, R. P., Pourali, A., Tasligedik, A. S., Yeow, T., Baird, A., MacRae, G., ... & Palermo, A. (2016). Seismic performance of non-structural components and contents in buildings: an overview of NZ research. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 15(1), 1-17.
- Di Sarno, L., Petrone, C., Magliulo, G., & Manfredi, G. (2015). Dynamic properties of typical consultation room medical components. *Engineering Structures*, 100, 442-454.
- Durić-Mijović, D., Savić, J., Milanović, D., & Cilić, A. (2018). Seismic damage mitigation of the glazed building façade. *Facta universitatis-series: Architecture and Civil Engineering*, 16(3), 343-353.
- D.m. 17 gennaio 2018, Norme tecniche per le costruzioni, NTC18.
- El Faridy, Z. F. (2016). Glass As A Sustainable Material To Design A Modern Office Building In Seismic Area, A Case of: Banda Aceh, Indonesia. *Elkawnie: Journal of Islamic Science and Technology*, 2(2), 153-168.
- EERI (1990). Loma Prieta Earthquake Reconnaissance Report. Earthquake Spectra, Supplement to Volume 6, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.
- EERI (1995a). Northridge Earthquake Reconnaissance Report, Volume 1, Earthquake Spectra, Supplement C to Volume 11, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.
- EERI (1995b). The Hyogo-Ken Nanbu Earthquake January 17, 1995 Preliminary Reconnaissance Report, EERI 95-04, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.
- EERI (2001) The Nisqually, Washington, Earthquake February 28, 2001 Preliminary Reconnaissance Report, EERI 2001-01, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.
- Eurocode (EN 1990) "Basis of structural design". CEN - European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 1990.

Eurocodice 8 (EN 1998) "Progettazione delle strutture per la resistenza sismica".

Eva, C., & Hutchinson, T. C. (2011). Experimental evaluation of the in-plane seismic behavior of storefront window systems. *Earthquake Spectra*, 27(4), 997-1021.

Feldmann, M., Kasper, R., Abeln, B., Cruz, P., Belis, J., & Beyer, J. (2014). Guidance for European structural design of glass components. *Publications Office of the European Union*, 1-196.

Federal Emergency Management Agency (FEMA). (1994). Reducing the Risk of Nonstructural Earthquake Damage – A Practical Guide. FEMA 74, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.

Federal Emergency Management Agency (FEMA). (1997). "NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part-1-Provisions." FEMA 302, Building Seismic Safety Council for the FEMA, Washington, D.C.

Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2000). "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building". FEMA 356. Building Seismic Safety Council for the FEMA, Washington, D.C.

Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2001). "NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part-1-Provisions." FEMA 368, Building Seismic Safety Council for the FEMA, Washington, D.C.

Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2003). "NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures", FEMA 450, Building Seismic Safety Council for the FEMA, Washington, D.C.

Ferner, H., Wemyss, M., Baird, A., Beer, A., & Hunter, D. (2014, March). Seismic performance of non-structural elements within buildings. *Proceeding Of The Nzsee Conference*, 21-23.

FIB Bulletin. (2012). Probabilistic performance-based seismic design. FIB bulletins. The International Federation for Structural Concrete, p. 118.

Filiatrault, A., Christopoulos, C., & Stearns, C. (2002). *Guidelines, specifications, and seismic performance characterization of nonstructural building components and equipment*. Pacific Earthquake Engineering Research Center.

Filiatrault, A., & Sullivan, T. (2014). Performance-based seismic design of nonstructural building components: The next frontier of earthquake engineering. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 13(1), 17-46.

Filiatrault, A., Perrone, D., Merino, R. J., & Calvi, G. M. (2021). Performance-based seismic design of nonstructural building elements. *Journal of Earthquake Engineering*, 25(2), 237-269.

FGMAJ (1995). Glass Damage Report – A report (explanation) on damage to window glass in the Great Hanshin Earthquake. Flat Glass Manufacturers Association of Japan, Translation from Japanese.

Galli, U. (2012). *Seismic behaviour of curtain wall facades: a comparison between experimental mock-up test and finite element method analysis*.

Garzia, C. (a cura di), (2022). *Rapporto sul mercato italiano dell'involucro edilizio. Il mercato dei serramenti e delle facciate continue nell'edilizia per il 2022 e proiezioni 2023*.

Gates, W. E., & McGavin, G. (1998). Lessons learned from the 1994 Northridge earthquake on the vulnerability of nonstructural systems. *Proceedings of the Seminar on Seismic Design, Retrofit, and Performance of Nonstructural Components, ATC*, 29-1.

Gong, Y., Cao, L., Laflamme, S., Ricles, J., Quiel, S., & Taylor, D. (2019). Variable friction cladding connection for seismic mitigation. *Engineering Structures*, 189, 243-259.

Günay, S., & Mosalam, K. M. (2013). PEER performance-based earthquake engineering methodology, revisited. *Journal of Earthquake Engineering*, 17(6), 829-858.

Haldimann, M., Luible, A., & Overend, M. (2008). *Structural use of glass* (Vol. 10). labse.

Hareer, R. W. (2007). *Seismic response of building façade system with energy absorbing connections* (Doctoral dissertation, Queensland University of Technology).

Hensen, J. L., & Lamberts, R. (2011). Building performance simulation for sustainable building design and operation. *Proceedings of the 60th Anniversary Environmental Engineering Department, Czech Technical University, Prague*, 1-8.

Hitchcock, P. A., Kwok, K. C., Wong, K. S., & Shum, K. M. (2010). The effects of topography on local wind-induced pressures of a medium-rise building. *Wind & structures*, 13(5), 433-449.

Hossain, M. F. (2017). Design and construction of ultra-relativistic collision PV panel and its application into building sector to mitigate total energy demand. *Journal of Building Engineering*, 9, 147-154.

- Hosseini, M. (2005). Behavior of nonstructural elements in the 2003 Bam, Iran, earthquake. *Earthquake Spectra*, 21(1_suppl), 439-453.
- Huang, B., Chen, S., Lu, W., & Mosalam, K. M. (2017). Seismic demand and experimental evaluation of the non-structural building curtain wall: A review. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 100, 16-33.
- JASS14. (1996). Japanese Architectural Standard Specification Curtain Wall. AIJ, Architectural Institute of Japan.
- JSSI Manual, (2003). Design and Construction Manual for Passively Controlled Building, first ed. Japan Society of Seismic Isolation (JSSI), Tokyo, Japan.
- Kazmierczak, K., & Hershfi, M. (2010). Review of curtain walls, focusing on design problems and solutions. *Building Enclosure Science & Technology, Portland, April*, 12-14.
- Kircher, C. (2003). *It makes Dollars and Sense to Improve Non-structural System Performance*. ATC-29-2.
- Khoraskani, R. A. (2015). *Advanced connection systems for architectural glazing*. Springer International Publishing.
- Krawinkler, H., & Gupta, A. (1998). Deformation and ductility demands in steel moment frame structures. *Stability and Ductility of Steel Structures (SDSS'97)*, 167-178, Pergamon.
- Li, B., Duffield, C. F., & Hutchinson, G. L. (2009). The influence of non-structural components on the serviceability performance of high-rise buildings. *Australian Journal of structural Engineering*, 10(1), 53-62.
- Li, B., Hutchinson, G. L., & Duffield, C. F. (2010). Contribution of typical non-structural components to the performance of high-rise buildings based on field reconnaissance. *Journal of Building Appraisal*, 6(2), 129-151.
- Lingnell, A. W. (1994). Initial survey and audit of glass and glazing system performance during the earthquake in the Los Angeles area on January 17, 1994. *Final Rep. Submitted to Primary Glass Manufacturers Council*.
- Loonen, R. C. G. M., Doya, M., Goia, F., Bedon, C., & Babich, F. (2018). *Building Performance Simulation and Characterisation of Adaptive Facades: Adaptive Facade Network*. F. Favoino (Ed.). Delft, The Netherlands: TU Delft Open.
- Lopez Garcia, D., & Soong, T. T. (2003a). Sliding fragility of block-type non-structural components. Part 1: unrestrained components. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 32(1), 111-129.
- Lopez Garcia, D., & Soong, T. T. (2003b). Sliding fragility of block-type non-structural components. Part 2: Restrained components. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 32(1), 131-149.
- Lorant, G. (2012). Seismic design principles. *Whole Building Design Guide. National Institute of Building Sciences*.
- Lucchini, A., Stefanazzi, A., & Parisi, M. A. V. (2013). Seismic Behavior of Building Façades. *INTERNATIONAL JOURNAL FOR HOUSING SCIENCE AND ITS APPLICATIONS*, 37(1), 1-10.
- Mahendran, M., & Moor, C. (1999). Three-dimensional modeling of steel portal frame buildings. *Journal of Structural Engineering*, 125(8), 870-878.
- Marin, A. (2015). *Verifica sismica di un edificio prefabbricato esistente con il metodo del "Performance-Based Design"*.
- Mazzucchelli, E. S., Angelo, L., Tattoni, S., & Stefanazzi, A. (2017). Analysis and control of façade claddings structural issues. Tema: Technology, Engineering, Materials and Architecture, 3(1): p. 88-100.
- Memari, A. M., Behr, R. A., & Kremer, P. A. (2003). Seismic behavior of curtain walls containing insulating glass units. *Journal of architectural engineering*, 9(2), 70-85.
- Memari, A. M., & Schwartz, T. A. (2009). *Glazing and curtain wall systems to resist earthquakes. Architectural glass to resist seismic and extreme climatic events*. 28-63.
- Memari, A. M., Shirazi, A., Kremer, P. A., & Behr, R. A. (2011). Development of finite-element modeling approach for lateral load analysis of dry-glazed curtain walls. *Journal of architectural engineering*, 17(1), 24-33.
- Memari, A. M. (2013). Design of curtain walls for earthquake-induced loads and drifts. In *Curtain Wall Systems: A Primer* (pp. 105-128). American Society of Civil Engineers.
- Miranda, E., & Taghavi, S. (2003). Estimation of seismic demands on acceleration-sensitive nonstructural components in critical facilities. In: *Proceedings of the seminar on seismic design, performance, and retrofit of nonstructural components in critical facilities, ATC 29-2*, Newport Beach, CA.
- Miranda, E., Mosqueda, G., Retamales, R., & Pekcan, G. (2012). Performance of nonstructural components during the 27 February 2010 Chile earthquake. *Earthquake Spectra*, 28(1_suppl1), 453-471.
- Muscio, M. (2010). Protezione sismica mediante dispositivi antisismici. In: *Modulo*. N. 360.
- Naggatz, S., & Sinusas, S. (2014). Water leakage testing of glass and metal curtain walls. In *Building Walls Subject to Water Intrusion and Accumulation: Lessons from the Past and Recommendations for the Future*. ASTM International.

- Nadim, F., Jaedicke, C., Smebye, H., & Kalsnes, B. (2013). Assessment of global landslide hazard hotspots. *Landslides: global risk preparedness*, 59-71. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Nastri, M. (2020). *Alperia Tower. Tecnologie dell'involucro e interazione percettiva delle membrane*.
- NEHPR, (2009). Federal Emergency Management Agency – FEMA P-750. *Recommended Seismic Provision for New Building and Other Structures*. Federal Emergency Management Agency – ASCE, Washington, DC.
- NZS 1170.5. (2004). "Structural design actions, Part 5: Earthquake actions." New Zealand Standard.
- Oh, S., & Haberl, J. S. (2016). Origins of analysis methods used to design high-performance commercial buildings: Whole-building energy simulation. *Science and Technology for the Built Environment*, 22(1), 118-137.
- Pakdamar, F., & Bozkurt, Ö. (2020). Seismic Response of Anchorage Elements Used in Curtain Wall Systems. *Sakarya University Journal of Science*, 24(4), 564-574.
- Pantelides, C. P., & Behr, R. A. (1994). Dynamic in-plane racking tests of curtain wall glass elements. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 23(2), 211-228.
- Pantelides, C. P., Truman, K. Z., Behr, R. A., & Belarbi, A. (1996). Development of a loading history for seismic testing of architectural glass in a shop-front wall system. *Engineering Structures*, 18(12), 917-935.
- Panza, G. F., & Bela, J. (2020). NDSHA: A new paradigm for reliable seismic hazard assessment. *Engineering Geology*, 275, 105403.
- Perrone, D., Micelli, F., & Aiello, M. A. (2015). Metodologie di Valutazione della vulnerabilità sismica a confronto: applicazione ad un edificio scolastico. *IFCRASC'15*, 6, 661-672. Dario Flaccovio Editore.
- Perrone, D., & Nascimbene, R. (2017). Performance sismiche degli elementi non-strutturali: considerazioni sulla domanda sismica e sui dati sperimentali attualmente disponibili. *Progettazione Sismica*, 7(1).
- Perrone, D., Nascimbene, R., & Di Sarno, L. (2017). Analisi della risposta sismica degli elementi non-strutturali durante il terremoto del Centro Italia. *Progettazione Sismica*, (2).
- Perrone, D., & Filiatrault, A. (2018). Progettazione sismica degli elementi non-strutturali: La nuova frontiera dell'ingegneria sismica. *Progettazione Sismica*, (1).
- Perrone, D., Calvi, P. M., Nascimbene, R., Fischer, E. C., & Magliulo, G. (2019). Seismic performance of non-structural elements during the 2016 Central Italy earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(10), 5655-5677.
- Priestley, M. J. N. (2000). Performance based seismic design. *Bulletin of the New Zealand society for earthquake engineering*, 33(3), 325-346.
- Raffaelli, I. Performance based earthquake engineering: Il metodo PEER applicazione su un caso di studio.
- Rigone, P., & Bianchi, L. (2015). Le facciate continue: tipologie e aspetti legati al requisito di sicurezza all'uso. *Inarch Istituto Nazionale di Architettura-Statica delle facciate continue*, 1-298.
- Rizzo, F., Franco, A., Bonati, A., Maddaloni, G., Caterino, N., & Occhiuzzi, A. (2021). Predictive analyses for aerodynamic investigation of curtain walls. *Structures*, 29, 1059-1077. Elsevier.
- Romano, R. (2011). *Smart Skin Envelope: Integrazione architettonica di tecnologie dinamiche e innovative per il risparmio energetico* (p. 330). Firenze University Press.
- Sakamoto, I. (1978). *Seismic performance of nonstructural and secondary structural elements*. University of California, Earthquake Engineering Research Center.
- Sev, A., & Tuğrul, F. (2014). Integration of architectural design with structural form in non-orthogonal high-rise buildings. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 7(2), 31-42.
- Sivanerupam, S., Wilson, J. L., Gad, E. F., & Lam, N. T. K. (2009, December). Seismic assessment of glazed facade systems. *Proceedings of the Annual Technical Conference of the Australian Earthquake Engineering Society, Newcastle*.
- Stefanazzi, A. (2011). Involucro e terremoti: bassa vulnerabilità e alta sicurezza statico-dinamica delle pareti ventilate migliorabili attraverso isolatori e dissipatori di energia. In: *Modulo*. N. 376, pp. 271-280.
- Sucuoglu, H., & Vallabhan, C. G. (1997). Behaviour of window glass panels during earthquakes. *Engineering structures*, 19(8), 685-694.
- Trabucco, D. (2021). Will artificial intelligence kill architects? An insight on the architect job in the AI future. *TECHNE-Journal of Technology for Architecture and Environment*, 128-132.
- UN. (2015). Sustainable Development Goals. Available: <https://sustainabledevelopment.un.org/?menu=1300>.
- UNI EN 1998-1 (2004), Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings., CEN, 2005.

- UNISDR (2009) UNISDR terminology on disaster risk reduction. Geneva, Switzerland. <http://www.unisdr.org/we/inform/publications/7817>. [Accessed 20 Sept. 2022]
- Vamvatsikos, D., & Cornell, C. A. (2002). Incremental dynamic analysis. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 31(3), 491-514.
- Vamvatsikos, D., & Cornell, C. A. (2004). Applied incremental dynamic analysis. *Earthquake spectra*, 20(2), 523-553.
- Vamvatsikos, D., & Cornell, C. A. (2005). Direct estimation of the seismic demand and capacity of MDOF systems through incremental dynamic analysis of an SDOF approximation. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 131(4), 589-599.
- Wang, M. L. (1987). Cladding performance on a full scale test frame. *Earthquake spectra*, 3(1), 119-173.
- Wang, K. (2003). *Flying debris behavior* (Doctoral dissertation, Texas Tech University)
- Wetter, M. (2011). Co-simulation of building energy and control systems with the Building Controls Virtual Test Bed. *Journal of Building Performance Simulation*, 4(3), 185-203.
- Wisner, B., Kelman, I., & Gaillard, J. C. (2013). Hazard, vulnerability, capacity, risk and participation. *Disaster management*, 35-44. Routledge.
- Xiang, Y., Zhang, Y. J., Guo, J., & Chen, J. (2020). Effect of the primary structure on the seismic response of the cable-net façade. *Engineering Structures*, 220, 110989.

Parte II
Verso la progettazione antisismica delle facciate continue

Estrapolazione degli elementi utili alla Ricerca **I dispositivi di risposta dinamica con capacità di smorzamento**

Abstract

Examination of the vulnerability of certain critical elements, which arise during seismic events, has led the research on the investigation of seismic mitigation strategies that have been proposed over the years, identifying damping capacity as an important requirement for the vibration response of façade systems. This requirement can be achieved by designing so-called dynamic response devices or dampers. Originating from the Japanese earthquake-resistant structural design, with the application of such devices, it was shown how the structural behavior improved its performance by decreasing the stresses and vibrations that follow as a result of seismic actions and consequently increasing the "comfort" level of the occupants. From the analysis of these strategies, some researchers investigated the possibility of also applying this solution to improve the behavior of facade systems, proposing it, in the first instance, as a solution in cases of double-skin facades. The results of the analysis conducted in the scientific field showed that although the dynamic behavior of façade systems subjected to seismic stress was improved, the solution of this strategy led to the emergence of some critical limitations. The goal of Chapter 3 is to illustrate what types of dampers are on the market, breaking them down taxonomically into their constituent components and elements, and initiating a critical evaluation of their possible application in the "traditional" curtain wall system.

Highlights

- Framework of seismic mitigation strategies for improving seismic performance through the damping requirement;
- Taxonomic breakdown of the elements and components constituting dynamic response devices or dampers on the market;
- Critical review of some case studies related to the application of dynamic response devices in double skin façade systems;
- Identification of critical aspects related to the possible application of dampers in curtain wall systems;
- Identification of possible a-seismic requirements applicable in curtain wall systems to improve seismic performance.



3.1 La capacità di smorzamento come soluzione antisismica

Nel capitolo precedente la vulnerabilità sismica dei sistemi di facciata è stata indagata attraverso l'analisi critica dello stato dell'arte, in cui i terremoti del passato sono rappresentativi della necessità di ampliare le conoscenze nel campo della progettazione antisismica. A rafforzare tale concetto, la mancanza di procedure prescrittive in ambito normativo e l'inadeguatezza degli attuali strumenti di simulazione per la verifica del comportamento dinamico dei sistemi di facciata diventano *focus* di diverse ricerche sperimentali [Beton et al., 2018; Pakdamar & Bozkurt, 2020; Rizzo et al., 2021].

La consapevolezza che gli eventi sismici stressano i sistemi di facciata continua con significativi effetti devastanti si raffronta con un settore in continua crescita. In questo senso, risulta necessario fare un passo indietro, focalizzando l'attenzione sui processi tecnologici di innovazione che hanno permesso di sviluppare il passaggio etimologico prestazionale dal concetto di *chiusura* a quello di *facciata* ed infine a quello di *involucro adattivo* (Cfr. Paragrafo 1.2).

Come emerso nel capitolo precedente, i sistemi di facciata sono per lo più "dispositivi" passivi, fissati rigidamente alla struttura di supporto e progettati per modellare l'aspetto architettonico dell'edificio e fungere da barriera contro le azioni climatiche [Di Giovanni & Bernardini, 2020]. Durante il processo di progettazione, gli attori coinvolti prevedono come unici spostamenti quelli necessari per assecondare l'*espansione termica* e le *deformazioni locali* dovute alla gravità e alle azioni del vento.

In questo senso, la capacità adattive dell'involucro edilizio è stata identificata come strategia virtuosa per la risposta ed interazione con le azioni fenomenologiche esterne oltre [Knaack et al., 2015] che per l'adattamento alle diverse esigenze degli utenti.

L'*involucro adattivo* quale "dispositivo" in grado di rispondere alle *sollecitazioni sismiche*, come già enunciato nel paragrafo 1.2 "Dal sistema passivo/massivo al sistema attivo/adattivo", è di recente indagine grazie ad uno studio condotto da "Structural" Task Group (TG) of the European COST Action TU1403 'Adaptive Facades Network' (2014–2018).

Per cui, la caratteristica adattiva quale possibile capacità risolutiva per gli stress sismici, è di fatti un "argomento nuovo" per le innovazioni che investono le performance dell'involucro edilizio [Beton et al., 2019a, b].

Per meglio comprendere le possibili strategie di mitigazione sismica – che possano conferire all'involucro edilizio la capacità adattiva – risulta necessario fare riferimento a quanto è stato fatto nell'ambito della progettazione antisismica strutturale. Ai fini di questo passaggio si dichiara che in questo capitolo emerge, forse più che in ogni altro, la forte contaminazione proveniente dal settore dell'ingegneria edile, quale settore di scienza che più di ogni altro studia gli impatti sismici nell'ambiente costruito e propone strategia di mitigazione sismica. In questo senso, è necessario ricordare che la presente ricerca afferisce al settore scientifico disciplinare SSD ICAR/12 quale *tecnologia dell'architettura*, pertanto i seguenti argomenti vengono trattati in una chiave di lettura che è più incline al settore di riferimento, in cui vengono assunti alcuni concetti chiave utili all'avanzamento della ricerca.

Infatti, in linea con quanto espresso da Milardi et al. [2020], il progetto di architettura non poteva sfuggire né alla chiamata in causa, né alla presa in conto della questione emergenziale ambientale, considerando che il settore è tra quelli imputati quali autori degli inneschi che determinano tali fenomeni.

Nel campo della progettazione sismica degli involucri edilizi spesso vengono riprese le caratteristiche strutturali utilizzate per la progettazione degli edifici. Generalmente, nella progettazione antisismica si applicano criteri progettuali completamente opposti [Nakai, 2015]. Dal background scientifico deriva che per controllare il comportamento dinamico di un edificio, la progettazione può sfruttare tre principali caratteristiche strutturali: *massa*, *rigidità* e *smorzamento*¹.

Fig. 1. Beijing New Poly Plaza, Skidmore, Owings & Merrill LLP (SOM), Beijing City (2007)

In riferimento allo smorzamento, questo viene inteso come la capacità propria dell'oggetto di dissipare energia attraverso fenomeni dissipativi complessi – comportamento plastico, attrito, ingranamento, scorrimenti. È pratica comune lavorare su rigidità e massa, ma una soluzione alternativa è lavorare su *smorzamento* o *dissipazione di energia*, in un sistema dinamico [Lago et al., 2018].

Già dagli anni '70, in Giappone², la progettazione degli edifici si basava sulla *capacità rotazionale plastica della struttura*, in tale ottica sono stati sviluppati, negli ultimi decenni, diversi tipi di *dispositivi di smorzamento*³. Questi dispositivi sono generalmente combinati in modo integrato rispetto le strutture, diventando elementi costitutivi del progetto, al fine di ridurre in modo ottimale le vibrazioni dell'edificio dovute al carico del sisma e/o del vento [Nakai, 2015].

Il design di questi dispositivi è finalizzato a produrre principalmente un comportamento elastico durante un terremoto, in modo che l'energia sismica sia assorbita dagli elementi assorbitori di energia incorporati nella struttura di ciascun piano. Questo può essere realizzato in diversi modi, estremamente diversi tra loro anche dal punto di vista teorico [Sen, 2009]. Ad esempio, è possibile affrontare la questione sia isolando la struttura dell'edificio fin dall'inizio, evitando così che l'energia "entri" e agisca sul sistema strutturale, sia, al contrario, lasciando entrare l'energia e predisponendo opportuni dispositivi per dissipare questa energia, senza danneggiare la struttura. Con questi assunti, si può affermare che la progettazione di questi elementi può avvenire secondo due principi:

- sfruttando la dissipazione dell'energia;
- isolando meccanicamente alcuni elementi strutturali.

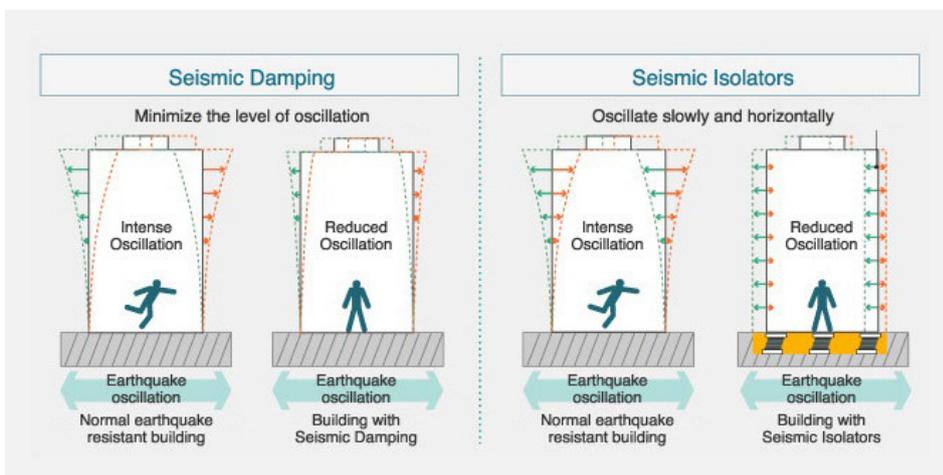


Fig. 2. Possibili strategie di mitigazione sismica

Come espresso da Khoraskani [2015], i concetti di dissipazione dell'energia e di isolamento meccanico sono esempi di sviluppo basati su aspetti innovativi atti per proteggere la struttura da forze ambientali estreme come il vento e il terremoto.

Nello specifico, nell'ambito dell'ingegneria strutturale, il *principio di dissipazione dell'energia* consiste nell'assorbire o consumare una parte dell'energia in ingresso all'interno di specifici dispositivi del sistema strutturale, riducendo così al minimo l'energia che agisce sulle componenti strutturali e proteggendole dai danni.

In antitesi, il concetto di *isolamento meccanico* prevede che venga fornito un "livello di isolamento desiderato" tra alcuni elementi specifici al fine di evitare il contatto tra loro⁴.

Alla luce di tali considerazioni, emerge come sia l'aspetto di dissipazione dell'energia che l'isolamento meccanico risultino contrapposti all'approccio tradizionale impiegato nei sistemi strutturali. Per resistere ai carichi eccezionali imposti e ambientali non permanenti, tale approccio si basa sul principio di fornire, in modo combinato, requisiti di *resistenza* e *ductilità*. Tali strategie sono state studiate e applicate diffondendosi in ambito della progettazione sismica strutturale, ma focalizzando l'attenzione sul requisito di sicurezza piuttosto che su quello della funzionalità.

Ad oggi, le strategie progettuali sono incentrate su un cambio di rotta preciso, invertendo le priorità e focalizzando l'attenzione sul requisito della *funzionalità* [Khoraskani, 2015], soprattutto in riferimento alla protezione degli elementi non strutturali, tra cui l'involucro edilizio. I concetti di dissipazione dell'energia e di isolamento meccanico sono stati affrontati finora in linea teorica e generale, di seguito, la trattazione persegue verso l'analisi di alcune ricerche condotte in passato [Henry & Roll, 1986; Thiel et al., 1986; Sack et al., 1989] per l'applicazione delle tali tecnologie nei sistemi di rivestimento degli edifici e nei sistemi di facciata continua.

Gli autori hanno dimostrato come il concetto di dissipazione dell'energia sia relativo per lo più ai sistemi di rivestimento pesanti. Diversamente, l'isolamento meccanico è risultato più congruente sia per i sistemi di rivestimento leggeri che per i sistemi di facciata continua finanche per i sistemi di rivestimento pesanti. Il motivo è che questi concetti sono storicamente incorporati nella progettazione degli edifici soprattutto dai progettisti strutturali, e nel caso dei sistemi di rivestimento pesanti la quantità di energia dissipata, che è proporzionale al peso del sistema di facciata, è di valori che a volte possono influenzare significativamente il comportamento sismico della struttura dell'edificio.

Per questo motivo, l'incorporazione di dispositivi per la dissipazione dell'energia nei sistemi di rivestimento leggeri ha suscitato minore interesse, sebbene ci si aspetti un miglioramento delle loro performance in caso di carichi ciclici. Pochi ricercatori hanno eseguito test sperimentali e ricerche sulle performance dei sistemi di rivestimento attualmente utilizzati [Khoraskani, 2015].

In contrapposizione a questo filone di ricerca, Abtahi [2017] affronta tale tematica di ricerca dimostrando come l'approccio di *dissipazione dell'energia* possa risultare una *strategia virtuosa* per il miglioramento delle prestazioni sismiche nei sistemi di facciata continua. Nell'analisi critica dello stato dell'arte, l'autore dimostra come l'introduzione dello smorzamento nei sistemi strutturali si sia tradotto come metodo efficace per ridurre gli effetti dei carichi dinamici su tali sistemi. Ciò in linea con quanto espresso da McNamara et al., [1997], inerente la pratica di introdurre "*un sistema separato per aumentare lo smorzamento negli edifici*".

Questa strategia è stata introdotta grazie agli studi condotti dagli ingegneri del vento, attraverso l'applicazione di tali dispositivi in strutture di grandi dimensioni come il World Trade Centre [Mahmoodi et al., 1987] e il Citicorp Center [McNamara, 1977] di New York. Nella progettazione di edifici alti, gli ingegneri devono ipotizzare un livello di smorzamento naturale della struttura per valutare l'abitabilità dell'edificio durante le frequenti tempeste di vento.

L'effettivo smorzamento nelle strutture edilizie è una quantità difficile da misurare prima della costruzione dell'edificio e varia con i livelli di risposta, il tipo di sistemi strutturali, i sistemi di rivestimento e i materiali utilizzati per la costruzione. Riconoscendo l'incertezza associata alla stima dello smorzamento naturale dei sistemi strutturali, gli ingegneri hanno introdotto nella progettazione degli edifici sistemi di dissipazione dell'energia per aumentare lo smorzamento. I maggiori sforzi della progettazione antisismica risiedono nella risoluzione dei problemi di comfort dovuti al movimento degli edifici (Fig. 3).

In questo senso, la capacità di smorzamento risulta una strategia virtuosa per la diminuzione delle oscillazioni dovute dalle azioni fenomenologiche esterne.

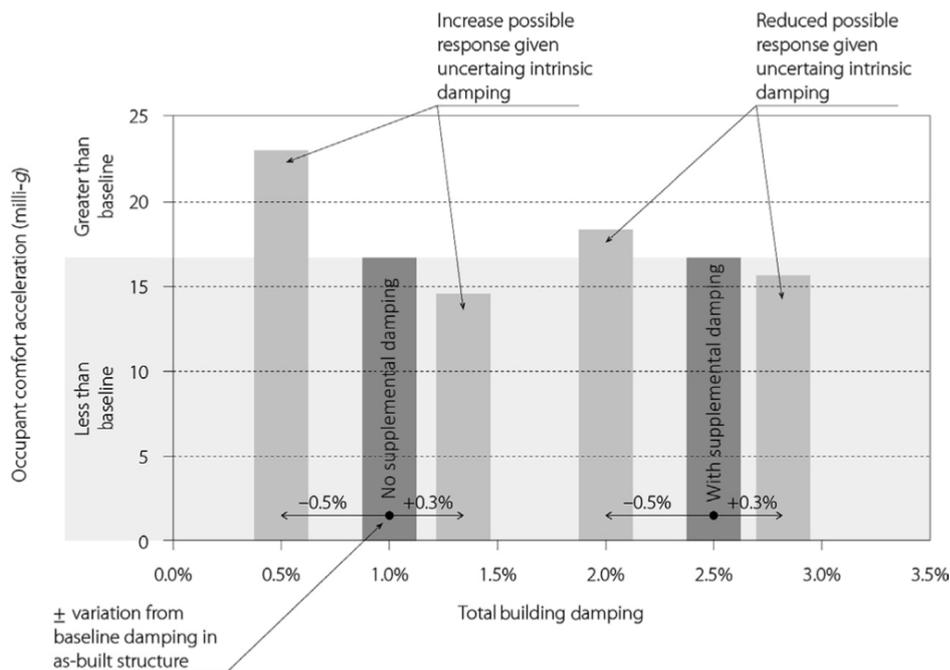


Fig. 3. Livello di comfort degli occupanti senza smorzatori (Source: Lago et al., 2018)

A questa considerazione però si deve aggiungere la difficoltà di riuscire a stimare in modo analitico la quantità delle azioni-effetti a cui un edificio e in questo caso particolare, un sistema di facciata può essere sottoposto durante il suo ciclo di vita.

Nella progettazione antisismica delle strutture vengono calcolate le caratteristiche dinamiche della struttura – ad esempio il periodo di vibrazione e/o la massa – e viene effettuata una *stima dello smorzamento* naturale in base al tipo di sistema di resistenza ai carichi laterali e ai materiali utilizzati nella costruzione. In questo scenario emerge come a causa dell'attuale mancanza di procedure computazionali efficienti, gli autori coinvolti nel processo di progettazione basino le loro scelte sui livelli previsionali di risposta per i diversi valori di smorzamento ipotizzati.

Nella maggior parte dei casi, la scelta ricade su un livello di smorzamento che sia in grado di soddisfare i criteri di progettazione appropriati. Stewart et al. [1999] hanno dimostrato come l'utilizzo di dispositivi di smorzamento nei sistemi struttura, sia in grado di dissipare la maggior parte dell'energia in ingresso applicata agli edifici in caso di terremoti moderati. Pertanto, la risposta strutturale può essere ridotta del 40-60% rispetto alle strutture tradizionali prive di un sistema di dissipazione dell'energia e, di conseguenza, diminuisce il rischio di rottura. Per queste ragioni, si afferma che la capacità di smorzamento identifica un argomento importante e una tematica di ricerca specifica, intesa come strategia di mitigazione sismica capace di ridurre i danni ai componenti non strutturali. Come ormai acclarato, gli smorzatori meccanici possono dissipare la maggior parte dell'energia di vibrazione applicata agli edifici durante i terremoti, la cui installazione può avvenire sui controventi, pareti, giunti, parti di connessione, elementi non strutturali o qualsiasi altro spazio appropriato nelle strutture [Abtahi, 2017].

Dalla consapevolezza che il comportamento dinamico dei sistemi di facciata possa essere migliorato attraverso l'utilizzo di dispositivi basati sul controllo passivo e monitoraggio delle vibrazioni, diversi studi scientifici [Greco & Marano, 2016; Nestovito & Occhiuzzi, 2016;

Oinam & Sahoo, 2017; Bedon & Amadio, 2018] stanno focalizzando l'attenzione verso lo sviluppo di questa tematica di ricerca. Negli ultimi anni, infatti, si sono affermate tecnologie affidabili per il controllo dei danni, sviluppando anche metodi migliori per dettagliare i componenti non strutturali. I recenti sviluppi nella simulazione computazionale - basati su una migliore conoscenza del comportamento strutturale - sono finalizzati alla previsione più realistica ed affidabile dei possibili danni che insorgono durante gli eventi sismici. Questi progressi significativi rendono possibile progettare *edifici economicamente sostenibili* che subiranno molti meno danni in caso di forti terremoti rispetto agli componenti non strutturali convenzionali progettati secondo i codici. Incorporando una progettazione migliorata per minimizzare le richieste sismiche e per aumentare la capacità dei componenti non strutturali, si possono proteggere gli edifici dai danni di rottura oltre a garantire la sicurezza della vita.

Riconosciuta la validità della capacità di smorzamento come strategia di risposta per le prestazioni sismiche, l'attenzione si sposta verso lo studio delle diverse tipologie di smorzatori presenti sul mercato. Ancora una volta esplicitativo è il riferimento alle tecnologie sviluppate in Giappone. Nel corso di quattro decenni molti, infatti, sono stati progettati diversi tipi di dispositivi di smorzamento come ad esempio smorzatori passivi, smorzatori isteretici - che utilizzano acciaio standard o acciaio a bassa resistenza - smorzatori per olio, smorzatori viscosi per pareti, smorzatori per attrito e così via. Questi dispositivi sono generalmente combinati in modo integrato rispetto le strutture, diventando elementi costitutivi del progetto, al fine di ridurre in modo ottimale le vibrazioni dell'edificio dovute al carico del sisma e/o del vento [Nakai, 2015]. Tale tematica rappresenta il *focus* del successivo paragrafo.

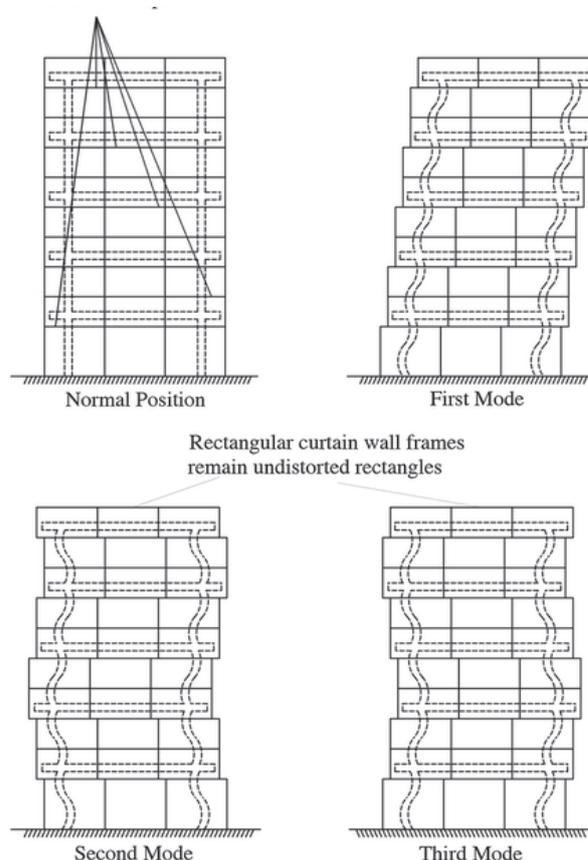


Fig. 4. Modi di vibrazione di un tipico telaio di un edificio e la sua relazione con le facciate continue. (Source: Arnold, 2016)

3.2 Gli elementi costitutivi degli smorzatori in base alla classificazione tipologica-funzionale

Prima di affrontare la critical-review inerente l'utilizzo di dispositivi di risposta dinamica nei sistemi di facciata continua, risulta necessario compiere una disamina relativa alle tipologie delle tecnologie basate sullo smorzamento presenti attualmente sul mercato. Ai fini di questo passaggio, si specifica che tali tipologie riguardano le applicazioni all'interno dei sistemi strutturali. Le principali categorie di dispositivi o smorzatori per modificare il movimento degli edifici, classificate in base al meccanismo di controllo della risposta che utilizzano, sono le seguenti:

- i. *passivi*;
- ii. *attivi*;
- iii. *ibridi*;
- iv. *semi-attivi*;
- v. *adattivi*.

Su di essi si basano diverse considerazioni relative alla progettazione, installazione e durata, in modo tale da raggiungere prestazioni dell'intero edificio più affidabili e per un determinato livello di pericolo [Lago et al., 2018].

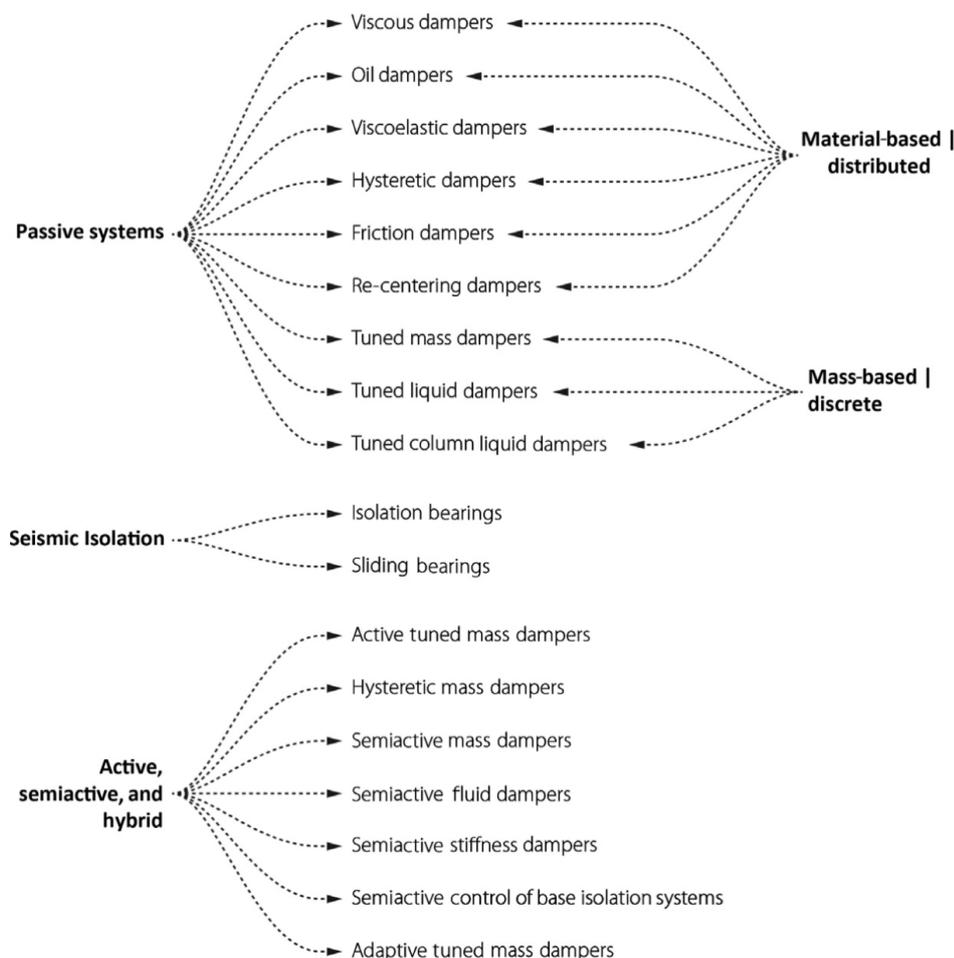


Fig. 5. Categorie e tipologie dei sistemi di smorzamento per edifici alti (Source: Lago et al., 2018)

I *sistemi passivi* non necessitano di alcuna fonte esterna per essere attivati, si basano tipicamente sul movimento naturale del sistema strutturale [Spencer & Nagarajaiah, 2003] e sono classificati in tre principali categorie in base alla loro dipendenza, ovvero:

- dipendenti dallo spostamento;
- dipendenti dalla velocità;
- dipendenti dal movimento.

Tabella 1. Categorie di dispositivi passivi di smorzamento aggiunto

Dipendenti dallo spostamento	Dipendenti dalla velocità	Dipendenti dal movimento	Altre categorie
- Metallici; - Autoricentrativi	- Viscosi	- A massa accordata-TMD; - A liquido sintonizzato – TLD	- Viscoelastici - A frizione

I sistemi passivi sono generalmente affidabili e hanno bassi requisiti di manutenzione, poiché non sono influenzati dalle interruzioni di corrente elettrica che avvengono in modo comune durante i terremoti. Poiché non inviano energia al sistema, sono in grado di stabilizzare il movimento strutturale. Le forze di controllo sono generate in funzione della risposta della struttura nel punto in cui si trova il sistema di controllo passivo.

Questi sistemi aumentano la capacità di dissipazione dell'energia di una struttura attraverso dispositivi localizzati e discreti di dissipazione dell'energia [Thambiratnam, 2010]. Le nuove strutture di ingegneria civile tendono ad essere più leggere e più snelle e ad avere una minore capacità di smorzamento naturale rispetto ad edifici storici. Questa tendenza ha aumentato l'importanza della tecnologia di smorzamento per ridurre l'impatto o l'intensità delle vibrazioni indotte da terremoti e vento [Shiba et al., 1998].

I sistemi passivi aumentano la capacità di dissipazione dell'energia di una struttura attraverso dispositivi di dissipazione dell'energia localizzati e discreti, situati all'interno di un sistema di isolamento sismico o sull'altezza della struttura [Kitagawa & Midorikawa, 1998]. A seconda della loro costruzione, questi sistemi possono anche aumentare la rigidità e la resistenza della struttura a cui sono collegati.

L'applicazione diffusa dei tradizionali smorzatori in acciaio, come sistemi antisismici il cui principio si basa sulla dissipazione dell'energia risiede negli aspetti tecnici. Infatti, oltre ad essere facilmente sostituibili sono progettati per consentire la concentrazione delle deformazioni anelastiche allo scopo di proteggere le membrature principali del telaio. Questo approccio progettuale può apportare significativi miglioramenti in termini di *sicurezza* ed *economia*, oltre a migliorare le *performance sismiche accettabili* [Seo et al., 2015].

Sebbene questi smorzatori di energia in acciaio migliorino il controllo dei danni e la protezione dei componenti strutturali, la loro deformazione permanente in caso di forti terremoti può provocare inaspettate deviazioni residue tra i piani dell'intero telaio dell'edificio [Ghabraie et al., 2010; Karavasilis et al., 2012; Hu, 2014].

McCormick et al. [2010] hanno dimostrato come in Giappone quando i *drift* residui massimi tra i piani sono superiori allo 0,5%, i proprietari preferiscono ricostruire l'edificio piuttosto che incorrere nei costi di ristrutturazione. Pertanto, per una progettazione a-sismica, dovrebbero essere necessari ulteriori elementi di contenimento sismico combinati in parallelo con lo smorzatore di dissipazione dell'energia di retrofit, integrando la resistenza e la rigidezza della struttura con l'obiettivo di ridurre i drift tra i piani.

Attraverso uno studio recentemente condotto, gli autori Bedon e Amadio [2018] e Banerjee et al. [2022] hanno dimostrato come tra le possibili soluzioni tecnologiche passive attualmente disponibili o in fase di studio per la mitigazione degli edifici multipiano, i gli smorzatori a massa accordata, *TMD*, sono ampiamente utilizzati in ingegneria strutturale. Tali soluzioni vengono applicate per ridurre gli spostamenti e le accelerazioni traslazionali dovuti al vento e ai carichi sismici negli edifici o nelle infrastrutture [Gaspar et al., 2016; Poh'Sie et al., 2016; Song et al., 2016].

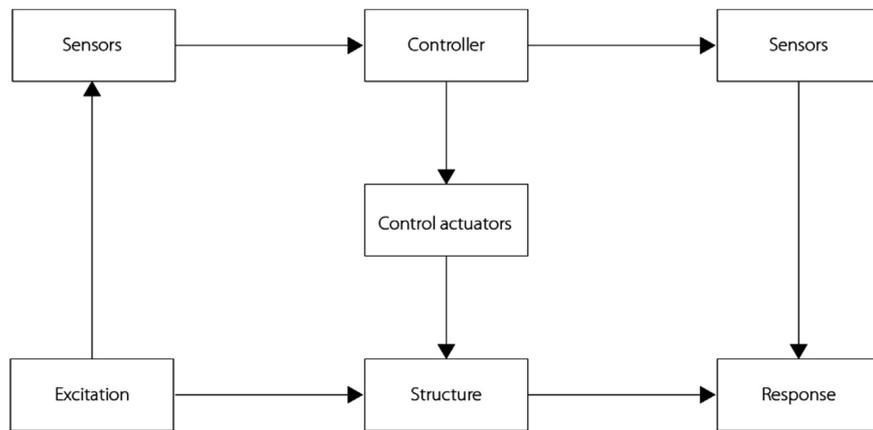
Den Hartog [1985] ha sviluppato, per primo, espressioni analitiche per determinare i valori ottimali di massa, frequenza e rapporti di smorzamento del TMD in funzione delle proprietà dinamiche della struttura. Per queste ragioni, negli anni molti studi sperimentali [Lee et al., 2006; Hoang et al., 2008; Mohebbi et al., 2012] si sono concentrati sulla progettazione ottimali di tali soluzioni tecnologiche. Elias e Matsagar [2017] hanno presentato una rassegna completa di queste varie teorie di progettazione ottimale e degli studi sulle performance condotti sui TMD passivi. Gli autori hanno dimostrato come questi dispositivi di risposta dinamica passiva seppur ottimizzati per essere efficaci in una determinata condizione di carico non riescono a tenere conto dei diversi carichi dinamici forti che una struttura può subire nel corso della sua vita.



Fig. 6. Tuned Mass Damper of Taipei 101 – Taipei City, Taiwan - Atlas Obscura

In netta opposizione s'inseriscono i *sistemi attivi*, tali dispositivi hanno la capacità di variare le loro proprietà in base alla struttura e alla sollecitazione esterna. Per questa ragione dotare gli edifici di questa particolare tipologia di dispositivi porta alla definizione di *Adaptive/Smart Building* [Fisco & Adeli, 2011a]

Fig. 7. Sistema di funzionamento delle strutture con dispositivi di smorzamento attivi (Source: Lago et al., 2018).



Come mostrato nella Figura 7, lo sviluppo dei sistemi di smorzamento attivo è guidato da una combinazione di *sensori*, *controller* e *attuatori di controllo*. Gli elementi informatizzati quali sensori e controller sono attuati nei dispositivi di risposta dinamica al fine di registrare le azioni imposte sul sistema. Nello specifico, i sensori misurano lo spostamento lungo il grado di libertà, il controller determina la risposta appropriata da applicare.

La prima importante differenza tra le due categorie analizzate, infatti risiede che *nei sistemi passivi la risposta non necessitano di alcuna fonte esterna per essere attivati, diversamente il funzionamento delle soluzioni antisismiche attive è influenzato dagli impulsi generati dalla corrente elettrica.*

Nello studio condotto da Fisco e Adeli [2011] gli autori hanno stabilito che uno dei primi approcci al controllo attivo delle vibrazioni nelle strutture è stato il sistema Active Tuned Mass Damper, ATMD, o Active Mass Driver, AMD. Tale dispositivo attivo è costituito da un attuatore che posto tra la il sistema strutturale dell'edificio e il sistema a massa accordata, TMD, applica una forza calcolata in tempo reale.

Nella categoria dei dispositivi di controllo attivi Fisco e Adeli [2011b] hanno designato due classi ulteriori: i sistemi ibridi e i semi-attivi.

I *sistemi ibridi* sono una combinazione tra i dispositivi passivi e quelli attivi, in cui la parte del controllo è data dal sistema passivo. In questo modo, l'energia meccanica richiesta è inferiore a quella di un sistema attivo.

Tali dispositivi sono costituiti principalmente da un sistema a massa accordata, TMD passivo e da attuatori aggiuntivi [Maebayshi et al., 1992]. A differenza del sistema attivo, AMD sopramenzionato, *le masse effettive dei sistemi ibridi non vengono azionate direttamente dagli attuatori*, ma vengono utilizzati gli effetti di risonanza per ottenere la forza di controllo richiesta. L'obiettivo pratico di un HMD è quello di *ridurre il tempo di reazione* di un sistema passivo o di introdurre una forza di attivazione sufficiente per i sistemi passivi soggetti ad attrito [Lago et al., 2018]. In questo senso, Fisco e Adeli [2011b] hanno proposto un dispositivo di risposta dinamica ibrido costituito da uno smorzatore di massa attivo e da smorzatori passivi.

I sistemi di controllo semi-attivi prevedono che gli attuatori di controllo non aggiungano alcuna energia meccanica direttamente alla struttura, essi vengono talvolta definiti sistemi "Smart" poiché utilizzano i vantaggi sia dei sistemi passivi che attivi. La differenza rispetto a un AMD è la massa effettiva del sistema che è guidata dall'inerzia, senza l'apporto di una forza esterna [Lago et al., 2018].

In maniera analoga alle tipologie attive e ibridi anche i sistemi semi-attivi riguardano l'applicazione di un sistema avanzato negli smorzatori a massa accordata, TMD.

Per concludere la trattazione circa le tipologie attualmente presenti nel mercato, l'attenzione si focalizza sui *sistemi adattivi*. Questi sono in grado di regolare la rigidità o il coefficiente di smorzamento dei componenti, al fine di adattarsi al sistema ai cambiamenti del sistema a cui è apposto. I sistemi TMD adattivi sono in grado di regolare la rigidità o il coefficiente di smorzamento dei loro componenti, per adattarsi alle variazioni del sistema principale. Rispetto ai sistemi semi-attivi, SATMD, la variazione dei relativi parametri avviene in un arco temporale maggiore rispetto al periodo di tempo effettivo per il quale il sistema TMD è sintonizzato, il che significa che finché il sistema può essere regolato successivamente e non richiede un apporto continuo di energia esterna [Lago et al., 2018].

In linea generale, le tipologie dei dispositivi di risposta dinamica possono essere composte da diversi materiali, costituendo smorzatori di tipo elastoplastico, viscoso o viscoelastico anche secondo la maniera in cui assolvono il loro compito. Dalla trattazione è emerso come allo stato attuale esistono molti dispositivi di smorzamento, per cui risulta difficile individuare quello più adatto per la progettazione antisismica di una determinata struttura. Tale scelta non può essere fatta a priori, infatti durante le fasi di progettazione, gli attori coinvolti nel processo dovranno valutare diversi parametri, tra cui la posizione geografica in cui verrà installato il sistema. In conclusione, si propone una tabella a titolo esemplificativo basata sullo studio condotto da Lago et al. [2018] in cui vengono sintetizzati i principali vantaggi e svantaggi dei dispositivi di smorzamento trattati in questo paragrafo.

Tabella 1. Principali vantaggi e svantaggi dei sistemi di smorzamento attivi, semiattivi e ibridi

Dispositivi	Vantaggi	Svantaggi
- Attivi	<ul style="list-style-type: none"> - Proprietà regolabili in base all'input di eccitazione e alle proprietà dell'edificio; - Dimensioni ridotte rispetto a TMD simili; - Possibilità di sopprimere più modi di vibrazione. 	<ul style="list-style-type: none"> - Problemi di affidabilità in quanto necessitano di energia esterna per essere efficaci; - Possibilità di utilizzarli per alti livelli di eccitazione; - Problemi di affidabilità in quanto necessitano di energia esterna per essere efficaci.
- Ibridi	<ul style="list-style-type: none"> - Minore apporto di energia meccanica rispetto a un sistema attivo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilità di utilizzo per alti livelli di eccitazione; - Problemi di affidabilità in quanto necessitano di energia esterna per essere efficaci.
- Semi-attivi	<ul style="list-style-type: none"> - Minore apporto di energia meccanica rispetto a un sistema attivo, che viene aggiunto allo smorzatore passivo e non direttamente alla struttura; - Funzionamento parziale anche in assenza di corrente (per quanto riguarda i dispositivi passivi). 	<ul style="list-style-type: none"> - Problemi di affidabilità in quanto necessitano di energia esterna per essere efficaci; - Possibilità di utilizzo per alti livelli di eccitazione.
- Adattivi	<ul style="list-style-type: none"> - Rigidità e smorzamento regolabili in un arco di tempo superiore a quello effettivo su cui il TMD è sintonizzato. 	<ul style="list-style-type: none"> - Problemi di affidabilità in quanto necessitano di energia esterna per essere efficaci.

Costruito il quadro teorico di riferimento in cui sono state trattate le principali tipologie di smorzatori presenti sul mercato, la ricerca persegue verso l'analisi di alcuni casi studio inerenti la pratica di utilizzare i dispositivi di risposta dinamica per migliorare il comportamento sismico dei sistemi di facciata continua.

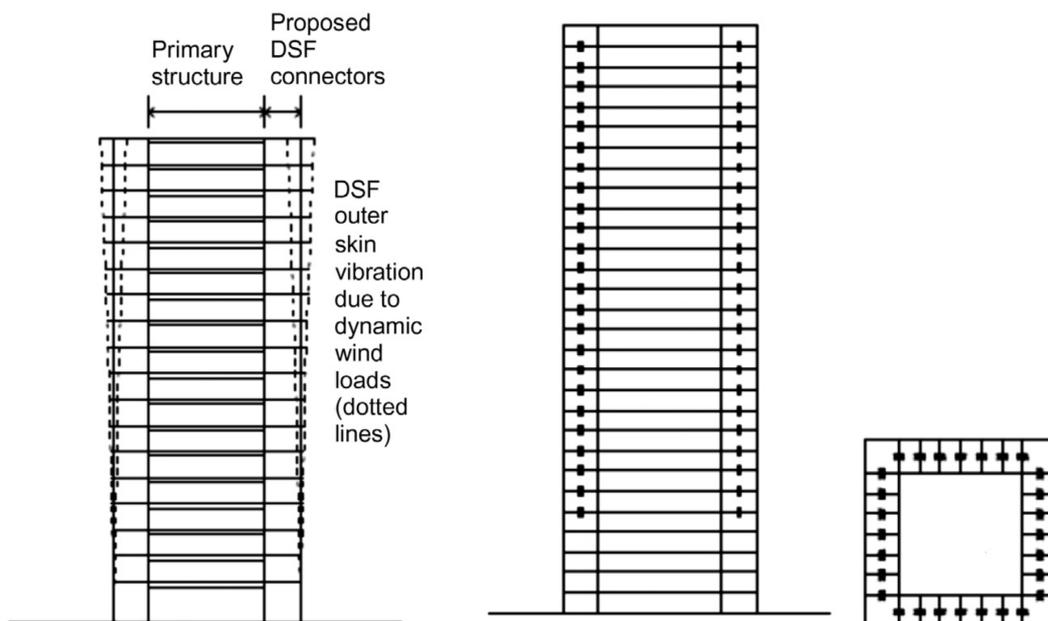
3.3 Casi studio con l'applicazione degli smorzatori in facciata (critical review)

Indagata la capacità di smorzamento come possibile *strategia di risposta* alle azioni indotte durante gli eventi sismici, e analizzate le possibili *tipologie* impiegabili per asseverare tale requisito, la trattazione persegue verso il raggiungimento dell'obiettivo specifico del capitolo. La ricerca, infatti, si propone – in linea con recenti studi scientifici [Bedon e Amadio, 2018; Di Giovanni e Bernardini, 2020] – di *valutare la possibile applicazione di un dispositivo di smorzamento ai sistemi di facciata continua "tradizionali"*, per il miglioramento delle prestazioni sismiche.

Come espresso dagli autori sopracitati, l'avanzamento del progresso tecnologico consente di ipotizzare edifici, i cui *sistemi di rivestimento siano in grado di subire spostamenti* non trascurabili rispetto alla struttura primaria di supporto. I maggiori limiti riguardano il fatto che, durante le fasi di progettazione i progettisti strutturali e quelli che si occupano dei sistemi di facciata non mettono in pratica un approccio olistico e sinergico tra le parti coinvolte nel processo. Nella funzionalizzazione evoluta dell'involucro edilizio, grande attenzione viene posta dagli architetti sugli aspetti formali dei sistemi di facciata continua per cui diventa sempre più importante concentrarsi sui *dettagli di connessione* e sull'*interazione con la struttura primaria*.

L'incorporazione di sistemi di facciata dotati di dispositivi di dissipazione dell'energia per smorzare parte dell'energia sismica durante l'eccitazione del terremoto e lo sviluppo di una nuova generazione di elementi di supporto per le facciate sono, infatti, argomenti "nuovi". Teoricamente, l'idea di sfruttare le vibrazioni delle facciate per migliorare le prestazioni dell'edificio è stata esplorata, per la prima volta, da Moon all'interno del testo "*Tall building motion control using double skin façades*" [2009], attraverso l'uso di sistemi di controllo delle vibrazioni all'interno dei sistemi di facciata continua e in modo particolare nei sistemi di facciata a doppia pelle.

Fig. 8. Integrazione dei dispositivi dell'energia nei sistemi di facciata a doppia pelle (Source: Moon, 2009).



L'autore ha proposto che, negli edifici con sistemi di rivestimento a doppia pelle, poteva essere sfruttato lo spostamento relativo tra la facciata e la struttura principale per migliorare il comportamento dinamico degli edifici alti soggetti alle azioni del vento.

Successivamente autori come Fu e Zhang [2016], Pipitone et al. [2018] hanno approfondito l'idea di utilizzare la massa della facciata per ridurre le vibrazioni della struttura principale.

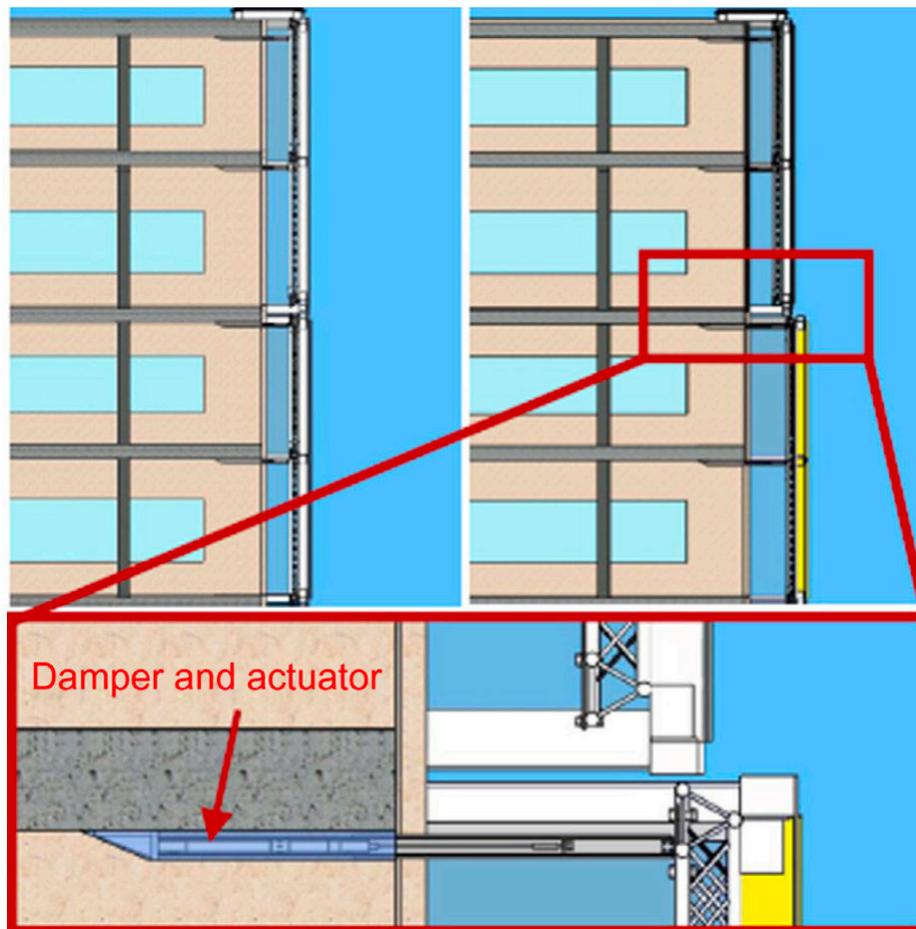


Fig. 9. Interazione tra i dispositivi di smorzamento attivi e sistema di facciata a doppia pelle (Source: Fu & Zhang, 2016).

Il principio di funzionamento è assimilabile ai sistemi passivi a massa accordata, TMD – discussi nel precedente paragrafo – ma senza la necessità di dotare l'edificio di massa aggiuntiva e con il vantaggio di risparmiare spazio utile per l'alloggiamento dei dispositivi di smorzamento delle vibrazioni.

In questo senso, i sistemi di facciata a doppia pelle fungono da *sistemi di controllo passivo delle vibrazioni* per edifici alti sotto il vento o carichi laterali sismici [Beton & Amadio, 2017]. Per il caso studio specifico, Moon [2016] ha dimostrato come l'utilizzo degli smorzatori in questa tipologia di facciata abbia ridotto – quasi del 35% – gli effetti sismici in edifici alti. I maggiori sforzi sono stati legati all'esigenza di risolvere alcune problematiche⁵ relative alla progettazione dei dispositivi a massa accordata.

Lo studio affrontato però riguarda sistemi a facciata a doppia pelle in edifici alti, talvolta la massa complessiva – in linea con le considerazioni critiche espresse da Khoraskani [2015] – è insufficiente a considerare i sistemi di facciata continua tradizionali o monoliti come dispositivi a massa accordata.

In questo scenario, Di Giovanni e Bernardini [2018] hanno affrontato la valutazione del comportamento dinamico dei sistemi di facciata continua tradizionali raffrontato a quello dei sistemi di facciata a doppia pelle. In linea teorica, dal punto di vista della dinamica strutturale, un edificio dotato di una facciata continua tradizionale può essere sovrapponibile a un edificio dotato di dispositivi a massa accordata. Il comportamento dinamico degli edifici con smorzatori passivi è noto fin dagli anni '60 e le sue caratteristiche principali sono state ampiamente indagate e discusse dalla dinamica strutturale. Al contrario, il comportamento degli edifici con facciate continue tradizionali sono di recente osservazione, probabilmente ciò è dovuto alla mancanza di potenziali applicazioni. Per questo motivo, un gran numero di ricerche si sono focalizzate su soluzioni alternative all'utilizzo di sistemi di smorzamento nei sistemi di facciata continua.

In questo scenario un importante riferimento riguarda lo studio condotto da Arup [2009] e successivamente ripreso da Lago et al. [2018]. Questo viene ripreso attraverso la disamina di due progetti: Sony City e Mode Gakuen a Tokyo, le cui fasi di progettazione antisismica hanno occupato un ruolo fondamentale.

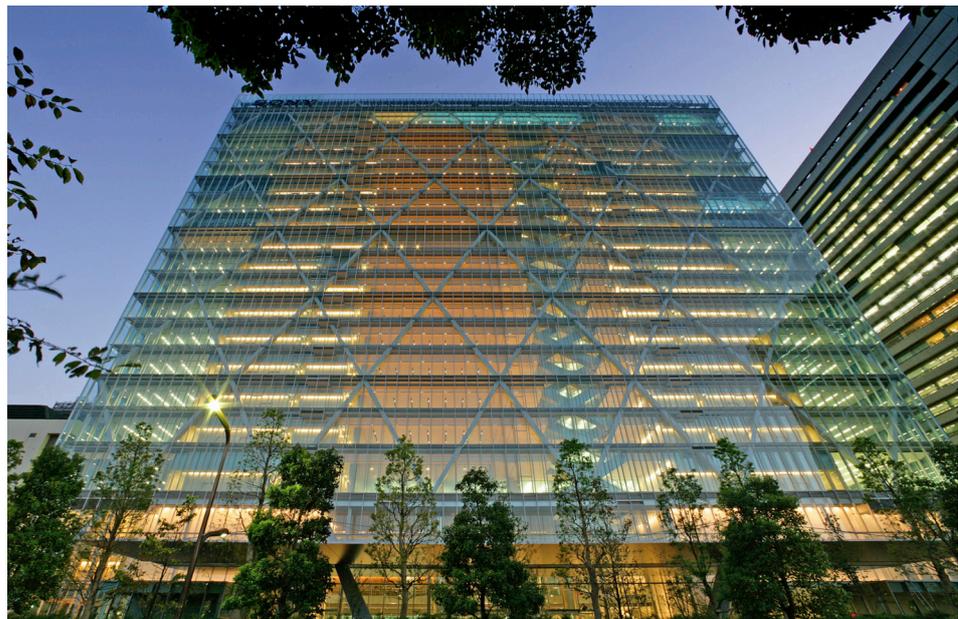


Fig. 10. Sony City Tokyo-
Arup, Tokyo (2006).

Il primo caso, Sony City (Fig. 10), riguarda un progetto proposto da Arup nel tentativo di rispondere in modo complessivo, sia rispetto ai componenti strutturali che a quelli non strutturali, alle possibili azioni sismiche a cui sarà sottoposto l'edificio in caso di terremoti con magnitudo elevata. Con riferimento alle tecnologie impiegate per i sistemi di rivestimento, il progetto è costituito da un complesso sistema "a diamante" a doppia pelle, che se da un lato funge come una buona strategia per l'isolamento acustico e termico, dall'altro lato desta forti preoccupazioni per la risposta sismica. Il risultato è stato progettare una facciata pesante e antieconomica, dovendo ricorrere alla strategia di isolare alla base l'intera struttura.

Diversamente Mode Gakuen (Fig. 11) si basa su un sistema a griglia ellittica in cui i telai della facciata sono connessi rigidamente tra loro e alla base della struttura. Grazie a queste connessioni, la flessione di ciascun telaio provoca una notevole deformazione a taglio in prossimità dei piani centrali del telaio centrale interno [Lago et al., 2018]. Questa deformazione rende adatto l'utilizzo di smorzatori a taglio (distribuiti) per dissipare efficacemente la risposta sismica [Arup, 2009].



Fig. 11. Mode Gakuen Cocoon Tower. Tange Associates, Tokyo (2008).

Pertanto, gli smorzatori viscosi a olio sono stati distribuiti orizzontalmente. Dalla trattazione dei casi studio analizzati emergono alcuni limiti critici, il primo fa tutti inerente lo studio condotto da Moon [2009] è la valutazione che l'applicazione dei dispositivi di smorzamento seppur fattibile e vantaggiosa per i sistemi di facciata a doppia pelle è difficilmente applicabile nei sistemi di facciata continua tradizionale. Tali limiti, rispetto l'adozione di questa soluzione, risiedono non solo in costi elevati ma anche alla difficoltà di progettazione, caratteristiche dimensionali elevate nonché pratiche di non semplice manutenzione, essendo nella maggior parte costituiti da una serie di elementi, quali attuatori e sensori. Diversamente gli studi che hanno riguardato soluzioni tecnologiche alternative agli smorzatori hanno comportato, nella maggior parte dei casi, ad un aumento dei costi per la realizzazione dell'edificio e a dover comunque ricorrere ad altre soluzioni antisismiche.

In questo senso, la presente ricerca riconosce la capacità di smorzamento come strategia virtuosa per la risposta sismica dei sistemi di facciata continua, focalizzando l'attenzione su un altro importante filone di ricerca incentrato sullo studio e analisi dei componenti di connessione avanzata capaci di far fungere l'intero sistema di facciata come un dispositivo di smorzamento.

3.4 Valutazione critica dei risultati ottenuti



Fig. 12. Technologies Readiness Level TRL.

Sintetizzando quanto emerso dalle trattazioni sinora affrontate, l'inquadramento del problema scientifico rispetto la "*funzionalizzazione evoluta dell'involucro edilizio*" ha condotto la ricerca verso l'indagine della sua vulnerabilità sismica, spostando l'attenzione sulle possibili strategie di mitigazione sismica. Questi temi di ricerca, *focus* dei primi tre capitoli della tesi, costituiscono gli step fondamentali per il raggiungimento del primo livello di maturità tecnologica, TRL 1 "*Osservazione dei principi fondamentali*".

Infatti, durante la disamina, condotta nel capitolo precedente, sulla vulnerabilità di alcuni elementi critici, che insorgono durante gli eventi sismici, la ricerca si è incentrata sull'indagine delle *strategie di mitigazione sismica* che sono state proposte nel corso degli anni.

La mancanza di procedure prescrittive e linee guida per la progettazione dei sistemi di facciata continua porta di fatto a sovradimensionare alcuni componenti soprattutto in riferimento ai sistemi di connessione, attraverso soluzioni che prevedono sezioni piene con un aumento di materiale. In questo senso, la capacità di risposta dell'involucro edilizio soddisfa i requisiti di massa e rigidità che, non sempre, sono risultate come strategie valide, soprattutto in termini economici e di risorse.

Proveniente dalle strategie di mitigazione sismica dei sistemi strutturali un altro importante requisito, per la risposta alle vibrazioni indotte dalle azioni del terremoto, potrebbe essere la *capacità di smorzamento*. Questo requisito può essere ottenuto attraverso la progettazione dei cosiddetti dispositivi di risposta dinamica o smorzatori. Con l'applicazione di tali dispositivi si è dimostrato come il comportamento strutturale, ai fini delle condizioni di sicurezza, migliorasse le sue performance diminuendo le sollecitazioni e le vibrazioni che ne seguono per effetto delle azioni sismiche e aumentando di conseguenza il livello di "*comfort*" degli occupanti.

Con questi assunti, si può affermare che la progettazione di questi elementi può avvenire secondo due principi:

- *sfruttando la dissipazione dell'energia;*
- *isolando meccanicamente alcuni elementi strutturali.*

Tra i due concetti di dissipazione energetica e isolamento meccanico, il primo è praticato esclusivamente nei sistemi di rivestimento pesanti, mentre il secondo è praticato sia nei sistemi di rivestimento leggeri che nelle facciate continue.

Per meglio comprendere il principio di funzionamento dei dispositivi di risposta dinamica, la disamina è avvenuta attraverso la scomposizione tassonomica dei componenti tipologici e funzionali degli *smorzatori*, applicati nei sistemi strutturali. Identificando, nelle varie tipologie, alcuni vantaggi e svantaggi che ne conseguono con l'utilizzo. Seppur infatti i dispositivi attivi propongono soluzioni altamente reattive, la loro complessità – costituita da elementi informatizzati e digitalizzati – è correlata alla necessità di utilizzo di fonti energetiche per la loro attivazione, perdendo di vista un aspetto fondamentale.

Durante gli eventi sismici, l'interruzione dell'elettricità potrebbe causare il non-funzionamento degli elementi e di conseguenza non essere in grado di assolvere la funzione per i quali sono stati progettati. Un altro aspetto critico dei dispositivi digitalizzati riguarda il requisito della "*manutenibilità*" di tali elementi. Questi vengono, di fatto, installati tra i componenti strutturali e talvolta sono difficilmente ispezionabili.

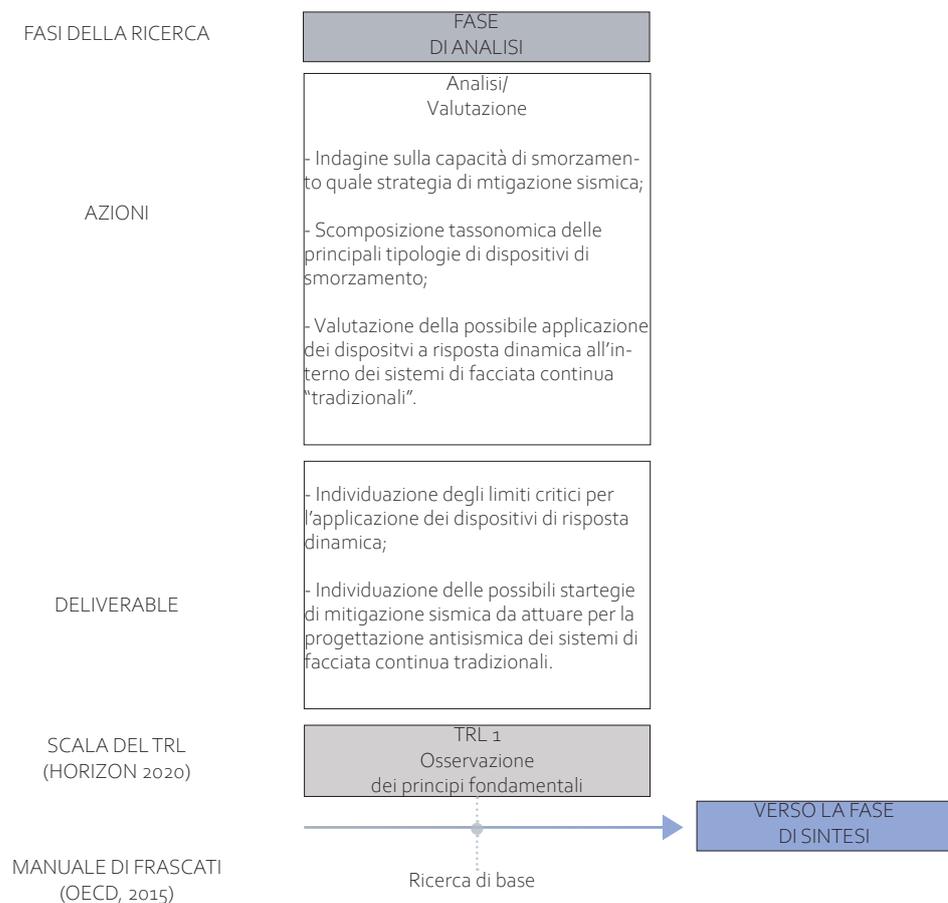
Per questo motivo utilizzare *sistemi tecnologici* costituiti da *sensori* e *controller*, potrebbe inficiare le attività di sostituzione *compromettendo il funzionamento complessivo* degli smorzatori. Dai limiti critici emersi, le linee di ricerca si orientano verso dispositivi di tipo passivo, in cui l'innovazione di prodotto può essere attuata attraverso l'applicazione di materiali, le cui capacità adattive risiedono nelle proprietà intrinseche degli stessi.

Dall'analisi di queste strategie, alcuni ricercatori hanno indagato la possibilità di applicare questa soluzione anche per migliorare il *comportamento dei sistemi di facciata*, proponendola, in prima battuta, come soluzione nei casi di facciata a doppia pelle. Questa strategia di mitigazione sismica è stata esplorata teoricamente per la prima volta da Moon, nel caso

di facciate Double Skin, appunto, in edifici alti sottoposti ai carichi sismici e del vento. Per il caso studio specifico, l'autore ha dimostrato come l'utilizzo degli smorzatori in questa tipologia di facciata abbia ridotto – quasi del 35% – gli effetti sismici.

Attraverso l'analisi dei casi studio, l'ipotesi avanzata ha subito gli effetti di alcune considerazioni critiche emerse, ovvero l'adozione di questa soluzione in tipologie di facciate continue "tradizionali", comporta costi elevati ma anche difficoltà di progettazione, caratteristiche dimensionali elevate – che ne impediscono l'alloggiamento e inficiano le condizioni di servizio –, nonché pratiche di non semplice manutenibilità, essendo nella maggior parte costituiti da una serie di elementi, quali attuatori, sensori e, in alcuni casi, controller che ne ostacolano anche l'ispezionabilità.

In un quadro di sintesi, sviluppato attraverso l'analisi critica di sistemi dotati da questi dispositivi, è stata avanzata l'ipotesi di valutare le *capacità della facciata di fungere come un dispositivo di assorbimento di energia*, assumendo il valore ottimale delle proprietà degli smorzatori di facciata. Risulta necessario, pertanto, avanzare la conoscenza nei sistemi di *connessione flessibile* per garantire, nelle condizioni di servizio la loro funzionalità, non solo nei confronti dei requisiti ambientali che influenzano il corretto uso dell'edificio, ma anche e soprattutto per garantire la sicurezza delle persone.



Note

1. Più una struttura è rigida, meno si deforma per effetto delle azioni sismiche, edifici sufficientemente resistenti, ma poco rigidi (flessibili) presentano spostamenti grandi. In questo caso gli elementi non strutturali potrebbero danneggiarsi e/o ribaltare. Lo smorzamento è la capacità propria dell'oggetto di dissipare energia attraverso fenomeni dissipativi complessi (comportamento plastico, attrito, ingranamento, scorrimenti). Tratto da Lago, A., Trabucco, D., & Wood, A. (2018). *Damping technologies for tall buildings: Theory, design guidance and case studies*. Butterworth-Heinemann. ISBN: 978-0-12-815963-7.

2. Le applicazioni civili hanno iniziato a essere sviluppate alla fine degli anni '70, con lo sviluppo di cuscinetti elastomerici multistrato. Tratto da Naeim, F., & Kelly, J. M. (1999). *Design of seismic isolated structures: from theory to practice*. John Wiley & Sons.

3. Si definiscono dispositivi di smorzamento i componenti che smorzano gli effetti delle forze sismiche consumando energia attraverso la loro deformazione. I dissipatori possono essere di tipo elastoplastico, viscoso o viscoelastico secondo la maniera in cui assolvono il loro compito e dei materiali di cui sono composti e possono suddividersi in tre principali categorie: passivi, attivi e semi-attivi. Tratto da *Modulo.net* (Disponibile sul sito: <https://modulo.net/it/approfondimenti/protezione-sismica-mediante-dispositivi-antisismici>).

4. Come emerso nel capitolo precedente, uno tra i maggiori rischi dei sistemi di facciata continua sollecitati dalle azioni sismiche riguarda il contatto critico vetro-telaio, ciò comporta, nella maggior parte dei casi, una rottura di tipo fragile del sistema vetrato.

5. I TMD sono generalmente molto grandi e posizionati vicino alla parte superiore di edifici alti per le loro prestazioni effettive. Di conseguenza, lo spazio occupabile molto prezioso vicino alla sommità di edifici alti viene sacrificato per contenere grandi TMD. Inoltre, installare sistemi TMD significa aggiungere masse aggiuntive a edifici alti. Attraverso il sistema di interazione TMD/DSFD, anche questi problemi possono essere sostanzialmente affrontati. Tratto da Moon, K. S. (2016). Integrated damping systems for tall buildings: tuned mass damper/double skin facade damping interaction system. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 25(5), 232-244.

Riferimenti bibliografici

- Abtahi, P. (2017). *Energy Dissipating Facade Systems Designed to Reduce Structural Response During Earthquakes* (Doctoral dissertation, Western Sydney University (Australia)).
- Aiken, I. D., Nims, D. K., Whittaker, A. S., & Kelly, J. M. (1993). Testing of passive energy dissipation systems. *Earthquake spectra*, 9(3), 335-370.
- Almufti, I., & Willford, M. (2013). *REDi™ rating system: resilience-based earthquake design initiative for the next generation of buildings*.
- Adachi, K., Kitamura, Y., & Iwatsubo, T. (2004). Integrated design of piezoelectric damping system for flexible structure. *Applied Acoustics*, 65(3), 293-310. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2003.08.005>
- Amadio, C., & Bedon, C. (2012). Elastoplastic dissipative devices for the mitigation of blast resisting cable-supported glazing façades. *Engineering Structures*, 39, 103-115. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.02.006
- Anwar, N., Najam, F. A., Aung, T. H., & Norachan, P. (2016). From Performance to Resilience—A Recent Account of Seismic Design Philosophy. *ASEP a-16 Concept*.
- Arup (2009). Sony City, Tokyo: A Diagrid Combined with Base Isolation. *The Arup Journal*, 2, 49-51.
- Arnold, C., (2016). *Seismic Safety of the Building Envelope*. Whole Building Design Guide.
- 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, 165-182.
- Banerjee, S., Ghosh, A., & Matsagar, V. A. (2022). Optimum design of nonlinear tuned mass damper for dynamic response control under earthquake and wind excitations. *Structural Control and Health Monitoring*, e2960.
- Bedon, C., & Amadio, C. (2017). Passive control systems for the blast enhancement of glazing curtain walls under explosive loads. *The Open Civil Engineering Journal*, 11(1). DOI: 10.2174/1874149501711010396
- Bedon, C., & Amadio, C. (2018). Numerical assessment of vibration control systems for multi-hazard design and mitigation of glass curtain walls. *Journal of Building Engineering*, 15, 1-13.
- Bedon, C., Honfi, D., Kozłowski, M., Vokáč Machalická, K., Santos, F., Wüest, T., ... & Vokáč, M. (2018). *Key structural aspects for adaptive facades-Activity progress from the EU-COST Action TU1403'Structural Task Group*.
- Bedon, C., Honfi, D., Machalická, K. V., Eliášová, M., Vokáč, M., Kozłowski, M., ... & Portal, N. W. (2019a). Structural characterisation of adaptive facades in Europe—Part I: Insight on classification rules, performance metrics and design methods. *Journal of Building Engineering*, 25, 100721.
- Bedon, C., Honfi, D., Machalická, K. V., Eliášová, M., Vokáč, M., Kozłowski, M., ... & Portal, N. W. (2019b). Structural characterisation of adaptive facades in Europe—Part II: Validity of conventional experimental testing methods and key issues. *Journal of Building Engineering*, 25, 100797.
- Bernardini, D., & Rega, G. (2017). Evaluation of different SMA models performances in the nonlinear dynamics of pseudoelastic oscillators via a comprehensive modeling framework. *International Journal of Mechanical Sciences*, 130, 458-475. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.06.023>
- Biswal, A., & Swain, S. K. (2020). Smart composite materials for civil engineering applications. *Polymer nanocomposite-based smart materials*, 197-210. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-103013-4.00011-X>
- Calvi, G. M., Sullivan, T. J., & Welch, D. P. (2014). A seismic performance classification framework to provide increased seismic resilience. *Perspectives on European earthquake engineering and seismology*, 361-400. DOI 10.1007/978-3-319-07118-3
- Chase, J. G., Mulligan, K. J., Gue, A., Alnot, T., Rodgers, G., Mander, J. B., ... & Heaton, D. (2006). Re-shaping hysteretic behaviour using semi-active resettable device dampers. *Engineering Structures*, 28(10), 1418-1429. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.01.011>
- Constantinou, M. C., Soong, T. T., & Dargush, G. F. (1998). *Passive energy dissipation systems for structural design and retrofit*. ISBN 0-9656682-1-5
- Den Hartog, J. P. (1985). *Mechanical vibrations*. Courier Corporation.
- Di Giovanni, G., & Bernardini, D. (2020). Vibration damping performances of buildings with moving facades under harmonic excitation. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 1-10.
- Elias, S., & Matsagar, V. (2017). Research developments in vibration control of structures using passive tuned mass dampers. *Annual Reviews in Control*, 44, 129-156.
- Feese, C., Li, Y., & Bulleit, W. M. (2015). Assessment of seismic damage of buildings and related environmental impacts. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 29(4), 04014106. DOI:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000584

- Filiatrault, A., & Sullivan, T. (2014). Performance-based seismic design of nonstructural building components: The next frontier of earthquake engineering. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 13(1), 17-46.
- Filiatrault, A., Perrone, D., Merino, R. J., & Calvi, G. M. (2021). Performance-based seismic design of nonstructural building elements. *Journal of Earthquake Engineering*, 25(2), 237-269
- Fisco, N. R., & Adeli, H. (2011a). Smart structures: part I—active and semi-active control. *Scientia Iranica*, 18(3), 275-284.
- Fisco, N. R., & Adeli, H. (2011b). Smart structures: part II—hybrid control systems and control strategies. *Scientia Iranica*, 18(3), 285-295.
- Fu, T. S., & Zhang, R. (2016). Integrating double-skin façades and mass dampers for structural safety and energy efficiency. *Journal of Architectural Engineering*, 22(4), 04016014.
- Gaspar, C. M. R., da Silva, J. S., & Costa-Neves, L. F. (2016). Multimode vibration control of building steel–concrete composite floors submitted to human rhythmic activities. *Computers & Structures*, 165, 107-122.
- Ghabraie, K., Chan, R., Huang, X., & Xie, Y. M. (2010). Shape optimization of metallic yielding devices for passive mitigation of seismic energy. *Engineering Structures*, 32(8), 2258-2267.
- Gong, Y., Cao, L., Laflamme, S., Ricles, J., Quiel, S., & Taylor, D. (2019). Variable friction cladding connection for seismic mitigation. *Engineering Structures*, 189, 243-259. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.066>
- Greco, R., & Marano, G. C. (2016). Multi-objective optimization of a dissipative connection for seismic protection of wall-frame structures. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 87, 151-163.
- Henry, R. M., & Roll, F. (1986). Cladding-frame interaction. *Journal of Structural Engineering*, 112(4), 815-834.
- Hoang, N., Fujino, Y., & Warnitchai, P. (2008). Optimal tuned mass damper for seismic applications and practical design formulas. *Engineering structures*, 30(3), 707-715.
- Hu, J. W. (2014). Response of seismically isolated steel frame buildings with sustainable lead-rubber bearing (LRB) isolator devices subjected to near-fault (NF) ground motions. *Sustainability*, 7(1), 111-137.
- Hunt, S. J. (2002). *Semi-active smart-dampers and resettable actuators for multi-level seismic hazard mitigation of steel moment resisting frames*. <http://dx.doi.org/10.26021/1293>
- Irwin, P. A. (2009). Wind engineering challenges of the new generation of super-tall buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 97(7-8), 328-334. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2009.05.001>
- Jauregui, J. C. (Ed.). (2019). *Nonlinear Structural Dynamics and Damping*. Springer International Publishing. ISBN 978-3-030-13316-0 ISBN 978-3-030-13317-7 (eBook). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-13317-7>
- JASS14. (1996). Japanese Architectural Standard Specification Curtain Wall. AIJ, Architectural Institute of Japan.
- Kanitkar, R., Harms, M., Crosby, P., & Lai, M. L. (1998). Seismic retrofit of a steel moment frame structure using viscoelastic dampers. *Journal of Earthquake Technology*, 354, 207-219.
- Karavasilis, T. L., Kerawala, S., & Hale, E. (2012). Hysteretic model for steel energy dissipation devices and evaluation of a minimal-damage seismic design approach for steel buildings. *Journal of Constructional Steel Research*, 70, 358-367.
- Khoraskani, R. A. (2015). *Advanced connection systems for architectural glazing*. Springer International Publishing.
- Kitagawa, Y., & Midorikawa, M. (1998). Seismic isolation and passive response-control buildings in Japan. *Smart materials and structures*, 7(5), 581.
- Knaack, U., Luible, A., Overend, M., Aelenei, L., Perino, M., Wellershof, F., & Brzezicki, M. (2015). *Adaptive facade network Europe*. TU Delft Open.
- Lago, A., Trabucco, D., & Wood, A. (2018). *Damping technologies for tall buildings: Theory, design guidance and case studies*. Butterworth-Heinemann. ISBN: 978-0-12-815963-7.
- Lee, C. L., Chen, Y. T., Chung, L. L., & Wang, Y. P. (2006). Optimal design theories and applications of tuned mass dampers. *Engineering structures*, 28(1), 43-53.
- Lievens, K., Lombaert, G., De Roeck, G., & Van den Broeck, P. (2016). Robust design of a TMD for the vibration serviceability of a footbridge. *Engineering Structures*, 123, 408-418.
- Lignarolo, L. E. M., Lelieveld, C. M. J. L., & Teuffel, P. (2011). Shape morphing wind-responsive facade systems realized with smart materials. *Adaptive Architecture: An International Conference*, London, UK, March 3-5, 2011.
- Mahmoodi, P., Robertson, L. E., Yontar, M., Moy, C., & Feld, L. (1987, August). Performance of viscoelastic dampers in world trade center towers. *Dynamics of structures*, 632-644. ASCE.
- Makris, N., & Chang, S. P. (2000). Effect of viscous, viscoplastic and friction damping on the response of sei-

- smic isolated structures. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 29(1), 85-107. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(200001\)29:1<85::AID-EQE902>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(200001)29:1<85::AID-EQE902>3.0.CO;2-N)
- Maebayshi, K., Shiba, K., Mita, A., & Inada, Y. (1992). Hybrid Mass damper system for response control of building. *Proceeding of Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, Rotterdam.
- McCormick, J., Aburano, H., Ikenaga, M., & Nakashima, M. (2008, October). Permissible residual deformation levels for building structures considering both safety and human elements. *Proceedings of the 14th world conference on earthquake engineering*, 12-17. Seismological Press Beijing.
- McNamara, R. J. (1977). Tuned mass dampers for buildings. *Journal of the Structural Division*, 103(9), 1785-1798.
- McNamara, R. J., Boggs, D. W., Lai, M. L., Makris, N., Nielsen, E. J., & Cermak, J. E. (1997). *Tailoring of damping in structures: Design issues*. Building to Last, ASCE.
- Mohebbi, M., & Joghataie, A. (2012). Designing optimal tuned mass dampers for nonlinear frames by distributed genetic algorithms. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 21(1), 57-76.
- Moon, K. S. (2009). Tall building motion control using double skin façades. *Journal of architectural engineering*, 15(3), 84-90.
- Moon, K. S. (2016). Integrated damping systems for tall buildings: tuned mass damper/double skin facade damping interaction system. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 25(5), 232-244.
- Morales-Beltran, M., & Teuffel, P. (2013). Towards smart building structures: adaptive structures in earthquake and wind loading control response—a review. *Intelligent Buildings International*, 5(2), 83-100. <http://dx.doi.org/10.1080/17508975.2013.778193>.
- Milardi, M., Mandaglio, M., & Musarella, C. C. (2020). Involucro. In: Losasso, M., Lucarelli, M. T., Rigillo, M., & Valente, R. (2020). *Adattarsi al clima che cambia. Innovare la conoscenza per il progetto ambientale*, 145–150. Rimini: Maggioli Editore. ISBN: 9788891643186.
- Naeim, F., Lobo, R., & Martin, J. A. (1998). Performance of non-structural components during the January 17, 1994 Northridge Earthquake—case studies of six instrumented multistory buildings. *Proceedings of the Seminar on Seismic Design, Retrofit, and Performance of Nonstructural Components, ATC-29-1, San Francisco, CA*, 107, 119.
- Naeim, F., & Kelly, J. M. (1999). *Design of seismic isolated structures: from theory to practice*. John Wiley & Sons.
- Nakai, M. (2015). Advanced Structural Technologies for High-Rise Buildings in Japan. *CTBUH Journal, Special Issue: Focus on Japan*, 2, 22-29.
- Nestovito, G., & Occhiuzzi, A. (2016). Implementation of smart-passive dampers combined with double concave friction pendulum devices to retrofit an existing highway viaduct exploiting the seismic early warning information. *Engineering structures*, 120, 58-74.
- Oinam, R. M., & Sahoo, D. R. (2017). Seismic rehabilitation of damaged reinforced concrete frames using combined metallic yielding passive devices. *Structure and Infrastructure Engineering*, 13(6), 816-830.
- Pakdamar, F., & Bozkurt, Ö. (2020). Seismic Response of Anchorage Elements Used in Curtain Wall Systems. *Sakarya University Journal of Science*, 24(4), 564-574.
- Park, J. H., Kim, J., & Min, K. W. (2004). Optimal design of added viscoelastic dampers and supporting braces. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 33(4), 465-484. <https://doi.org/10.1002/eqe.359>
- Pekcan, G., Mander, J. B., & Chen, S. S. (1999). Fundamental considerations for the design of non-linear viscous dampers. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 28(11), 1405-1425. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199911\)28:11<1405::AID-EQE875>3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199911)28:11<1405::AID-EQE875>3.0.CO;2-A)
- Pipitone, G., Barone, G., & Palmeri, A. (2018). Optimal design of double-skin façades as vibration absorbers. *Structural Control and Health Monitoring*, 25(2), e2086.
- Poh'Sie, G. H., Chisari, C., Rinaldin, G., Amadio, C., & Fragiaco, M. (2016). Optimal design of tuned mass dampers for a multi-storey cross laminated timber building against seismic loads. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 45(12), 1977-1995.
- Ramos, A., Pelayo, F., Lamela, M. J., Canteli, A. F., Huerta, M. C., & Pacios, A. (2013, April). Evaluation of damping properties of structural glass panes under impact loading. *Proceedings of COST Action TU0905 Mid-term Conference on Structural Glass*, Taylor & Francis Group, 113-120. <http://dx.doi.org/10.1201/b14563-18>
- Rizzo, F., Franco, A., Bonati, A., Maddaloni, G., Caterino, N., & Occhiuzzi, A. (2021). Predictive analyses for aerodynamic investigation of curtain walls. *Structures*, 29, 1059-1077. Elsevier.
- Sack, R. L., Beers, R. J., & Thomas, D. L., (1989). Seismic behavior of architectural precast cladding. *Proceedings, Architectural Precast Concrete Cladding-Its Contribution to Lateral Resistance of Buildings, PCI, Chicago, IL*, 141–158.
- 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

- Sen, T. K. (2009). *Fundamentals of seismic loading on structures*. John Wiley & Sons.
- Seo, J., Kim, Y. C., & Hu, J. W. (2015). Pilot study for investigating the cyclic behavior of slit damper systems with recentering shape memory alloy (SMA) bending bars used for seismic restrainers. *Applied Sciences*, 5(3), 187-208.
- Shameri, M. A., Alghoul, M. A., Sopian, K., Zain, M. F. M., & Elayeb, O. (2011). Perspectives of double skin façade systems in buildings and energy saving. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(3), 1468-1475. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.10.016>
- Shiba, K., Mase, S., Yabe, Y., & Tamura, K. (1998). Active/passive vibration control systems for tall buildings. *Smart materials and structures*, 7(5), 588.
- Solari, G. (1996). Evaluation and role of damping and periods for the calculation of structural response under wind loads. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 59(2-3), 191-210. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(96\)00007-4](https://doi.org/10.1016/0167-6105(96)00007-4).
- Song, G. B., Zhang, P., Li, L. Y., Singla, M., Patil, D., Li, H. N., & Mo, Y. L. (2016). Vibration control of a pipeline structure using pounding tuned mass damper. *Journal of Engineering Mechanics*, 142(6), 04016031.
- Spencer Jr, B. F., & Nagarajaiah, S. (2003). State of the art of structural control. *Journal of structural engineering*, 129(7), 845-856.
- Stewart, J. P., Conte, J. P., & Aiken, I. D. (1999). Observed behavior of seismically isolated buildings. *Journal of Structural Engineering*, 125(9), 955-964.
- Thambiratnam, D. (2010). Seismic mitigation of building structural systems using passive dampers. *Proceedings of the 9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, 1-10. 9th US National & 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering.
- Thiel, C. C., Elsesser, E., Lindsay, J., Bertero, V. V., Filippou, F., & McCann, R. (1986). Seismic energy absorbing cladding system: A feasibility study. *Proceedings, ATC-17 Workshop and Seminar on Base Isolation and Passive Energy Dissipation, ATC, San Francisco, CA*, 251-260.
- Villaverde, R. (1997). Seismic design of secondary structures: state of the art. *Journal of structural engineering*, 123(8), 1011-1019. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1997\)123:8\(1011\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:8(1011))
- Zhang, X., Hao, H., & Ma, G. (2013). Laboratory test and numerical simulation of laminated glass window vulnerability to debris impact. *International Journal of Impact Engineering*, 55, 49-62. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2013.01.002>

Il tema specifico

I sistemi di connessione "flessibile" la valutazione delle variabili in ambiente simulato

Abstract

Seismic actions can impose significant in-plane loading on the façade system. They can lead to damage and failure in the case of inappropriate design, insufficient connection details, and large inter-story drifts. The most critical elements being evaluated turn out to be the glazed components. So many studies and research have focused on strategies that can improve the rigid behavior of these elements due to glass-frame contact. This improvement regards increasing the space between them or through solutions that will enhance the material performance of the glass. The proposal to design façade systems as potential absorbers of earthquake-induced vibrations comes from another avenue of research. These seismic mitigation strategies are based on the proposed flexible connection devices, which take advantage of the mechanical compatibility between the building structure and its envelope. This chapter aims to evaluate the main actions in designing the connections of a curtain wall system, considering the capabilities of the façade to act as an energy-absorbing device, assuming the optimal value of the properties of the dampers. In this sense, special attention is paid to studying emerging, advanced and innovative materials, resulting in incremental innovation processes for so-called "extreme" applications. The feasibility of implementing connecting devices through advanced materials must, in fact, be evaluated. This can be done predictively through the use of modeling and simulation software.

Highlights

- Investigation of the dynamic behavior of the glazing elements and identification of the criticalities that arise during seismic events leading to their failure;
- Identification of the need to carry out assessments of the dynamic behavior of building envelope elements and components through laboratory tests and the use of simulation software for "predictive" design;
- Investigation of the functional-performance characteristics of flexible connection components as seismic mitigation strategies;
- Identification of material innovations for the implementation of flexible connection elements;
- Critical comparison of the methodologies constituting the simulation process, identifying the most appropriate choice for the experimental phase.



4.1 Il comportamento dinamico del sistema telaio-vetro nei sistemi di facciata a montanti e traversi

La ormai acclarata valutazione dell'appartenenza delle facciate continue come *componenti primari e completamente strutturali* [Bedon & Amadio, 2018b] – dal punto di vista delle performance sismiche – fonda i principi di indagine della presente ricerca. Da più versanti, l'involucro è stato definito come il sistema edilizio che più di altri influisce sugli aspetti formali e prestazionali della progettazione architettonica, definendosi come *simbolo dell'architettura moderna*.

Per questo motivo, estendere i requisiti da asseverare durante il processo progettuale, risulta essere una sfida attuale per gli attori dei diversi settori di scienza e tecnica. Nel capitolo precedente "*I dispositivi di risposta dinamica con capacità di smorzamento*", il parallelismo con le strategie di mitigazione sismica strutturale – quali l'utilizzo di smorzatori per la gestione della risposta sismica – ha portato alla luce diverse valutazioni, utili per il processo evolutivo della presente ricerca.

Da qui, la considerazione che il miglioramento delle prestazioni sismiche nei sistemi di facciata continua può essere attuato attraverso la proposta di dispositivi di connessione avanzati [Khoraskani, 2015], considerati "*flessibili*".

Riprendendo quanto descritto finora, risulta necessario dichiarare che lo *status quo* della ricerca si allinea rispetto la considerazione che "*l'adattamento e la reazione alle condizioni emergenziali è possibile mediante l'applicazione di componenti flessibili*" [Rossetti et al., 2022]. Tuttavia, dai diversi versanti della ricerca, è stato dimostrato come – ad eccezione di alcune linee guida progettuali contenute nei codici di progettazione – mancano approcci progettuali rivolti agli esperti del settore per la definizione di questi dispositivi atti alla mitigazione efficace dei danni sismici. Le linee guida, infatti, si limitano alla definizione di parametri "*essenziali*" – trattati in seguito – per alcuni componenti dei sistemi di facciata, considerati "*più vulnerabili*".

In questo scenario risiede l'obiettivo principale del seguente paragrafo, ovvero nella comprensione analitica dei problemi relativi al comportamento dinamico dei sistemi di facciata durante un terremoto.

La trattazione si avvia dalla consapevolezza che il sistema di facciata è costituito da diversi componenti/elementi che – come espresso nel paragrafo 1.4 "*Il Curtain Wall e i sistemi connessi*" – giocano un ruolo fondamentale per raggiungere i requisiti delle condizioni di servizio e sicurezza [Rigone & Bianchi, 2015]. Sinteticamente, i componenti principali del caso studio in esame – facciata continua Stick System – comprendono: le "*strutture portanti*" telaio con profili d'alluminio, – montanti e traversi –, gli *elementi di connessione* in alluminio estruso, telaio-facciata e struttura primaria di supporto, e gli *elementi vetrati*.

Inoltre, dall'analisi dei casi studio effettuati rispetto gli aspetti critici ricorrenti in caso di sisma (Cfr. Paragrafo 2.3) si afferma che il sistema di fallimento dovuto ai danni permanenti come rottura e fessurazione degli elementi vetrati – causati dall'eccessiva rigidità degli stessi – risulta essere la variabile di maggiore preoccupazione per i progettisti del settore. Da questo assunto, possono derivare altri elementi critici, talvolta legati ad una progettazione non appropriata³, come la perdita delle proprietà prestazionali delle guarnizioni in gomma – dovuta all'incapacità dell'elemento di accogliere le deformazioni relative richieste [Bedon & Amadio, 2018a] in seguito al contatto tra telaio e vetro – e la deformazione permanente, in campo plastico, del telaio-facciata.

Le relazioni tra gli elementi del telaio, montante-traverso, sono state migliorate grazie all'alloggiamento di componenti di connessione, cavallotti (Cfr. Paragrafo 1.4), che garantiscono in alcuni casi una maggiore capacità rotazionale del sistema.

I maggiori deficit sono dunque legati alla capacità del sistema di "resistere" alla deriva di interpiano – intesa come la differenza tra gli spostamenti del solaio superiore e del solaio

inferiore in cui è connessa la facciata divisa per l'altezza del piano –, dove gli elementi verticali, montanti, sono sottoposti ad "azioni che tendono a deformarli e, di conseguenza, impongono agli elementi vetrati un cambiamento di forma che può causarne la rottura o l'espulsione dal piano" [Porro & Cavanna, 2016].

Questi danni provocano grandi perdite economiche² e rischi per la sicurezza delle persone³ [Sousa & Monteiro, 2018]. Di fatti, il comportamento dei "componenti non strutturali è stato studiato da vari ricercatori per definire linee guida per l'analisi strutturale e sottolineare limiti e lacune" [Rizzo et al., 2021].

Nella maggior parte dei casi, le lesioni iniziano agli angoli del pannello di vetro e si estendono per tutta la superficie, portando, in alcuni casi, alla caduta dello stesso. Per comprendere in maggiore misura questo fenomeno si fa riferimento allo studio portato avanti da Bouwkamp [1961]. L'autore ha osservato che – nel caso dei sistemi finestrati (Fig. 2a), comparabili a livello schematico ai sistemi costruttivi delle facciate a montanti e traversi – "la deformazione in piano dei pannelli di vetro intelaiati sotto carico laterale avviene in due fasi" [Sivanerupam et al., 2009]. La prima, attraverso la deformazione del telaio e la traslazione della lastra di vetro all'interno del telaio (Fig. 2b), di conseguenza, la seconda fase deriva dal contatto tra vetro e telaio, ai due angoli opposti del pannello di vetro. Quindi, il pannello di vetro ruota ulteriormente fino a quando i suoi angoli opposti coincidono con gli angoli adiacenti del telaio (Fig. 2c).

Sucuoglu e Vallabhan [1997] hanno indagato ulteriormente questo concetto, dichiarando che la "deformazione laterale totale del pannello della finestra dovuta al movimento del corpo rigido del pannello di vetro nel telaio della finestra può essere espressa in termini di proprietà geometriche". Da questi assunti è derivata un'espressione analitica valida nei casi in cui i pannelli di vetro sono rivestiti con sigillanti "morbidi"⁴, permettendo così un grado di libertà maggiore per il movimento roto-traslante tra il pannello di vetro e il frame del telaio. L'equazione espressa⁵ da Sucuoglu e Vallabhan [1997], risulta ancora attuale ma non verificata dai risultati delle prove sperimentali esistenti per le indicazioni progettuali e indica la capacità di deriva interna del telaio vetrato, prima della rottura del vetro. Questa dipende principalmente dalla distanza dal bordo del vetro al telaio, i cui valori nella pratica generale sono stati imposti da 6 mm a 13 mm.

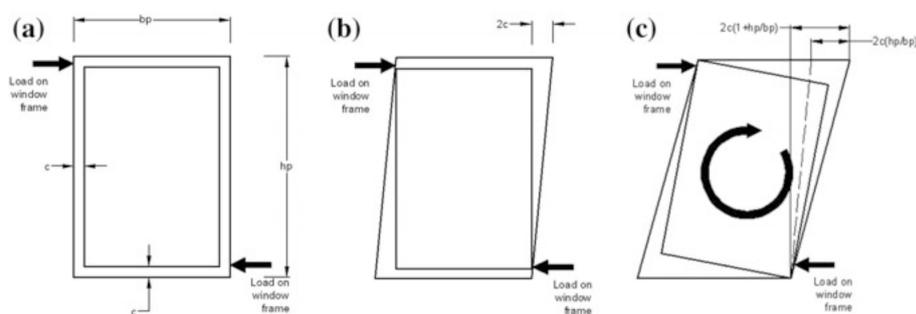


Fig. 2. Movimento del pannello di vetro all'interno del telaio di una finestra vetrata (Source: Sucuoglu & Vallabhan, 1997)

Dalle osservazioni sviluppate da Bouwkamp [1961] – e successivamente analizzate da Sucuoglu e Vallabhan [1997] – è emersa la necessità di valutare le deformazioni causate dalla deriva di interpiano in modelli a scala reale. Ciò avviene avvalendo di laboratori specializzati che, attraverso attrezzature di prove certificate, simulano in ambiente reale gli spostamenti indotti in caso di carichi sismici.

Nel corso degli anni i test per la valutazione sismica degli elementi di facciata sono stati definiti in modo puntuale e inglobati all'interno delle procedure di prova normate, in cui – come emerso nel Capitolo 2 – grande attenzione viene posta agli standard americani (Cfr. AAMA 501.4, AAMA 501.6).

Per indagare il percorso evolutivo risulta necessario fare riferimento agli studi condotti da Wang [1987], il cui focus riguardava la valutazione del comportamento sismico degli elementi di rivestimento delle facciate continue su un telaio di prova di dimensioni reali.

In seguito, Cupples [1985] ha eseguito prove a rottura – *racking test* – su un sistema di facciata continua "Robertson-Cupples⁶" per valutare le performance generali del sistema e stimare i dettagli di connessione vetro-telaio.

All'inizio degli anni '90 Behr [1991] – insieme ad un team dell'Università del Missouri a Rolla – ha avviato un programma di ricerca sulle prove sperimentali del comportamento sismico di diversi sistemi vetrati, come le vetrine, le facciate continue con diversi tipi di vetro e tecniche di vetratura. Questa ricerca ha portato a una serie di revisioni per le disposizioni raccomandate dal *National Earthquake Hazards Reduction Program*, NEHRP, per le norme sismiche per i nuovi edifici e altre strutture [FEMA 302], che costituiscono il corpus delle Disposizioni NEHRP del 2000 [FEMA 368].

Un altro importante passo, per la valutazione dei modelli reali sottoposti a test, è stato condotto da Lim e King [1991] presso la *Building Research Association of New Zealand*. Il tema principale della ricerca sperimentale era incentrato sullo studio del comportamento in piano dei sistemi vetrati, il cui obiettivo era quello di sviluppare un metodo di *prova standard* per determinare la capacità di deriva dei sistemi di facciate continue vetrate.

Le loro osservazioni sui campioni testati hanno portato a conclusioni molto simili a quelle di Bouwkamp [1961], definendo che "i movimenti in piano dei sistemi di vetrate dovrebbero essere compensati dallo slittamento del corpo rigido e dalla successiva rotazione della lastra di vetro nel telaio di chiusura senza sollecitare la lastra" [Lim & King, 1991]. È emerso, quindi come i maggiori sforzi della ricerca siano stati legati alla valutazione del comportamento dinamico dei sistemi vetrati, essendo il vetro sinonimo di trasparenza e immaterialità dell'architettura [Altomonte, 2005], ma anche l'elemento il cui comportamento risulta fragile in caso di sisma. Risulta necessario però dichiarare che nella conduzione di questi test, le valutazioni non devono riguardare solo "il comportamento tipicamente fragile" [Bedon et al., 2018a] degli elementi vetrati.

In questo senso, Quirouette e Arch [2006] citano le regole dei test e delle proprietà degli elementi e connessioni dei sistemi di facciata continua. Il componente più importante di un sistema di facciate continue per il supporto del carico è costituito dai profili portanti. Questi profili, inizialmente costituiti in acciaio, dovrebbero comportarsi in modo duttile e deformarsi in modo armonico rispetto agli spostamenti del piano dell'edificio sottoposto a un movimento sismico. Soprattutto con l'utilizzo dell'alluminio nel settore, i sistemi di facciata continua hanno assunto un comportamento più flessibile e si sono adattati ai movimenti della struttura. Di conseguenza, se progettati in modo appropriato, questi elementi possono resistere alle forze sismiche. Tuttavia, i materiali di rivestimento dell'edificio come il vetro, sono elementi più fragili rispetto ai profili portanti in alluminio. Le aspettative di questi elementi sono il controllo delle perdite d'aria, il controllo della diffusione del vapore, il controllo della penetrazione della pioggia, il controllo della condensazione e il trasferimento delle sollecitazioni che agiscono a seguito dei carichi sismici. Da questa considerazione, Pakdamar e Bozkurt [2020] affermano la necessità di evitare connessioni molto rigide tra il profilo portante in alluminio e la struttura primaria di supporto.

Dopo il contatto iniziale vetro-telaio, un aumento degli spostamenti applicati aumenta anche le sollecitazioni del corpo del pannello di vetro. Il vetro si rompe quando le sollecitazioni raggiungono il livello di innesco della fessura [Memari & Schwartz, 2009]. Questo livello di sollecitazione è in funzione del tipo di vetro e delle condizioni superficiali dello stesso, come

i difetti esistenti e le micro-fessure iniziali ai bordi del pannello di vetro o in prossimità degli angoli. I sistemi di facciate continue possono essere progettati utilizzando una varietà di tipi di vetro: ricotto, rinforzato termicamente, completamente temperato o laminato.

A seconda delle tecniche di vetratura, la risposta del vetro risulta essere diversa così come la tipologia di rottura e/o fessurazione. Sinteticamente e a titolo esemplificativo, dalle analisi condotte da Behr [2009] e Le Bourhis [2014] si riporta che – tra le varie tipologie di vetro – quello con *comportamento più sfavorevole* è il *vetro ricotto*. La rottura avviene tramite la formazione di schegge grandi e larghe che ne determinano l'espulsione immediata dal telaio. Il termo-rinforzato si comporta in modo simile, tranne che per i valori più elevati di resistenza ai carichi. Il vetro completamente temprato ha, invece, un comportamento diverso, dovuto all'elevato stato di tensione uniforme di compressione. Infatti, la rottura avviene attraverso la formazione di piccole schegge, dello spessore di una lastra, molto più piccole e quindi meno pericolose di quelle derivanti dalla rottura del vetro ricotto. Inoltre, nonostante il processo di rottura l'elemento vetrato non viene espulso dal telaio a meno che non venga "caricato" con elevati valori di carico orizzontale.



Fig. 3. Tipologie di rottura dei vetri a seconda delle tecniche di lavorazione

Da queste osservazioni Behr [2009] ha definito che, per la progettazione delle azioni sismiche, le tipologie di vetro, che presentano un *comportamento migliore*, sono i *vetri laminati* stratificati grazie alla presenza della pellicola in *PVB* – polivinilbutirrale – in cui le schegge rimangono bloccate nella posizione iniziale, fornendo una capacità portante residua [D'Ambrosio et al., 2019]. Per questo motivo il suo utilizzo può essere suggerito o addirittura richiesto dai codici e dai regolamenti locali standard per le vetrate inclinate o anche per le vetrate verticali della facciata in caso di forti carichi orizzontali (ad esempio sismici o di vento).

Di conseguenza agli studi sinora presentati, i codici normativi internazionali asseverano alcune limitazioni in termini di tecnologia e geometria per i sistemi tradizionali, riducendo, però, notevolmente la libertà dei progettisti di realizzare involucri con forme fluide ed organiche⁷.

Per la progettazione appropriata dei sistemi di facciate continue, la norma ASCE 7-05 [ASCE 2006] richiede il sistema "abbia una capacità di deriva superiore del 25% alla capacità di deriva della caduta del vetro". Per ridurre al minimo i danni al vetro dovuti agli effetti del terremoto, l'International Building Code [ICC, 2009], che adotta l'ASCE 7-05 [ASCE 2006], richiede il rispetto delle disposizioni sismiche dei sistemi di vetrate. Tali disposizioni postulano in generale che il sistema di vetrate sia in grado di soddisfare i requisiti di spostamento

relativo al piano indotto dal sisma. La quantità di deriva che provoca la caduta del vetro in uno specifico progetto di facciata continua è generalmente determinata utilizzando un test di simulazione basato su una procedura specificata dall'American Architectural Manufacturers Association [AAMA 2018]. In assenza di dati sulla deriva da caduta del vetro, la norma ASCE 7-05 consente di calcolare la deriva da contatto diagonale vetro-telaio. Secondo tale normativa – sezione 13.5.9.1, punto 3 – per determinare la capacità di deriva del vetro si può ricorrere ad "analisi ingegneristiche".

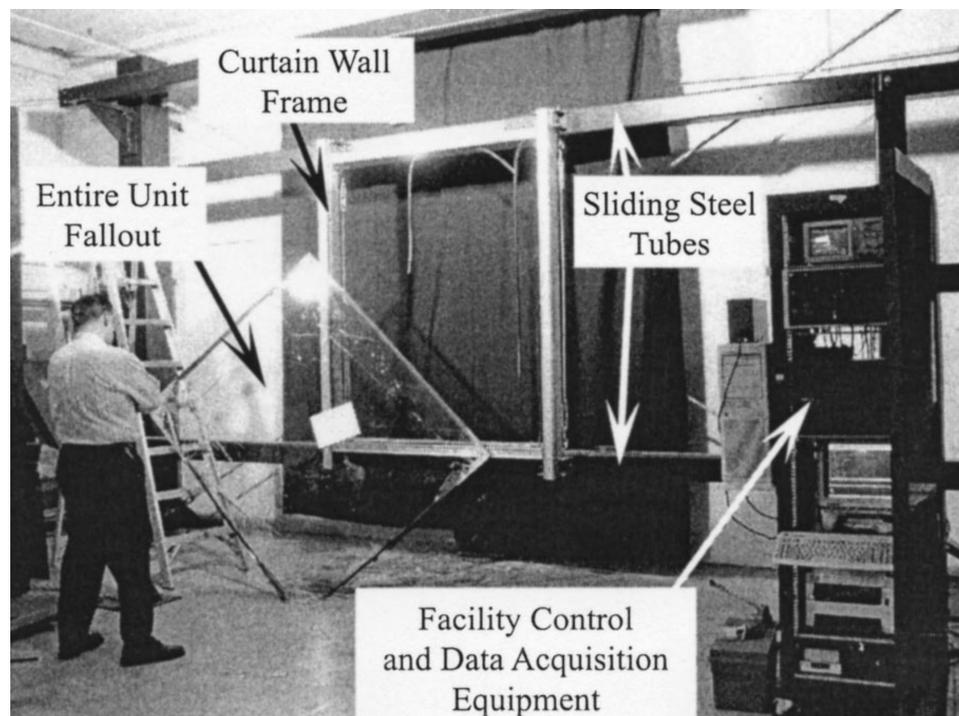


Fig. 4. Provino sottoposto a prova di Crescendo con l'impianto di prova Dynamic Racking (Source: Memari et al., 2006)

Tuttavia, ad oggi, non è stato sviluppato alcun metodo verificato di analisi ingegneristica per prevedere in modo affidabile tale capacità di deriva. Pertanto, è necessario un approccio analitico alla modellazione che sia coerente con i risultati dei test. Lo spostamento tra i piani tende a forzare la fessurazione degli elementi vetrati nel telaio delle facciate continue a causa del collegamento dei montanti – soprattutto nel caso della tipologia *Stick* al sistema strutturale dell'edificio.

Lo spazio iniziale – come proposto da Sucuoglu e Vallabhan [1997], tra 6 e 13 mm –, tra il bordo di un pannello di vetro e lo spazio del telaio in alluminio per l'innesto dell'elemento vetrato, nella maggior parte dei casi impedisce il contatto tra vetro e telaio alle basse derivate. Seppure i progettisti di facciate continue cercano di soddisfare i requisiti di deriva previsti dai regolamenti edilizi, le distanze "effettive" previste per le facciate continue sono talvolta inadeguate [Memari et al., 2006].

Di fatti, nei casi di eventi sismici moderati, gli spostamenti possono portare a movimenti del pannello di vetro che superano le distanze effettive e sottopongono il pannello di vetro a compressione lungo la diagonale, soprattutto nel caso di edifici già esistenti. Da questi assunti Memari et al. [2006] hanno sviluppato l'idea che il comportamento sismico dei si-

stemi vetrati poteva essere notevolmente migliorato arrotondando gli angoli dei pannelli di vetro.

In conclusione, si ritiene, quindi, che la principale causa di danno agli elementi in vetro durante un terremoto sia rappresentata dalle deformazioni in piano del sistema vetrato, generalmente causate dalle deformazioni e dagli spostamenti della struttura dell'edificio.

Nel corso del paragrafo, infatti, sono stati riportati alcuni degli studi cardine che hanno scandito il corso evolutivo della ricerca nel campo delle strategie per il miglioramento del comportamento sismico dei sistemi di facciata. Alcuni di questi si sono concentrati sui metodi per migliorare le performance del vetro architettonico durante i terremoti. Questi metodi includono distanze maggiori tra vetro e telaio [Sucuoglu & Vallabhan 1997], vetri con pellicole polimeriche di sicurezza ancorate [Memari et al. 2003], vetri stratificati [Behr, 2009], e sono state intese come soluzioni per mitigare i danni al vetro indotti dal terremoto. Ogni metodo presenta, però, i suoi limiti. Ad esempio, l'uso di pellicole di sicurezza ancorate o di vetri stratificati aumenta la resistenza alla caduta del vetro, ma non necessariamente la resistenza alla fessurazione del vetro. Inoltre, sono stati proposti alcuni sistemi di facciate antisismiche che limitano le scelte estetiche nella progettazione architettonica dell'esterno di un edificio. Ne sono un esempio i sistemi di chiusura con montanti larghi, progettati per ottenere un maggiore spazio libero affinché non si verificasse il contatto vetro-telaio durante i movimenti sismici dell'edificio.

Da queste considerazioni critiche, per proteggere le vetrate architettoniche dalle azioni sismiche, viene esaminato il concetto di offrire una compatibilità meccanica tra la struttura dell'edificio e il suo involucro, in contrasto con la pratica comune di offrire maggiore distanza tra gli elementi del sistema di involucro. Come tale, solo studi recenti si sono concentrati sul miglioramento delle loro prestazioni strutturali o sull'implementazione e la proposta di dispositivi di connessione *avanzati* [Khoraskani, 2015].

Nel caso specifico delle facciate continue in vetro soggette a carichi eccezionali, essendo rappresentative di una parte di sistemi meccanici ed edifici spesso complessi, ma anche della prima linea di difesa dall'esterno, la loro progettazione strutturale ottimale è strettamente dipendente dalle effettive prestazioni – cioè rigidità, resistenza, ridondanza, ecc. – dei singoli materiali e componenti strutturali, nonché dalla loro reciproca interazione sotto la combinazione di carichi assegnati.

Per cui, nella fase di progettazione l'attenzione si dovrebbe focalizzare non solo per i pannelli di vetro che compongono la copertura, ma anche per i sistemi di ancoraggio, i supporti, gli elementi del telaio ecc. Utilizzando dispositivi di connessione avanzati, è possibile evitare che questi spostamenti vengano trasferiti all'involucro, riuscendo comunque a mantenere la struttura dell'edificio come sistema di supporto principale.

Per questo motivo, nel seguente paragrafo, sono stati introdotti una serie di meccanismi di connessione avanzati a dissipazione di energia che possono essere incorporati nei sistemi di involucro degli edifici, suggerendo in seguito alcune strategie legati alla loro composizione materica per rendere l'intero sistema involucro adattivo.

Dallo scenario sopra descritto, emergono due aspetti chiave:

- il primo relativo ad un approccio di progettazione che sia basato sul dimensionamento di dispositivi di connessione "*flessibile*" – ovvero elementi che siano in grado di sostenere e gestire gli effetti della risposta dovuta ai carichi sismici non caricando ulteriormente la struttura di supporto – e dei materiali innovativi ad essi connessi. Gli elementi di connessione avanzati e i materiali ad essi connessi diventano il *focus* dei paragrafi successivi.

- Il secondo aspetto chiave risiede nella necessità di adottare un approccio analitico per la verifica e simulazione degli elementi e componenti che costituiscono i sistemi di facciata continua.

Un approccio analitico alla modellazione, dunque, che sia coerente con i risultati di prove effettuate in laboratori specializzati, il cui punto di forza risiede "*sulla possibilità di utilizzare*

strumenti di rilevazione fenomenologica che, oltre ad essere aggiornati di continuo, offrono alti valori di performances e sono calibrati su datasheet garantiti da enti accreditati” [Milardi et al., 2020]. È con questi principi che si dà inizio alla fase sperimentale della ricerca.

4.2 Le variabili del sistema costruttivo e le fasi di progettazione antisismica degli elementi di connessione nei sistemi di facciata continua

Derivante dalla trattazione del precedente paragrafo, è emerso come la progettazione antisismica del passato si sia rivolta principalmente verso soluzioni il cui scopo era basato sul miglioramento del comportamento dinamico degli elementi fragili in facciata – ad esempio aumento dello spazio che intercorre tra vetro-telaio [Sucuoglu & Vallabhan, 1997] –, e sul miglioramento delle proprietà meccaniche-fisiche del materiale fragile [Memari et al., 2004; Behr et al., 2009].

Nonostante ciò, le linee di ricerca sono, oggi, rivolte verso la proposta di elementi di connessione che riducano gli effetti dei carichi sismici imposti sui sistemi di facciata e si propongano come una valida *strategia di mitigazione sismica*. Da questo scenario, l'attenzione si focalizza sull'indagine di soluzioni tecnologiche atte a migliorare la risposta dinamica di un dato sistema di facciata continua a montanti e traversi che – rispetto ai tradizionali metodi e materiali di progettazione – può essere rappresentata da connessioni *flessibili* [Huang et al., 2017].

Ciò è reso possibile attraverso la *"compatibilità meccanica tra la struttura dell'edificio e i sistemi di facciata continua"*, in contrasto con la *"pratica comune di affidare la resistenza sismica ai giunti presenti tra gli elementi che costituiscono la facciata"* [Rigone, 2017], mediante l'inserimento di elementi quali cavallotti. Questi, di fatto, migliorano le capacità di connessione tra i profili in alluminio del telaio, montanti e traversi, ma non consentono la roto-traslazione prevista per gli elementi vetrati evitando il contatto vetro-telaio e, di conseguenza, la rottura (Cfr. Paragrafo 4.1).

A valle di tale concetto – come emerso nel precedente capitolo –, è necessario fare riferimento ad alcune strategie teoriche-operative che sono state applicate in letteratura per il miglioramento delle facciate soggette alle azioni sismiche. Proveniente dalla progettazione antisismica giapponese delle strutture già dagli anni '70, infatti, il miglioramento delle prestazioni dei sistemi di facciata è stato affidato, nel caso di facciate a doppia pelle (DS), all'applicazione dei dispositivi di risposta dinamica, cosiddetti smorzatori [Hareer, 2007]. Questa strategia di mitigazione sismica è stata esplorata teoricamente per la prima volta da Moon [2010], nel caso di facciate DS, appunto, in edifici alti sottoposti ai carichi sismici e azioni del vento. Per il caso studio specifico, l'autore ha dimostrato come l'utilizzo degli smorzatori in questa tipologia di facciata abbia ridotto – quasi del 35% – gli effetti sismici. Alcuni limiti critici, rispetto l'adozione di questa soluzione in tipologie di facciate continue *"tradizionali"*, risiedono non solo in costi elevati ma anche in difficoltà di progettazione, caratteristiche dimensionali elevate – che ne impediscono l'alloggiamento e inficiano le condizioni di servizio –, nonché pratiche di non semplice manutenibilità [Abtahi, 2017], essendo nella maggior parte costituiti da una serie di elementi, quali attuatori, sensori e, in alcuni casi, controller [Lago et al., 2018], che ne ostacolano anche l'ispezionabilità⁸.

Risulta necessario, pertanto, avanzare la conoscenza nei sistemi di connessione flessibili [Giglio et al., 2022] per garantire, nelle condizioni di servizio la loro funzionalità, non solo nei confronti dei requisiti ambientali che influenzano il corretto uso dell'edificio, ma anche e soprattutto per garantire la sicurezza delle persone.

In un quadro di sintesi, sviluppato attraverso l'analisi critica di sistemi dotati da questi dispositivi (Cfr. Paragrafo 3.4), è stata avanzata l'ipotesi di valutare le capacità della facciata di fungere come un dispositivo di assorbimento di energia [Lee et al., 2021], assumendo il valore ottimale delle proprietà degli smorzatori in facciata.

L'idea di sfruttare gli spostamenti dei sistemi di rivestimento non è recente ed è stata proposta per la prima volta da Pinelli et al., [1995] a seguito di indagini post-sisma.

Lo studio era incentrato sul criterio progettuale di utilizzare "i collegamenti avanzati del rivestimento sfruttando l'interazione tra i pannelli del rivestimento architettonico e la struttura dell'edificio per dissipare l'energia". Dai risultati delle prove condotte in laboratorio, in regime sismico, è emerso come gli "elementi fissi" dei sistemi di rivestimento – soprattutto nel caso di rivestimenti pesanti – sono risultati vulnerabili a causa delle deformazioni che si sono verificate nella struttura primaria di supporto. Infatti, seppur vero che la struttura non trasferisce i carichi al sistema di facciata, quest'ultima essendo connessa agli elementi strutturali – in direzione di trave e solai – subisce gli spostamenti di interpiano che derivano dai carichi applicati. La proposta di utilizzare una tipologia di connessione "avanzata" è basata sulla necessità di fornire da un lato isolamento tra il sistema di rivestimento e la struttura, dall'altro lato *dissipazione* dell'energia sismica [Khoraskani, 2015].

In seguito alla ricerca svolta da Pinelli et al. [1995], Goodno et al. [1998] forniscono uno studio dettagliato dei diversi sistemi di connessione *dissipanti*.

A differenza del primo studio riportato, le indagini condotte dagli autori avevano come obiettivo – oltre il miglioramento della capacità dei componenti di connessione e l'ipotesi di un abbassamento dei costi – la riduzione dei cosiddetti pesi strutturali dovuti ai rivestimenti massivi. Da ciò ne deriva la consapevolezza che questi "meccanismi di dissipazione" sono in grado di controllare le forze risultanti dagli spostamenti avendo come potenziale – nel caso dei rivestimenti leggeri – di fornire un livello di isolamento accettabile⁹.

Da questo assunto diversi autori come per esempio Khoraskani [2015], Bedon e Amadio [2017] e Gong et al., [2019a] hanno valutato la possibilità di progettare connessioni flessibili con la capacità rilevante di dissipazione dell'energia. Per una maggiore chiarezza vengono di seguito descritte le principali caratteristiche dei sistemi di connessione "tradizionali" al fine di delineare i miglioramenti che sono stati apportati, dagli autori sopracitati, attraverso la proposta di sistemi di connessione "avanzata".

Come espresso all'inizio della presente ricerca, i sistemi di facciata sono connessi in modo univoco alla struttura primaria di supporto. Nella fattispecie (Cfr. Paragrafo 1.4) sono stati identificate tre tipologie di connessioni tradizionali, tra cui: *ancoraggi in alluminio estruso*, *ancoraggi in lamiera d'acciaio* o *angolari in acciaio* e *bulloni in acciaio*. Per il caso studio in esame, l'attenzione è posta sugli ancoraggi in alluminio, tramite staffe "asolate".

L'importanza delle asole in questi sistemi è relativa ai problemi di posa in opera delle facciate continue [Khoraskani, 2015]. In linea generale, i problemi di spostamento vengono valutati e verificati¹⁰ nella fase progettuale. Da ciò, derivano le cosiddette "tolleranze di spostamento" – ovvero i limiti entro cui può essere accettata una variazione dimensionale – che si presentano dalla fase di progettazione alla fase d'installazione.

Considerando la grande importanza che ricopre l'involucro edilizio in termini estetici e prestazionali, questi problemi vengono risolti attraverso staffe dotate di asole in tre direzioni principali [UNCSAAL, 2011] che consentono, durante la fase di alloggiamento, di regolare tali tolleranze.

Oltre alle staffe con asole, esistono altri dettagli di connessione, come i fissaggi scorrevoli e gli ancoraggi a barra lunga, che consentono agli installatori di regolare con precisione il corretto posizionamento dell'involucro rispetto la struttura primaria (Fig. 5). Il problema delle tolleranze – superato grazie ad alcuni sistemi di regolazione –, risulta, però, essere ben diverso dal problema di compatibilità meccanica tra la struttura e l'involucro per gli spostamenti, oggetto principale della trattazione, e le deformazioni che si presentano dopo della posa in opera.

Di solito, infatti, le deformazioni si verificano dopo l'installazione degli elementi di connessione, e possono essere di due tipologie: statiche e dinamiche. L'attenzione viene posta, come ormai acclarato, sulle deformazioni dinamiche.

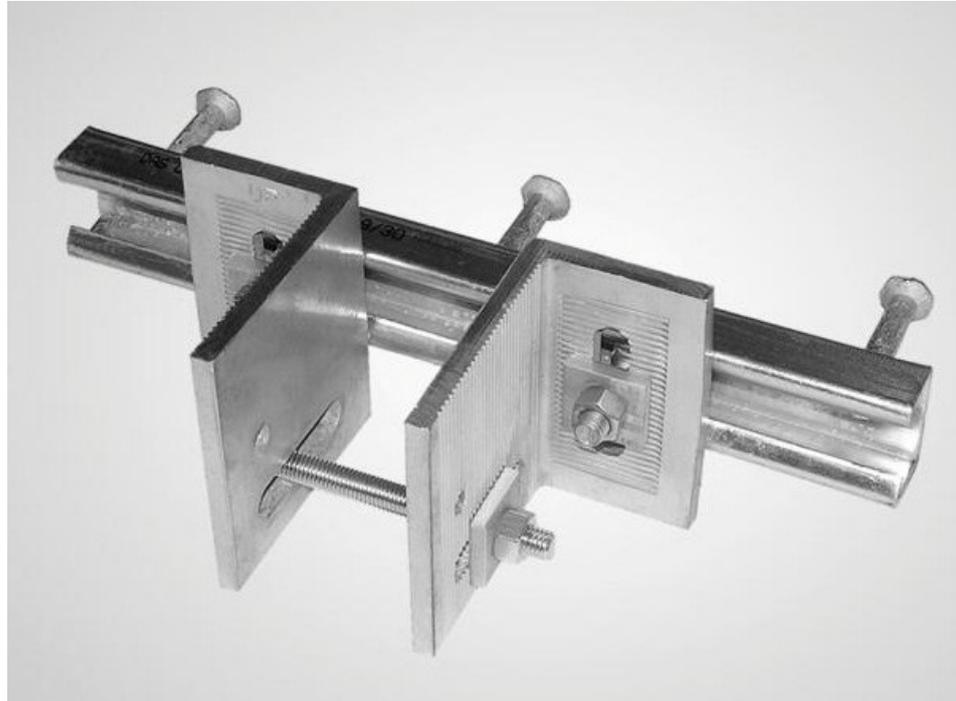


Fig. 5. Sistema di connessione scorrevole prodotto da Halfen

Diverse, invece, le considerazioni per la risoluzione del problema dovuto agli spostamenti, soprattutto nel caso di spostamenti dovuti alla deflessione²¹, non sempre facili da determinare. Di fatti, sebbene i codici di progettazione strutturale prevedono varie linee guida e restrizioni per i progettisti strutturali dal punto di vista della deflessione – cercando di minimizzare queste deflessioni e impedendo che aumentino oltre certi valori – quasi tutte queste restrizioni sono applicate per mantenere il comportamento della struttura entro le ipotesi teoriche di progettazione e per mantenere la struttura in uno stato operativo. Sono molto lontane dalle limitazioni richieste per mantenere le proprietà dell'involucro e di altri elementi non-strutturali.

Per i motivi sopra citati è stata avanzata l'ipotesi di proporre sistemi di connessione flessibili, in cui i valori di deformazione dinamica e spostamenti di deflessione siano accolti dallo stesso sistema e risolti grazie alla loro capacità di dissipazione. Il principio di base di base di questi sistemi risiede, come nel caso dei sistemi tradizionali, nel garantire alcune funzioni principali ovvero essere in grado di trasferire e gestire le forze applicate, quali:

- carichi verticali²²;
- carichi normali²³, rispetto al piano della facciata;
- carichi trasversali²⁴, rispetto ai sistemi di ancoraggio e paralleli al piano della facciata.

Stabilite le funzioni principali e determinati i carichi di progetto, i componenti di connessione avanzata sono chiamati a isolare gli elementi vetrati dai carichi trasversali, attraverso il loro comportamento flessibile e/o la capacità di dissipare l'energia in direzione trasversale. In questo modo si garantisce che, sebbene il sistema di rivestimento rimanga intatto con la struttura in condizioni normali, si possa fornire un isolamento in direzione trasversale tra i due sistemi per proteggere l'involucro dalla deriva interpiano e, se possibile, dissipare l'energia sismica nell'edificio durante un terremoto.

Il criterio di progettazione di facciate antisismiche dotate di elementi di connessione *avanzati* risiede nella consapevolezza che questi siano in grado da un lato, di fungere come dispositivi di controllo delle azioni indotte dai terremoti – traendo ispirazione dal concet-

to originale degli smorzatori a massa accordata, *Tuned Mass Damper* –, dall'altro di agire come assorbitori passivi di impatto [Bedon & Amadio, 2018b; Gong et al., 2019b]. In questo senso, lo smorzamento della connessione deve essere considerato come una variabile di progetto [Di Giovanni & Bernardini, 2020].

Già anni prima, gli autori Bedon e Amadio [2017], avevano indagato la possibilità di applicare questi dispositivi di connessione avanzata ad altre tipologie di facciate, valutandone le funzionalità non solo rispetto ai carichi sismici ma anche in caso di esplosione. La fattibilità di questa soluzione è stata verificata in modo preliminare servendosi di modelli numerici agli elementi finiti, attraverso software di modellazione, simulando il comportamento dinamico in diversi scenari di carichi "estremi".

Lo scopo principale era rivolto nella capacità di tali *sistemi avanzati* di agire nell'interfaccia tra la facciata continua e la struttura di un edificio di riferimento, proponendosi come un aspetto chiave per la validazione del processo di implementazione delle strategie di mitigazione sismica in facciata.

Riportando quanto espresso dagli autori si afferma che "*sono necessari approcci multidisciplinari e criteri specifici di progettazione fail-safe*" – ovvero il processo in cui vengono previste *ex ante* soluzioni "*a prova di guasto*" atte a prevenire la rottura degli elementi vetrati, in caso di sistemi di facciata, attraverso il dimensionamento e distribuzione appropriata degli elementi di connessione [Di Sivo & Ladiana, 2014]. Tale progettazione deve tenere conto dei requisiti strutturali volti a migliorare la risposta di un dato edificio sotto una configurazione di carico assegnata, ma anche di decisioni termiche, economiche, sociali, tecnologiche.

Da questi assunti, deriva il ruolo chiave degli elementi di connessione avanzata, intesi come elementi che siano in grado di superare i limiti normativi nel campo della progettazione sismica ed evitare i danni dovuti al comportamento fragile degli elementi vetrati.

Come ormai acclarato, i codici normativi non dispongono di linee guida che accompagnano i tecnici del settore verso la progettazione di elementi a-sismici, si riferiscono principalmente all'utilizzo di analisi di rischio [Aiello et al., 2018]. Tuttavia, un'appropriata progettazione dei sistemi di ancoraggio dovrebbe essere in grado di superare i gap normativi, limitando la forza massima applicata sul piano del pannello di vetro, al fine di proteggerlo. Lo studio condotto da Khoraskani [2015] "*Advanced Connection System for Architectural Glazed*" si propone come un esempio cardine per l'indagine tassonomica delle tipologie dei componenti di connessione avanzata, di cui si riportano gli aspetti principali. Generalmente i componenti di connessione possono essere divisi in tre parti funzionali:

- ancoraggio all'involucro;
- corpo di connessione;
- ancoraggio alla struttura.

Le tipologie variano a seconda del tipo di rivestimento del sistema involucrato – opachi o trasparenti, massivi o leggeri –, al sistema strutturale in cui è previsto l'alloggiamento della facciata – struttura in calcestruzzo, in acciaio o in legno – e alla funzione della connessione. Ciò si traduce in un ventaglio tipologico-prestazionale ampio a favore dei progettisti del settore.

Il meccanismo di dissipazione è affidato nella maggior parte dei casi al "corpo" della connessione, adottando diversi approcci meccanici, che possono essere sintetizzati in quattro tipologie principali:

- *Connessioni con smorzamento allo snervamento*¹⁵;
- *Connessioni visco-elastiche a taglio*¹⁶;
- *Connessioni con smorzamento per attrito*¹⁷;
- *Isolatori non dissipativi*¹⁸.

Di seguito verranno riportate alcune specifiche sui sistemi di connessione sopracitati per l'applicazione negli involucri edilizi ai fini dell'analisi critica che è stata condotta per comprendere in maggiore misura le variabili legate alla sperimentazione.

L'impiego di *connessioni con smorzamento allo snervamento* nei rivestimenti degli edifici è limitato ai sistemi di rivestimento pesanti, come i rivestimenti in calcestruzzo o le lastre di rivestimento in terracotta, dove lo snervamento delle piastre metalliche può essere facilmente raggiunto. Nei sistemi di rivestimento leggeri, per adattare i connettori di smorzamento dello snervamento, lo spessore e le dimensioni dei componenti metallici dovrebbero ridursi notevolmente mettendo a rischio l'integrità strutturale del dispositivo di connessione, per questo motivo sono poco o per nulla utilizzati nei sistemi di facciata.

L'impiego di *connessioni visco-elastiche a taglio* negli involucri edilizi è stato introdotto recentemente. L'obiettivo della progettazione di queste connessioni è stato quello di sviluppare un sistema che garantisca l'allineamento dei pannelli di rivestimento e mantenga alti livelli di duttilità in direzione laterale, sostenendo al contempo il peso dei pannelli, attraverso cuscinetti in neoprene elastomero rivestiti con piastre di acciaio. Le proprietà a taglio dipendono solo dal materiale elastomero e dalle dimensioni dei "cuscinetti".

L'impiego di connessioni visco-elastiche a taglio negli involucri edilizi è stato introdotto recentemente. L'obiettivo della progettazione di queste connessioni è stato quello di sviluppare un sistema che garantisca l'allineamento dei pannelli di rivestimento e mantenga alti livelli di duttilità in direzione laterale, sostenendo al contempo il peso dei pannelli, attraverso cuscinetti in neoprene elastomero rivestiti con piastre di acciaio. Le proprietà a taglio dipendono solo dal materiale elastomero e dalle dimensioni dei "cuscinetti".

Le connessioni con smorzamento per attrito, invece, sono alla base di un gran numero di dispositivi di dissipazione dell'energia nell'ingegneria strutturale. Un esempio ben noto di questi dispositivi è la connessione bullonata a fessura introdotta da FitzGerald et al. [1989] come mostrato nella Figura 6.

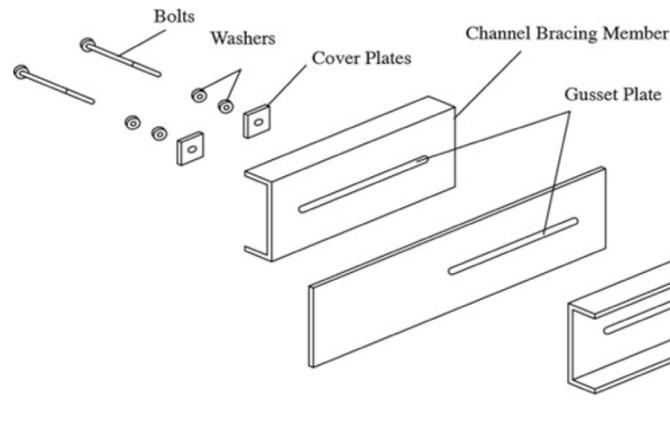


Fig. 6. Connessione bullonata a fessura introdotta da FitzGerald et al. (1989)

Nei meccanismi di connessione precedenti, il comportamento di dissipazione dell'energia è stato considerato come base per la progettazione delle connessioni e si verificava nella massa del materiale degli elementi che lo compongono. Nel meccanismo di connessione ad attrito, l'azione di dissipazione dell'energia – che si verifica tra le superfici di due elementi a contatto – viene utilizzata come concetto per la progettazione del dispositivo di connessione. I sopracitati elementi di connessione basano il loro comportamento sulla capacità di dissipare energia, ma l'approccio meccanico può essere basato anche sulla capacità di isolare gli elementi di facciata.

Da questi assunti deriva l'applicazione degli isolatori non dissipanti.

Come nel caso delle "connessioni con smorzamento allo snervamento", gli *isolatori non dissipanti* vengono applicati nel caso di rivestimenti massivi, sia per proteggere il sistema di rivestimento durante un terremoto, sia per evitare effetti indesiderati e non calcolati del sistema di rivestimento sulla struttura dell'edificio.

Per cui da risultati dello studio sopracitato, maggiore attenzione viene posta sulle connessioni con smorzamento ad attrito. L'approccio meccanico di questa tipologia di connessione è stato indagato per la prima volta da Soong e Dargush [1997] e si basava sulla capacità di attrito tra due superfici scorrevoli per dissipare energia. Quest'intuizione è derivata grazie ad un parallelismo con i freni dell'automobile.

Un vantaggio di questi componenti è che possono essere regolati in modo da trasmettere una quantità limitata di forza tra i due sistemi collegati; se la forza supera un certo limite, il dispositivo non trasmetterà più la forza eccedente e subirà solo uno spostamento nella direzione della forza esercitata fino a raggiungere la sua capacità di spostamento massima, andandosi a definire come elemento di sacrificio [Lee et al., 2021]. L'altro vantaggio dei dispositivi di smorzamento ad attrito è che si tratta di dispositivi piuttosto semplici, facili da produrre e da utilizzare nella costruzione di facciate continue. Possono essere applicati al posto della maggior parte delle staffe esistenti con modifiche minime o nulle.

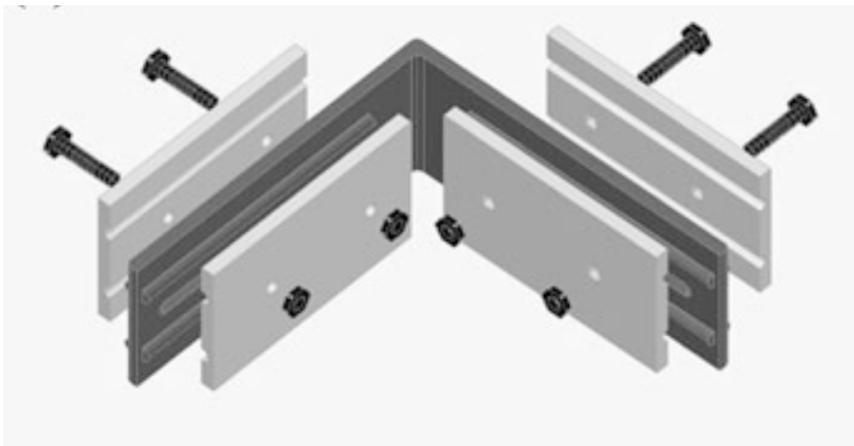


Fig. 7. Componenti costitutive della connessione con smorzamento per attrito proposto da Khoraskani (2015)

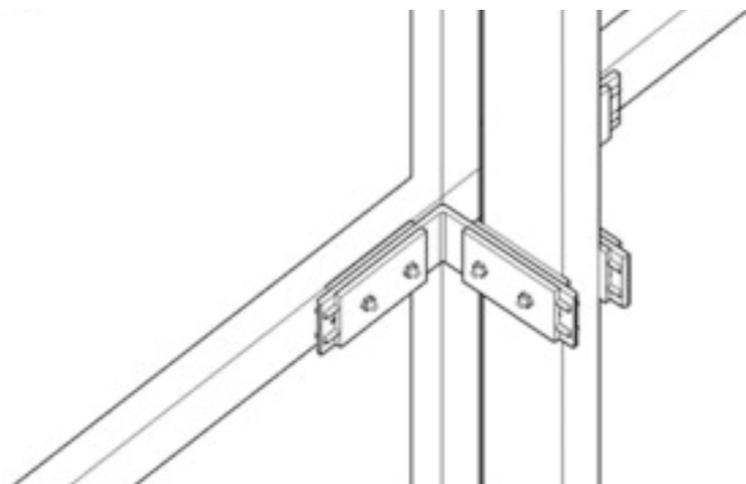


Fig. 8. Schema di ancoraggio del sistema di connessione con smorzamento per attrito proposto da Khoraskani (2015)

Le Figure 7 - 8 mostrano schematicamente la staffa di collegamento a frizione, che è la forma più semplice di connettore a frizione. Come mostrato nelle figure, il dispositivo di connessione è quasi identico a una staffa di connessione tradizionale, con l'unica differenza che la staffa utilizzata è accompagnata da due piastre scorrevoli su ciascuna delle "ali".

Queste consentono alla staffa di scorrere in due direzioni tra le piastre di contenimento. Lo scorrimento della staffa tra le piastre di contenimento sarà controllato dalla pressione delle due piastre sulle ali della staffa.

È essenziale che i materiali utilizzati nei connettori ad attrito presentino le due caratteristiche indicate di seguito:

- avere coefficienti di attrito simili in entrambi i casi di attrito statico e dinamico tra le superfici di scorrimento;
- avere una notevole resistenza agli attacchi ambientali, poiché la corrosione e altre alterazioni che possono verificarsi sulla superficie delle piastre possono modificare drasticamente il comportamento del dispositivo di collegamento.

In conclusione, per la loro semplicità, sia in termini di studio analitico che di utilizzo pratico, e per l'elevato controllo delle forze trasmesse, i connettori a smorzamento d'attrito sono proposti in questa ricerca come tecnologie di connessione idonee capaci di sfruttare la compatibilità meccanica tra l'involucro vetrato e la struttura dell'edificio.

Le innovazioni relative all'implementazione di questi elementi non risulta di fatto essere entrata in regime all'interno del mercato produttivo delle varie aziende fornitrici dei sistemi di facciata continua. Questo aspetto può essere compreso se si fa riferimento al fatto che gli studi condotti per questa tipologia di sistemi risultano essere ancora un campo poco esplorato e considerando i costi elevati che questi dispositivi possono raggiungere a causa di materiali poco conosciuti.

A valorizzare questo concetto si considera la scarsa domanda di facciate antisismiche da parte dei committenti, nonostante l'acclarata vulnerabilità sismica che contraddistingue alcuni paesi, tra cui l'Italia.

Tuttavia, è auspicabile dotare i sistemi di connessione con materiali le cui caratteristiche dissipative risultino avanzate. A questo scopo si possono concepire vari tipi di dispositivi e l'uso di materiali ad alto smorzamento o intelligenti, come, ad esempio, quelli a base di attrito o le leghe a memoria di forma, che potrebbero contribuire a migliorare le performance dei sistemi di facciata [Gong et al., 2019a].

In questo senso, la ricerca si propone di avanzare alcune ipotesi relative alla composizione materica di questi elementi di connessione. La motivazione è duplice:

- migliorare le performance prestazionali di questi sistemi di connessione flessibile, conferendo all'involucro edilizio capacità adattive;
- proporre una soluzione materica virtuosa che non risulti troppo costosa al fine di essere adottata dalle varie aziende fornitrici dei sistemi di facciata continua.

Da questi assunti, il paragrafo successivo riguarda la trattazione delle innovazioni materiche che coinvolgono la funzionalizzazione evoluta dell'involucro edilizio, ponendo l'attenzione sui materiali cosiddetti intelligenti in grado di regolare la loro configurazione o le loro proprietà fisiche in risposta alle sollecitazioni esterne.

4.3 I materiali avanzati per applicazioni estreme

Come ormai consuetudine, vengono di seguito ripresi alcuni concetti chiave al fine di esplicitare il percorso evolutivo-scalare della ricerca in oggetto. Nel primo capitolo – "*Le prestazioni dell'involucro contemporaneo*" – sono emersi i processi di ricerca del settore legati all'innovazione ed evoluzione delle tecnologie che compongono l'involucro edilizio.

Come espresso da Iommi [2018], infatti, questa innovazione può avvenire tramite l'adozione di due approcci diversi: su *macro-scala* – grazie all'integrazione di dispositivi avanzati – e

su *micro-scala* – ricorrendo al miglioramento delle proprietà fisiche-meccaniche di alcuni materiali. Nel paragrafo precedente – “*Le variabili del sistema costruttivo e le fasi di progettazione antisismica degli elementi di connessione nei sistemi di facciata continua*” – l’indagine è stata svolta rispetto l’integrazione di dispositivi di connessione “avanzati” per cui adottando un approccio su macro-scala.

Nonostante la disamina dei diversi componenti di connessione “*flessibile*” è emersa la necessità di indagare i processi di innovazione in campo materico – attraverso, quindi, un approccio su micro-scala – al fine di migliorare le performance sismiche.

In questo senso, di forte interesse, risulta la composizione materica degli elementi che costituiscono il sistema di connessione telaio-facciata e struttura primaria di supporto. Nella fattispecie, s’indagano le performance materiche che siano in grado di contribuire alla capacità di smorzamento dell’intero sistema sollecitato, migliorando così la gestione di risposta degli effetti delle vibrazioni sugli edifici indotti dall’azione sismica.

Prima di fare ciò, occorre delineare una panoramica generale, in cui emerga lo stretto rapporto che intercorre tra i processi di innovazione materica e la progettazione di involucri edilizi altamente performanti e adattivi entrando poi nel *focus* del paragrafo che risiede sull’indagine dei materiali avanzati per applicazioni estreme.

Si parte dal presupposto che i processi di innovazione materica hanno scandito “*i progressivi cambiamenti nella struttura dei materiali dell’involucro edilizio, aumentandone le prestazioni e la complessità, offrendo ai progettisti una gamma sempre più ampia di possibilità nelle scelte costruttive*” [Lucarelli et al., 2012]. Questi cambiamenti hanno riguardato la configurazione del materiale, l’integrazione di materiali diversi combinati tra loro – attraverso un processo di specializzazione degli strati della materia – fino alla caratterizzazione puntuale degli strati che compongono l’involucro edilizio e lo definiscono qualitativamente, diventando una vera e propria pelle [Herzog et al., 2012].

Di conseguenza anche il processo di progettazione e realizzazione dell’involucro è profondamente cambiato, grazie all’ampliamento delle alternative a disposizione del progettista, ma anche del bagaglio di conoscenze necessarie per un corretto impiego di tecnologie sempre più innovative basate spesso sull’utilizzo di materiali avanzati. Si tratta di materiali “*progettati su misura*” per una specifica esigenza [Langella, 2021] ottimizzando le prestazioni espresse in relazione al “*contenuto*” materico.

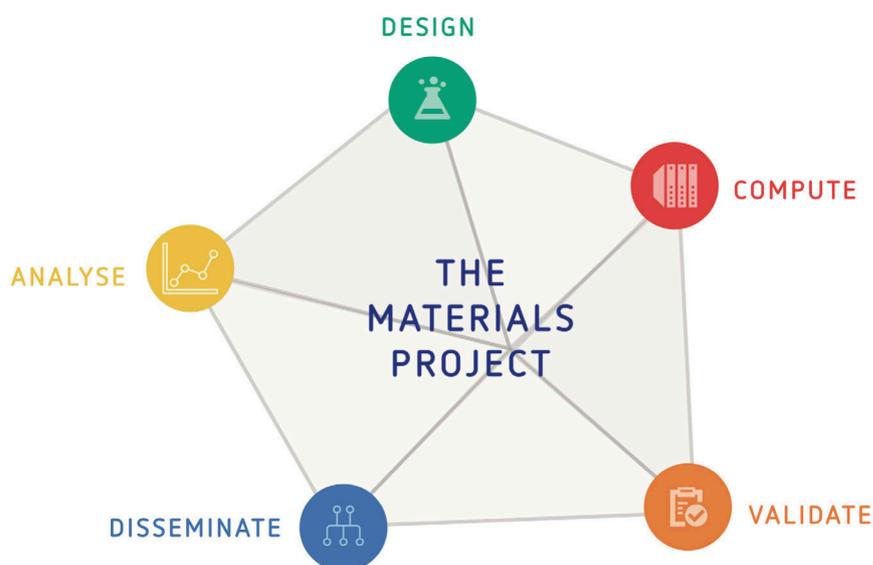


Fig. 9. Overview of the Materials Project thrust (Source: Jain et al., 2013)

Negli ultimi decenni, sono stati introdotti nel mercato componenti altamente performanti grazie allo sviluppo di una maggiore conoscenza operata nel campo della scienza dei materiali. I materiali avanzati, infatti, che vengono impiegati in ambito edilizio derivano spesso da *processi di trasferimento tecnologico* da altri settori industriali caratterizzati da forti spinte all'innovazione – quali il settore aeronautico, automobilistico o biomedico –, in cui la ricerca nel campo di materiali con prestazioni sempre più elevate costituisce una condizione imprescindibile per la realizzazione di prodotti e sistemi più efficienti.

La proliferazione quindi di materiali "avanzati", "innovativi", o semplicemente "nuovi", non rappresenta solo il frutto di tendenze generali del mercato che spingono verso una continua evoluzione dei prodotti offerti, ma riflette anche una mutata condizione nel rapporto tra l'uomo e le possibilità di trasformazione della materia che ha aperto la strada a una diversa modalità nello sviluppo, e quindi alla "creazione", di nuovi materiali [Mandaglio, 2011]. I progressi e l'interazione reciproca di ambiti tecnologici differenti – biotecnologie e nanotecnologie, tecnologie informatiche e di comunicazione – hanno, di fatto, rivoluzionato il mondo della chimica e della tecnologia dei materiali, moltiplicandone le potenzialità e le prospettive. Considerando che i materiali tradizionali hanno un uso ormai consolidato, quindi, una conoscenza sufficientemente approfondita ed una lunga e vasta esperienza applicativa, per i materiali innovativi si intendono, non tanto quelli realizzati in tempi più recenti, quanto i materiali cosiddetti *progettabili*, i cui livelli di prestazione possono essere fortemente elevati per soddisfare specifiche esigenze.

Per queste ragioni, l'uso di materiali innovativi implica anche un diverso approccio progettuale, il materiale è progettato in modo da renderlo idoneo a garantire la prestazione richiesta e non già controllato a posteriori, in funzione delle esigenze progettuali.

Da questi assunti emerge come la contaminazione di materiali emergenti/avanzati e tecnologie provenienti dalla quarta rivoluzione industriale stanno modificando radicalmente il paradigma della progettazione [Conato & Frighi, 2018], costituendo un driver per l'innovazione tecnologica sia nell'industria che nel campo accademico.

La necessità di accelerare lo sviluppo di tecnologie e prodotti sempre più performanti e oggi, più sostenibili [Antonini et al., 2019], viene riscontrata in ambito europeo attraverso piani e strategie che rispondano agli obiettivi presenti all'interno del *Green Deal* e *Horizon 21-27* [European Commission, 2019; European Commission Decision, 2021].

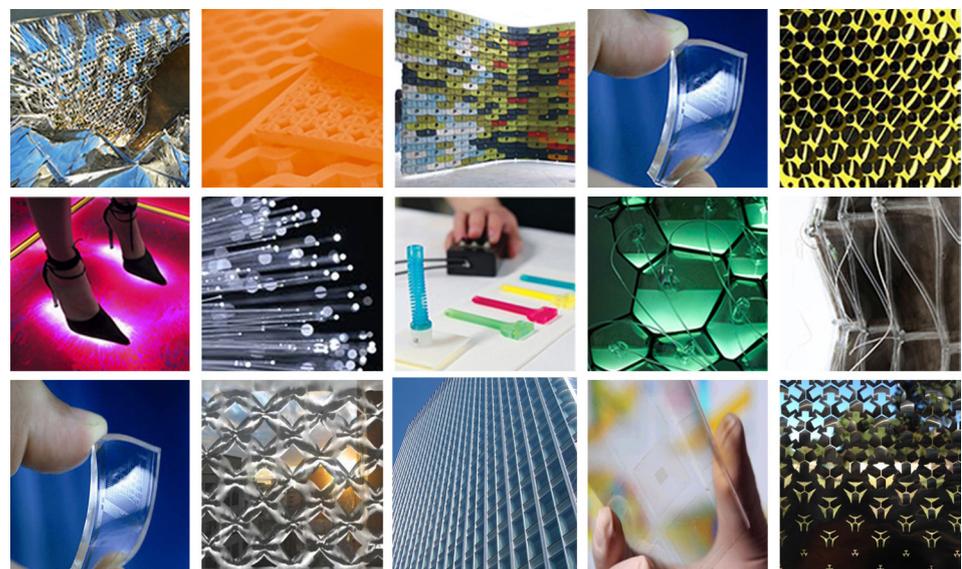


Fig. 10. Contaminazione dell'innovazione materica in architettura

Nel campo dell'innovazione materica questa accelerazione si avvale del contributo della Piattaforma Europea, *EuMat*, un database il cui obiettivo è quello di supportare l'immissione all'interno del mercato produttivo di materiali emergenti, altamente performanti, "tenendo in considerazione non solo l'avvio della produzione ma l'intero ciclo di vita del materiale prodotto" [Keiper & Igartua, 2018].

Fra i temi emergenti, la funzionalizzazione evoluta dell'involucro edilizio è orientata verso la progettazione di sistemi sempre più complessi, responsivi, adattivi, smart, attraverso la sperimentazione di nuovi componenti e materiali caratterizzati da elevate prestazioni [Romano, 2011]. In questo senso, le recenti innovazioni materiche [Mohamed, 2017] sono fortemente correlate alla nuova concezione di involucro edilizio, il cui scopo è legato alla progettazione e realizzazione di elementi con capacità reattive, in grado di regolare la loro configurazione o le loro proprietà fisiche in risposta ai cambiamenti delle condizioni interne ed esterne [Bianco et al., 2018]. La composizione materica di componenti e sistemi edilizi ha, quindi, assunto un ruolo chiave durante le fasi di progettazione, vedendosi costretta a cedere il passo alle potenzialità prestazionali [Hensel et al., 2008].

Dall'analisi dello stato dell'arte condotta da Elettar [2013] sull'applicazione di material *smart* per l'architettura, l'autore ha delineato le differenze che intercorrono fra i materiali tradizionali e i materiali intelligenti. Contrapponendosi tendenzialmente ai primi, risulta necessario sottolineare la capacità di quest'ultimi di essere reattivi allo stimolo esterno grazie a funzionalità tecnologiche incorporate, operando attraverso cambiamenti di proprietà fisiche interne e rispondendo a caratteristiche come immediatezza, transitorietà e auto-attuazione [Dewidar et al., 2013].

Queste caratteristiche applicate in architettura possono contribuire in modo significativo ad aumentare le prestazioni dell'involucro edilizio [Saidam et al., 2017]. È opportuno, però, studiare come i materiali intelligenti possano essere applicati alla progettazione di pelli architettoniche adattive [Wigginton & Harris, 2013].



Fig. 11. Prototipo "Shaoe Shift". (Source: Addington & Schodek, 2010)

Rispetto alla loro definizione e classificazione, i materiali intelligenti vengono identificati in base alle loro prestazioni, attraverso un cambio di proprietà e/o scambio di energia sono in grado di produrre energia elastica e deformarsi [Addington & Schodek, 2012], senza una fonte di alimentazione esterna. Per questo motivo, sono estremamente interessanti per i progettisti di edifici che mirano ad aumentare la funzionalità e le prestazioni, riducendo allo stesso tempo il consumo di energia.

Sung [2011] ha sperimentato l'uso di bimetalli termici per creare strutture autoportanti, attraverso l'uso di pelli bimetalliche che sono in grado di aprire i loro pori per *auto-ventilarsi* senza l'uso di fonti di energia esterne.

Anche l'uso di polimeri elettro-attivi per le pelli cinetiche è all'avanguardia della ricerca nel settore, grazie alla loro velocità di risposta, l'ampio potenziale di deformazione attiva e la resilienza. Kretzer e gli studenti del Politecnico di Zurigo hanno sviluppato un prototipo di pelle dinamica (Fig. 11) chiamato "*Shape Shift*" [Kretzer & Rossi, 2012]; un'unità stratificata e autoportante fatta di pellicole elastomeriche che si deforma quando viene caricata elettricamente.

Al fine di sfruttare le proprietà e l'installazione di materiali intelligenti è necessario trovare approcci per muoversi nella comprensione dei meccanismi biologici [Lopez et al., 2017]. Secondo il Center for Smart Materials and Structure, CSMS, i materiali intelligenti sono definiti come "*materiali che percepiscono e reagiscono alle condizioni ambientali o agli stimoli – ad esempio, segnali meccanici, chimici, elettrici o magnetici*".



Fig. 12. Immagine di copertina sito Ask Nature

Nella definizione architettonica, il termine "*materiali intelligenti*" si applica a materiali e sistemi in grado di adattarsi reattivamente ai cambiamenti degli ambienti interni attraverso le proprietà dei materiali o la loro sintesi. I materiali intelligenti sono spesso considerati una logica estensione della traiettoria di sviluppo dei materiali verso performance più selettive e specializzate.

Da questo punto di vista, sono simili al comportamento degli esseri viventi, che eseguono funzioni sia di rilevamento che di attuazione e sono in grado di adattarsi ai cambiamenti dell'ambiente. I materiali intelligenti possono, quindi, modificarsi in risposta a uno stimolo esterno o rispondere allo stimolo producendo un segnale di qualche tipo [Mohamed, 2017]. Esistono una serie di interessanti sviluppi nel campo della biomimetica che potrebbero essere ulteriormente tradotti in applicazioni industriali.

Molti di questi si concentrano sullo studio della capacità degli organismi di percepire e reagire al proprio ambiente, con l'obiettivo di applicare gli stessi principi allo sviluppo di materiali intelligenti [GMIS, 2019]. Rispetto a queste definizioni, molti materiali intelligenti possono essere inclusi nel campo della biomimetica, per varie applicazioni, tra cui, nel settore edilizio, l'involucro architettonico [Giglio, 2020].

All'interno della categoria dei materiali intelligenti e, per meglio comprendere il loro funzionamento, si fa infine riferimento ai cosiddetti materiali *Interattivi, Connessi e Smart*, ICS (Fig. 13). Questi vengono definiti come materiali che sono in grado di rispondere in modo contestuale e cambiando in modo reversibile non solo le loro qualità ma anche le proprietà formali, dovute ad un cambio di temperatura o umidità ma anche ad un fenomeno ambientale. Incorporando elementi bioattivi sono, infatti, in grado di generare una risposta a uno stimolo ambientale [Parisi et al., 2018]. Caratteristica fondamentale di questi materiali è la loro capacità intrinseca di generare o reagire agli input di energia, con la possibilità di auto-ripararsi [Bekas et al. 2016]. Il materiale è l'intero processo - *interattivo, connesso e intelligente* - in quanto risponde a diverse forme di stress o degradazione attraverso la sua composizione. La qualità del comportamento e il modo in cui i materiali si comportano è programmabile, cioè sono ingegnerizzati per rispondere in modo predeterminato allo stimolo in un intervallo prestabilito [Rognoli & Ferraro, 2021].

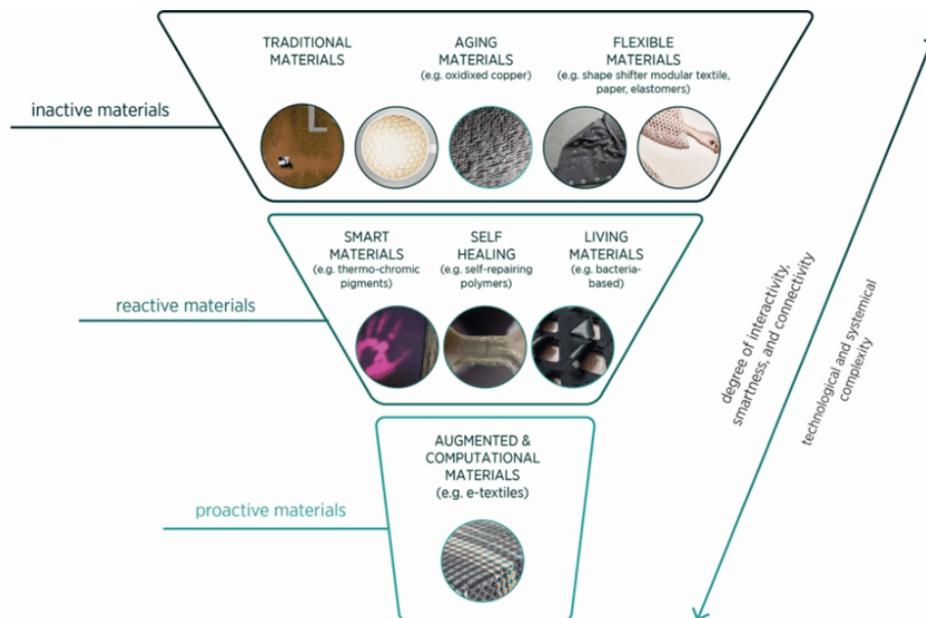


Fig. 13. Mapping ICS Materials: Interactive, Connected, and Smart Materials. (Source: Rognoli & Ferraro, 2021)

Tra i materiali avanzati, applicati e applicabili nel settore edilizio, si annoverano i *materiali a memoria di forma SMA* [Hietanen, 2003]. Si riferisce a una "nuova" classe di materiali la cui capacità è quella di recuperare la propria forma predefinita dopo aver subito una grande deformazione, anche fino al 14%, della lunghezza iniziale [Andrawes, DesRoches, 2005]. L'introduzione nel mercato produttivo di questi materiali, però, non è recente e risale agli anni '30⁹⁹, tuttavia l'interesse da parte dei ricercatori per l'applicazione di questo materiale è stata ripresa negli ultimi decenni [Zareie, et al., 2020].

Le ragioni del ritardo nell'introduzione degli SMA sono dovute principalmente alla mancanza di conoscenze sul comportamento termomeccanico, all'elevato costo di produzione e alla scarsa affidabilità degli SMA disponibili [Gresser & Cozzarelli, 1991].

I recenti sviluppi degli SMA hanno portato a una conoscenza approfondita della *fase austenite-martensite* e della *fase martensite-austenite*²⁰, riducendo i costi di produzione, incrementando un gran numero di lavori di ricerca e quindi aumentando l'affidabilità di questi materiali. Queste fasi sono possibili grazie alle loro proprietà fisiche uniche note come *effetto memoria di forma*, SME (Fig. 14) ed *effetto superelastico*, SE (Fig. 15).

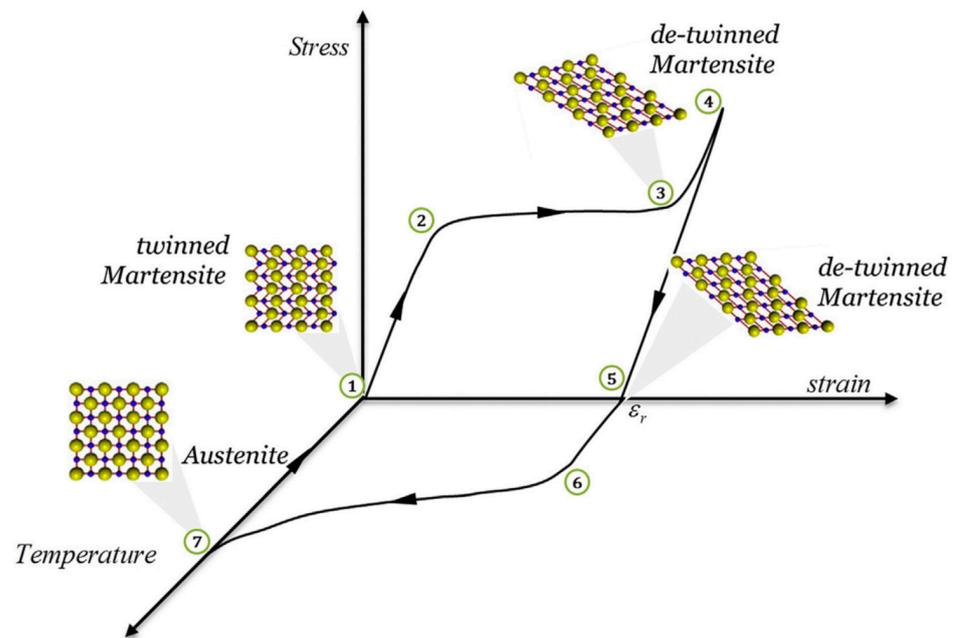


Fig. 14. Shape Memory Allow Effect (Source: Concilio et al., 2021)

Il primo effetto si ottiene grazie alla capacità del materiale di riacquistare la sua forma originale se sottoposto a riscaldamento. L'applicazione di calore all'interno o all'esterno aumenta la temperatura al di sopra della sua trasformazione di fase e fa sì che lo SMA recuperi la sua forma iniziale [Zareie et al., 2020]. Per effetto superelastico SE, invece, si considera la capacità del materiale di recuperare la sua configurazione originale da una grande deformazione subito dopo la rimozione del carico applicato [Sun et al., 2019].

La modifica della microstruttura cristallina dello SMA è la principale responsabile dello SME e della SE. Per cui applicando un carico meccanico e/o un gradiente di temperatura avviene la modifica della struttura cristallina.

Grazie alle proprietà meccaniche degli SMA, i fenomeni SE e SME, sono in grado di assorbire l'energia indotta dal carico esterno durante la procedura di carico-scarico.

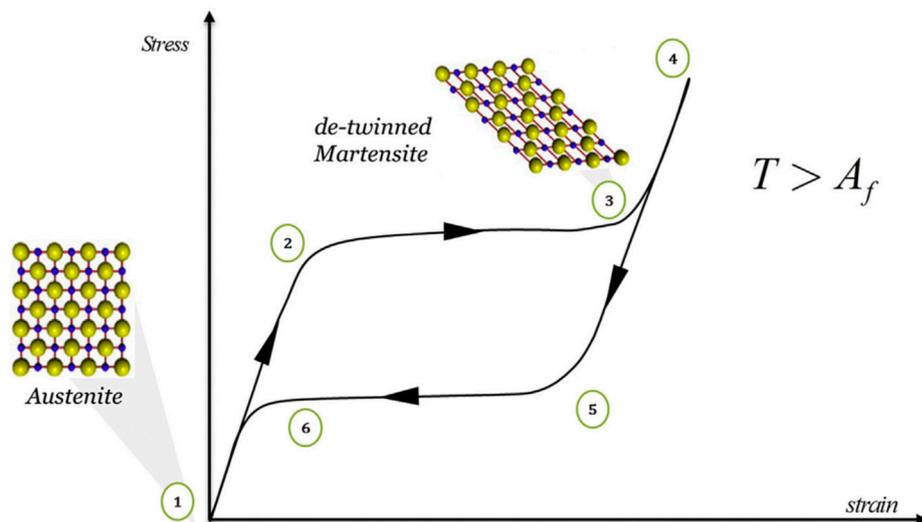


Fig. 15. Superelastic Effect (Source: Concilio et al., 2021)

Nelle tipologie dei materiali a memoria di forma rientrano le leghe, i polimeri o le fibre le cui capacità risiedono nell'allungarsi, piegarsi o piegare, a seconda dello stimolo ambientale e le cui composizioni molecolari controllano e producono performance a livello di forma del materiale per interagire e deformarsi [Elettar, 2013].

Gli SMA superelastici, grazie alle loro proprietà ideali, sono esempi particolarmente virtuosi di materiali intelligenti promettenti nel campo dell'architettura e ingegneria [Song, et al., 2006]. L'integrazione di questa classe di materiali è applicata nei dispositivi passivi di controllo delle vibrazioni, grazie alle loro proprietà in termini di capacità di *auto-riparazione*. I sistemi di risposta dinamica dotati di SMA superelastici, infatti beneficiano della capacità di smorzamento supplementare attribuito alla dissipazione di energia. Inoltre, questi materiali presentano un'eccellente resistenza alla corrosione e alla fatica [Chan, Albermani, 2008]. Il punto focale riguarda, quindi, la capacità del materiale di generare un movimento reversibile o addirittura di adattarsi cineticamente in tempo reale, costituendo in un unico elemento in ciò che spesso viene attuato attraverso l'inserimento di attuatori e sensori sempre più complessi e informatizzati [Drossel et al, 2015].

In questo senso l'innovazione materica in atto sui materiali a memoria di forma, siano essi leghe, polimeri e/o fibre, permette di identificarli come *materiali reattivi* che combinati con altre entità, in un sistema più complesso e intelligente, possono migliorare la loro connettività e intelligenza [Seo et al., 2015]. Ciò significa che questi materiali, applicati alla progettazione di componenti che hanno la funzione di assorbire e dissipare energia derivante da carichi eccezionali, come quelli sismici, sono in grado di conferire grande capacità di deformazione all'intero sistema.

La dissipazione di energia e la capacità di smorzamento, ovvero la SE e la SME dei materiali SMA, sono le chiavi per sviluppare componenti flessibili sfruttando la compatibilità meccanica tra telaio-facciata e struttura primaria di supporto.

Per questo motivo, in questo studio si propone che il miglioramento delle prestazioni di un dispositivo di connessione flessibile possa avvenire implementando questi sistemi con i materiali a memoria di forma superelastici. Dagli studi condotti in altri settori è stato dimostrato che l'utilizzo di questo materiale intelligente, per quanto riguarda la dissipazione dell'energia, le tensioni residue, la resistenza post-snervamento e la deformazione permanente, hanno performance superiori rispetto agli smorzatori convenzionali.

Come enunciato nel precedente Capitolo – “I dispositivi di risposta dinamica con capacità di smorzamento” –, le innovazioni in campo di smorzatori per applicazioni civili possono essere intese un buon parallelismo per configurare strategie di mitigazione sismica basate sull’approccio *fail-safe* (Cfr. Paragrafo 4.2).

In questo senso ci si riferisce in particolar modo allo studio condotto da Zareie et al., [2020], i quali hanno schematizzato attraverso una tabella (Cfr. Tabella 1) le principali innovazioni messe in atto attraverso l’applicazione di materiali a memoria di forma in strutture di acciaio.

Sistema	Azione	Possibili uscite	Legga
Regolatore di frequenza	- Sistema semiattivo con fili SMA in un telaio in acciaio a 5 piani	- Aumenta la frequenza naturale di circa il 32%	NiTi
Smorzatore	- Smorzatore basato su SMA; - Smorzatore basato su SMA in un ponte strallato; - SMA restrainer in ponti a semplice appoggio; - Smorzatore SMA in un ponte strallato.	- Diminuisce gli spostamenti lungo i piani; - Sopprime la risposta alle vibrazioni, le performance del sistema dipendono dal luogo di installazione; - Riduce gli spostamenti relativi delle cerniere; - Risposta alle vibrazioni comparabile con smorzatore SMA e strategia di controllo attivo LQR.	NiTi
Sistema di rinforzo	- Rinforzo a base di lega a memoria di forma in telai in acciaio a 6 piani; - Rinforzo con SMA in un telaio rinforzato in acciaio modulare a 6 piani; - Sistema di rinforzo NiTi in 4 combinazioni in un telaio in acciaio a 4 piani; - Sistema di rinforzo diagonale basato su SMA in un telaio in acciaio a 4 piani; - Sistema di rinforzo SMA a forma di x pre-teso nel telaio a 1 piano; - Smorzatore ad attrito in lega a memoria di forma in un telaio in acciaio a 3 piani.	- Diminuisce il rapporto di deriva, l’accelerazione di picco del pavimento, il rapporto di deriva interpiano residuo, ricentrando; - Riduce la deriva residua massima tra i piani fino al 98%; - Riduce la deriva massima tra i piani ed elimina lo spostamento permanente del tetto; - Riduce la richiesta di spostamento del tetto; - Riduce la richiesta di spostamento; - Migliora le derive interstory, le accelerazioni e gli spostamenti.	NiTi
Collegamento travi-pilastri in acciaio	- Tendini SMA (in fase maternsite) nelle connessioni; - Piastre SMA confinate nella regione della cerniera plastica; - Dispositivo di isolamento sismico con SMA.	- Fornisce una buona capacità di dissipazione dell’energia e duttilità. Recupera la forma originale dopo il riscaldamento; - Attenua le deformazioni permanenti e previene l’instabilità locale; - Aumenta la capacità di dissipazione dell’energia e la capacità di ricentraggio.	NiTi
Sistema di isolamento dalle vibrazioni	- Dispositivi di isolamento sismico con SMA in un edificio; - Cuscinetto in gomma integrato con SMA in un telaio a 3 piani; - Cuscinetto in gomma naturale (NRB) e gomma ad alto smorzamento (HDRB) con fili SMA; - Barre di piegatura SMA nei sistemi di isolamento della base con cuscinetti in gomma lead-plug (LRB).	- Fornisce flessibilità e un buon controllo della forza trasmessa alla struttura principale con la capacità di ricentraggio; - Diminuisce lo spostamento residuo ed è più efficace nelle gamme PGA più alte; - L’NRB migliora il comportamento sismico maggiore dell’HDRB; - Riduce lo spostamento residuo.	NiTi

A fronte di questo studio, risulta necessario, fare un passo indietro e indagare quali sono le attuali tecniche di produzione di questi materiali. Nel primo capitolo è stata annoverata la necessità di attuare strategie di innovazione che siano strettamente connesse al periodo storico in cui ci troviamo.

Non si può rimanere inermi, infatti, alle nuove tecniche di produzione derivanti dalla quarta rivoluzione industriale. Ancora una volta, la contaminazione da diversi settori di scienza quali il campo biomedico o aerospaziale vengono intesi come driver di innovazione, dovendo sviluppare prototipi che siano sinonimo di *leggerezza* e *alte performance*.

La produzione additiva, AM, o la stampa 3D è la tecnica di fabbricazione più avanzata per le SMA. L'AM utilizza polvere o filo come materia prima e fonti di riscaldamento come un laser, un raggio di elettroni o un arco elettrico per realizzare la parte finale. La fonte di riscaldamento aiuta a fondere la materia prima e a depositarla sotto forma di strato per strato ove richiesto.

Lo spreco di materiale, in questo caso, è molto minore, inoltre la richiesta di post-lavorazione è minore rispetto alla metallurgia delle polveri. Le parti da estrudere possono essere realizzate con l'ausilio di software di modelli CAD 3D. Successivamente, la parte creata viene tagliata a strati sottili. Ogni strato rappresenta l'effettiva deposizione di materiale in uno strato e quindi il materiale viene depositato nella forma strato per strato per realizzare la parte finale. Questo processo ha la capacità di costruire SMA a geometria complessa con la migliore precisione dimensionale, spreco minimo e costo rispetto a tutti i processi disponibili. Pertanto, i ricercatori stanno conducendo ulteriori indagini sulle tecniche di produzione additiva per la fabbricazione di SMA.



Fig. 16. Prima di copertina Shape Memory Alloy Effect Engineering. For Aerospace, Structural, and Biomedical Application (Concilio et al., 2021).

In conclusione, grazie alle indagini condotte in altre ricerche [Casagrande et al., 2019, 2021] si ritiene che il miglioramento dei dispositivi di connessione può avvenire applicando – alle

connessioni con smorzamento per attrito – una piastra di strato sottile con la lega a memoria di forma superelastica, la lega NiTi. L'implementazione del sistema di connessione avviene, quindi, applicando sulle "ali" delle staffe in alluminio estruso una configurazione di tipo composito costituito da alluminio estruso e lega a memoria di forma. La produzione della piastra con lega a memoria di forma potrebbe avvenire servendosi delle recenti innovazioni provenienti dalla quarta rivoluzione industriale attraverso l'*Additive Manufacturing*.

La proposta verrà discussa con maggiore accuratezza dopo la valutazione delle prestazioni attuali del sistema di facciata continua, oggetto della sperimentazione. Queste valutazioni saranno effettuate tramite due step: il primo riguarda le attività di testing presso la sezione TCLab del Building Future Lab, il secondo riguarda la modellazione e analisi agli elementi finiti tramite un software di simulazione.

Con particolare riferimento all'ultimo step, è stato necessario effettuare un'ampia indagine al fine di comprendere quelle che sono le caratteristiche che delincono oggi i software di simulazione, al fine di scegliere lo strumento più appropriato per la seconda fase della sperimentazione.

Questi argomenti vengono trattati all'interno del paragrafo successivo "*Confronto tra i software di simulazione per la valutazione delle performance sismiche dei sistemi di facciata continua*".

4.4 Confronto tra i software di simulazione per la valutazione delle performance sismiche dei sistemi di facciata continua

Sinora le *strategie di mitigazione sismica* sono state discusse in modo empirico, riportando quanto emerso dal settore scientifico disciplinare di riferimento. La necessità di dotare l'involucro di *sistemi adattivi* che siano in grado di gestire gli effetti delle azioni sismiche è stata quindi esplorata nell'arco temporale degli ultimi decenni, grazie allo studio analitico-critico degli scenari di impatto – dimostrativi, ai fini della ricerca – che si sono verificati a seguito degli eventi sismici passati.

Il carattere predittivo è risultato, ancora una volta strategico, per l'implementazione delle performance dell'involucro. In questo scenario, in accordo con quanto espresso da Loonen et al. [2018], si afferma che l'uso di software di modellazione e simulazione²¹ può notevolmente accelerare "*lo sviluppo di sistemi e materiali adattivi per le facciate, così come la loro penetrazione nell'industria delle costruzioni*".

Nel corso dei vari capitoli, che hanno strutturato la tesi dottorale, sono state effettuate una serie di valutazioni che hanno come fine ultimo quello di estrapolare gli elementi utili alla progettazione di un elemento di connessione *flessibile* che conferisca all'involucro la sua capacità *adattiva*, migliorando le sue performance sismiche, ed inteso come *seismic mitigation strategy*. Queste valutazioni sono state fatte attraverso un confronto qualitativo basato sui risultati di ricerche pregresse, ma che hanno messo in evidenza la necessità di essere valutate in ambiente simulato con la possibilità, nelle fasi successive, di progettare elementi adattivi attraverso fasi di prototipazione, produzione e test – all'interno di laboratori specializzati – per l'immissione del prodotto nel mercato.

All'interno del testo "*Building Performance Simulation and Characterisation of Adaptive Facades*" gli autori Loonen et al. [2018] hanno trattato la tematica dei software di simulazione per la valutazione delle performance adattive dei componenti d'involucro, mettendo in atto una revisione critica "*dei metodi di modellazione, dei requisiti e delle capacità degli attuali strumenti di simulazione delle prestazioni degli edifici per quantificare accuratamente le performance delle facciate adattive*".

Da questa trattazione è emerso come ancora tutt'oggi la previsione delle performance delle facciate adattive è considerata un compito impegnativo. Ciò è dovuto in parte al fatto che le informazioni su questo argomento sono scarse e frammentarie.

Nelle fasi di modellazione e simulazione per la valutazione delle performance degli involucri edilizi un ruolo strategico lo ricopre la variabile del "tempo". Di fatti, questi strumenti devono essere in grado di rappresentare diversi stati o proprietà dei sistemi involucrati, come ad esempio scale spaziali, risoluzioni temporali e domini fisici. Rispetto alla mutazione dell'accezione di "analisi", da statica-convenzionale a interattiva-intelligente, sono stati delineati requisiti generici aggiuntivi – di cui ogni software deve essere dotato per effettuare un "corretto" processo di valutazione –, di seguito riportati:

- modellazione delle proprietà della facciata variabili nel tempo: le specifiche della facciata – ad esempio le proprietà dei materiali o la posizione dei componenti – devono poter essere modificate durante il tempo di esecuzione della simulazione per tenere conto in modo appropriato degli effetti transitori [Loonen, et al., 2014];

- modellazione del funzionamento dinamico dell'adattamento delle facciate: le interazioni dinamiche nei sistemi di involucro edilizio adattivi danno origine a una forte dipendenza reciproca tra gli aspetti di progettazione e di controllo [Loonen et al., 2013]. Le performance dei sistemi adattivi dipendono completamente dalla strategia di programmazione – cioè dalla logica di controllo – per l'adattamento della facciata durante il funzionamento.

Moloney [2011] la descrive come "il risultato di un progetto con facciate cinetiche è un processo, piuttosto che un oggetto o un artefatto statico". Pertanto, per identificare le caratteristiche dei sistemi di involucro edilizio adattivo ad alte prestazioni, sono necessarie non solo considerazioni progettuali – cioè i parametri di progettazione del sistema di facciata –, ma anche approfondimenti sulle adeguate strategie di funzionamento automatizzato e guidato dagli occupanti della facciata dinamica. Inoltre, la progettazione e il funzionamento efficaci di un sistema di facciata dinamica dipendono anche dall'integrazione con le operazioni degli altri servizi dell'edificio. Per esplorare questi effetti sinergici, è importante tenere conto di questa integrazione nella strategia di simulazione.

La trattazione generica dell'importanza di avvalersi di software di modellazione e simulazione – per valutare il comportamento adattivo dell'involucro edilizio – si declina ulteriormente rispetto agli aspetti funzionali e prestazionali che si vogliono mettere in atto durante la fase di progettazione.

Risulta chiaro, e ormai acclarato dai diversi versanti, che ogni software si specializza e si sta specializzando per determinate analisi. Nello specifico, non verranno utilizzati gli stessi software per valutare il risparmio energetico – che si attua, ad esempio, attraverso un sistema di illuminazione – e le strategie di mitigazione sismica per un dato sistema di facciata. Nonostante ciò, le linee di ricerca sulle performance dei software di modellazione e simulazione ruotano sull'implementazione di software integrati ed estesi in cui possono essere gestiti, in un unico strumento, tutti i livelli prestazionali richiesti per la progettazione di un involucro edilizio.

In questa sede, riprendendo quanto espresso all'interno del paragrafo 1.2 "Performance Based Seismic Design and Building Simulation Performance, processi a confronto" il confronto prestazionale avviene in una prima trattazione delle principali funzionalità dei software – utilizzati dalla letteratura di settore – e di software inesplorati per la valutazione delle performance sismiche di una facciata continua. Lo scopo principale risiede nel determinare – rispetto ad una serie di parametri – la scelta dello strumento da impiegare nella fase sperimentale²² della presente ricerca.

Questo paragrafo può essere inteso come un tool di supporto, rivolto a professionisti e ricercatori che si affacciano a queste tematiche, per la scelta di un determinato software da utilizzare per le analisi sismiche.

Il progresso scientifico-tecnologico ha consentito la crescita esponenziale di strumenti software per la previsione delle performance strutturali sotto le azioni sismiche. Ogni programma ha caratteristiche specializzate in termini di *risoluzione della modellazione, algoritmi di soluzione, target di riferimento, opzioni di modellazione, facilità d'uso e flessibilità*.

Questa prima sezione è dedicata alle metodologie applicative adottate dagli esperti del settore quali Behr [2008], Memari et al., [2011], Bedon et al., [2018c] che hanno rappresentato esempi cardine per l'evoluzione della ricerca. Lo schema risolutivo dei software utilizzati dagli autori sopracitati per la fase di simulazione può essere sintetizzato nei seguenti punti:

- Descrizione del problema continuo tramite un sistema di equazioni differenziali;
- Discretizzazione del modello tramite un numero finito di elementi;
- Riscrittura del problema tramite un sistema di equazioni algebriche;
- Soluzione numerica approssimata.

Da qui la necessità di impiegare software²³ che – essendo questi finalizzati all'analisi agli elementi finiti²⁴ – prevedono step di modellazione, per cui, i modelli, sono generati dallo stesso strumento. Di base, il modello agli elementi finiti deve essere in grado di "calcolare le sollecitazioni o le deformazioni generate nel pannello di vetro dal contatto vetro-telaio all'angolo del pannello di vetro, oltre a quelle causate dall'attrito della guarnizione di gomma" [Memari et al., 2011]. Tale processo di analisi può essere definito in tre step:

- *pre-processing*, modelling, step che prevede la costruzione del modello (geometria/materiali/carichi/mesh);
- *processing*, simulation, step di analisi in cui avviene la risoluzione del problema;
- *post-processing*, visualization, step di rappresentazione grafica della soluzione.

Nel primo step, la fase di modellazione è divisa in moduli che ne definiscono i vari aspetti:

- *pars*, in cui vengono "estruse" geometricamente le singole parti del modello;
- *property*, in cui vengono attribuiti i materiali e – in alcuni software – le geometrie;
- *assembly*, in cui gli elementi estrusi, definiti geometricamente e materialmente, vengono assemblati;
- *interaction*, in cui vengono stabilite le interazioni delle parti che sono "in contatto" tra loro o con la struttura e l'ambiente circostante (qualora nelle analisi siano previste), stabilendo i gradi di libertà;
- *step*, in cui viene definita il tipo di analisi da effettuare (strutturale, dinamica, modale ecc.);
- *load*, in cui, a seconda del tipo di analisi che si vuole effettuare, vengono applicati i carichi e definite le condizioni al contorno;
- *mesh*, in cui il software genera il reticolo computazionale che definisce il numero di nodi ed elementi che compongono il sistema da analizzare.

Terminata la fase di *pre-processing*, si avvia la fase di *processing* che è strutturata in unico modulo "job", ovvero lo step in cui il modello viene sottoposto ad analisi. Generata l'analisi si conclude con lo step di *post-processing*, dove vengono visualizzati graficamente il modello agli elementi finiti e i risultati ottenuti dall'analisi "lanciata".

Questa disamina, seppur macchinosa, è necessaria per far comprendere nel migliore dei modi le principali differenze tra i software di modellazione e simulazione, presenti ad oggi sul mercato, che risiedono nella disposizione o meno della fase di *pre-processing*.

Infatti, una "nuova" generazione di software prevede che la fase di modellazione avviene attraverso l'importazione, da altri software, di modelli CAD – preferibilmente parametrici²⁵ – in quanto non sono integrati da questa funzionalità. In questo caso, i moduli "pars, property e assembly" vengono assorbiti, del tutto o in parte, dagli strumenti CAD.

Nella prima categoria di software, sopracitata, le simulazioni dei modelli agli elementi finiti vengono di solito descritte numericamente sotto forma di elementi *shell*, *beam* e *giunti meccanici*. Queste associazioni possono essere comprese razionalmente dal fatto che la creazione di questi software è derivata dall'esigenza di *valutare le prestazioni sismiche degli elementi strutturali di un edificio*, per cui l'utilizzo di questi strumenti è stato sostanzialmente plasmato per le analisi strutturali dei sistemi di facciata. Di fatti, a titolo esemplificativo, riportando la metodologia di ricerca adottata da Bedon et al. [2018c] in questi modelli, il pannello di vetro è considerato come un elemento shell elastico isotropo, gli elementi del

telaio sono elementi beam bidimensionali (2D), gli elementi quali guarnizioni, distanziali sono modellati come elementi shell con un comportamento elastico-perfettamente plastico.

Questa considerazione fa emergere il principale svantaggio dei software con lo step di *pre-processing*. L'uso di queste soluzioni – definite in termini tecnici "*workaround*" – tende a basarsi su "*approssimazioni o semplificazioni che potrebbero violare la fisica delle rappresentazioni dei modelli e, di conseguenza, mettere a rischio la credibilità dei risultati delle simulazioni*" [Loonen et al., 2018].

Le semplificazioni di fatti vengono effettuate per l'avvio del modulo "*mesh*" le quali sono, nella maggior parte dei casi – come emerso –, strutturate. Il modulo di realizzazione di mesh comporta un carico di lavoro notevole, legato a tempistiche piuttosto lunghe, in cui la semplificazione delle geometrie riguarda l'eliminazione di alcuni elementi come per esempio quelli di connessione meccanica – viti, bulloni, rivetti ecc. –, poiché non riconosciuti dai software. Nella maggior parte dei casi, infatti, questi software di *prima generazione* non sono in grado di leggere tutti i componenti, elementi e materiali che costituiscono i sistemi di facciata²⁶.

Le maggiori limitazioni sono rivolte al riconoscimento da parte di questi software degli elementi basati su materiali plastici come le guarnizioni in EPDM, distanziali in PVC ecc. o, come visto, degli elementi di connessione meccanica.

Queste limitazioni nell'ultimo caso possono essere superate attraverso le semplificazioni e la creazione del reticolo computazione, mesh (Fig. 17).

Tra le variabili da valutare per la scelta dei software da utilizzare per la fase sperimentale, oltre alla complessità dei processi, rientra il requisito di "*velocità di calcolo*".

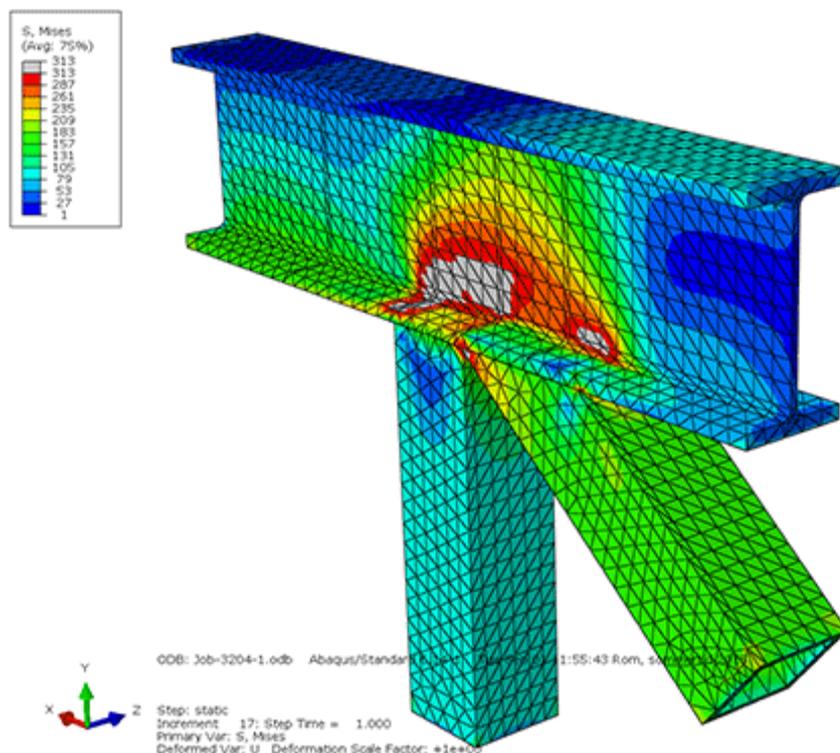


Fig. 17. Esempio di analisi FEA con software convenzionale

Come visto nei software con step di *pre-processing*, la fase di realizzazione di mesh risulta essere dispendiosa in termini di competenze e soggetta ad errori eseguite in una simulazione strutturale convenzionale. Diversamente i software di "nuova generazione" – eliminando lo step del *pre-processing* – sono in grado di abbattere i tempi di analisi, snellendo così notevolmente il processo. Ciò è possibile grazie a complessi algoritmi di calcolo sviluppati che consentono al software di superare il concetto di mesh (Fig. 18) normalmente utilizzato nei tradizionali codici FEM.

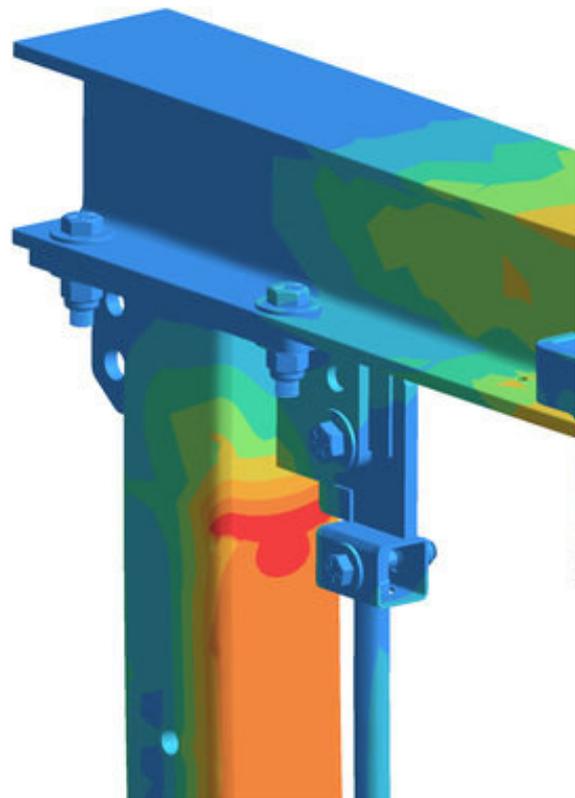


Fig. 18. Esempio di analisi FEA con software non-convenzionale

Apparentemente, le due tipologie di software non sembrano essere sovrapponibili e quindi confrontabili, di fatti però rimangono alcune invarianti – che caratterizzano le funzionalità principali di questi strumenti –, ovvero:

- l'assegnazione dei materiali ai singoli elementi con la relativa caratterizzazione materica;
- la creazione delle interazioni e/o connessioni tra i vari elementi del sistema, nella prima tipologia denominata come "interaction" nella seconda, invece, "connection";
- la determinazione dei carichi di progetto e dei gradi di libertà del sistema soggetto ad analisi;
- l'avvio della fase di analisi, sulle variabili precedentemente imposte;
- l'elaborazione dei risultati delle analisi effettuate.

L'ordine dei moduli sopra espressi è variabile rispetto alla tipologia di software che viene utilizzato. Nello specifico nei software di simulazione strutturale-convenzionale, l'assegnazione dei materiali avviene nella fase di *pre-processing* e nel modulo "*property*" in cui, nella fattispecie, due sono i materiali generalmente imposti: il vetro e l'alluminio.

L'assegnazione del materiale avviene attraverso la parametrizzazione delle proprietà meccaniche, comunemente fornite dalle aziende produttrici e di seguito riportate:

- modulo di Young;
- coefficiente di Poisson;
- tensione di snervamento;
- deformazione plastica allo snervamento;
- tensione ultima;
- deformazione plastica a rottura.

Diversamente, nei software di *seconda generazione* l'assegnazione dei materiali può avvenire in un secondo momento, ovvero dopo aver creato le connessioni tra i vari elementi. Nello specifico l'assegnazione dei materiali non riguarda solo gli elementi in alluminio e vetro ma i database possono essere implementati e/o modificati attraverso l'introduzione di altri materiali purché se ne conoscano i relativi parametri (Fig. 19).

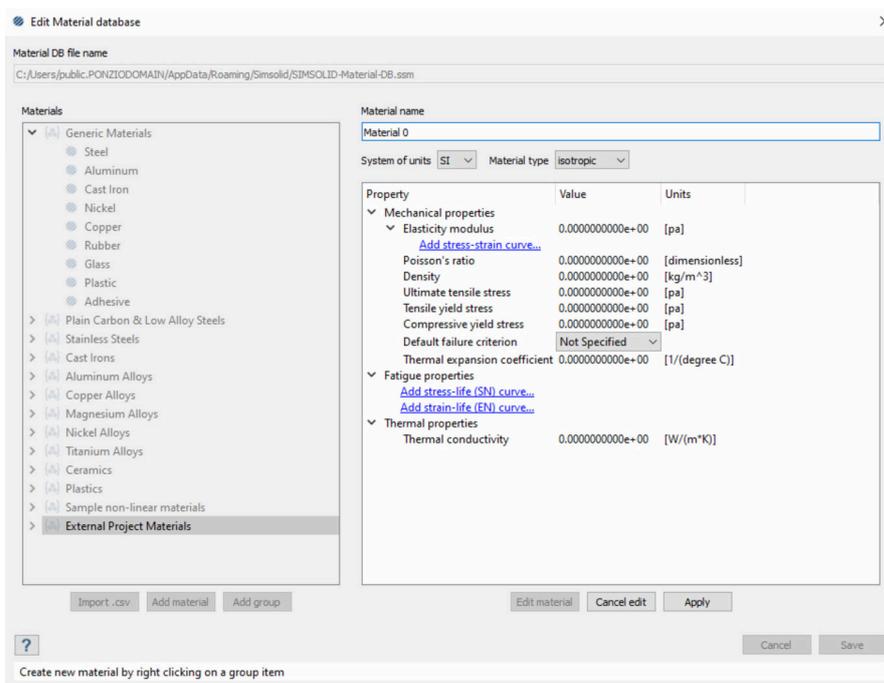


Fig. 19. Database materiali del software non convenzionale. Proprietà meccaniche, termiche e di fatica richieste

La definizione della caratterizzazione materica non riguarda solo le proprietà meccaniche ma anche quelle termiche e di fatica²⁷, con la possibilità di importare da software esterni le curve di stress-deformazione dei materiali soggetti all'analisi.

Probabilmente, in questo risiede uno dei vantaggi principali di questi software di simulazione strutturali non-convenzionali, ovvero nella capacità di questi strumenti di "leggere" e "analizzare" qualsiasi tipo di materiale che sia tradizionale, innovato, intelligente o adattivo. Smaltito lo step di *pre-processing* i maggiori sforzi – per l'utilizzo dei software di seconda generazione – risiedono nella creazione delle connessioni, modulo in cui vengono stabilite le interazioni delle parti che sono "in contatto", esempio montante-traverso, profili-guarnizioni, vetro-telaio ecc.

Di fatti, in questi software, le semplificazioni non vengono fatte a livello strutturale, ovvero sia assumendo gli elementi di facciata come *shell* o *beam*, ma si prevede che, nei software

CAD di modellazione, le semplificazioni vengono effettuate sulla geometria degli elementi, evitando che si verificano compenetrazioni tra le parti "*penetration*" o distanze eccessive "*gap*" che limitino la creazione delle connessioni.

Queste possono essere generate automaticamente o manualmente. Nel primo caso vengono impostati dei valori di massima di "*gap*" e "*penetration*" in modo che il software possa rilevare automaticamente appunto le interazioni; nel secondo caso invece il software prevede tre tipologie "*master connect*", "*group connect*" e "*edge surface*" a seconda degli elementi o parti da connettere. Le connessioni possono essere ulteriormente definite una volta che viene selezionata l'analisi da effettuare.

Analogamente nel caso dei software convenzionali le interazioni possono avvenire tramite elementi "*spring*", mediante contatto tra "*surfaces*" o elementi "*connectors*". Gli elementi "*springs*" sono elementi molla monodimensionale che consentono di collegare due nodi all'interno del modello attribuendo un determinato valore di rigidità lungo la direzione della molla. La connessione "*surfaces*" avviene considerando due superfici di contatto ad esempio tra le facce dei profili, infine nelle connessioni mediante elementi "*connectors*" le interazioni sono in grado di collegare varie regioni del modello, attraverso i punti dell'assemblaggio.

In ogni caso che siano creati da software convenzionali o non convenzionali la creazione delle connessioni risulta una condizione imprescindibile affinché siano stabiliti i vincoli e i gradi di libertà del modello, per l'avvio dell'analisi.

È necessario però non confondere i vincoli creati nel modulo connection/interaction con i vincoli che verranno imposti nel modulo "*load*", infatti nel caso dei software convenzionali le connessioni spring e connector rientrano nel modulo "*interaction*", diversamente nei software non-convenzionali questi tipi di connessione possono essere imposti solo dopo aver avviato la fase di analisi con il tool "*support*".

Infine, nell'impostazione dell'analisi, i carichi possono essere distribuiti mediante forza e spostamento, arrivando infine al modulo "*job*" ovvero dove il software avvia la risoluzione delle variabili imposte.

In conclusione, l'aspetto chiave di questo paragrafo è stato quello di analizzare criticamente le differenze sostanziali dei software *convenzionali* e *non convenzionali* che possono essere sintetizzate in:

- software con lo step di pre-processing incorporato o meno,
- maggiore capacità di lettura da parte dei software non-convenzionali dei differenti materiali che costituiscono i sistemi di facciata.

Le valutazioni che hanno dato seguito al confronto non hanno carattere assoluto e soprattutto sono suscettibili di altre considerazioni che probabilmente non sono state menzionate nel presente paragrafo, rispondendo ad esigenze diverse.

Perciò, risulta necessario dichiarare che la scelta di utilizzare un software non convenzionale risiede, nel caso specifico della presente ricerca, nella considerazione che lo step di modellazione non venga effettuato nella fase di *pre-processing*, per cui può essere utilizzato anche da non professionisti nel campo attraverso modelli meno complessi.

Da queste considerazioni è stata avviata la partnership con Altair Software and Service SL – azienda che fa parte del gruppo Altair One, azienda *madre* che sviluppa e fornisce diverse tipologie di software di simulazione, meglio presentata nel capitolo successivo –, attraverso l'utilizzo dello strumento *SimSolid*.

Nello specifico, gli step affrontati per il processo di analisi vengono descritti nel paragrafo 6.4 "*Modellazione e analisi agli elementi finiti del sistema facciata tramite software di simulazione SimSolid*". Il paragrafo successivo, invece, vuole riprendere le fila del discorso tracciati finora, in modo da imbattersi nel cuore della sperimentazione, ovvero la valutazione delle prestazioni sismiche di una facciata a montanti e traversi prodotta dall'azienda Ponzio s.r.l.

4.5 Valutazione critica dei risultati ottenuti

L'OECD [2018] attraverso il "*Manuale di Oslo*" ha esaminato, alle diverse scale, i temi legati all'innovazione. Ne è emersa la necessità di un glossario comune in cui le innovazioni – a seconda che siano di progetto, prodotto e/o processo – vengano misurate. In questo senso uno strumento chiave, oggetto del parallelismo effettuato per la ricerca in esame risulta essere il TRL "*Technology Readiness Level*", la cui definizione si ritrova al Paragrafo 1.5.

I capitoli finora esposti sono stati intesi e giustificati di risiedere nel primo livello, TRL 1, "*Osservazione dei principi fondamentali*". Prima di associare la presente trattazione al livello tecnologico di riferimento, occorre però fare una piccola precisazione – ricorrendo a quanto dichiarato all'interno del manuale sopracitato – al fine di esplicitare la logica secondo cui sono stati affrontati i contenuti di questo capitolo. L'innovazione che ci si propone di attuare nella presente ricerca è di tipo incrementale, ovvero finalizzata a migliorare prodotti e/o processi la cui funzione è già riconosciuta dal settore di riferimento. In questo senso, a livello di prodotto, la disamina del percorso evolutivo viene effettuata criticamente attraverso un percorso che va dalla *macro-scala* – rispetto ai componenti ed elementi che costituiscono il sistema di facciata – alla *micro-scala* – rispetto alla composizione materica di alcuni di essi –, con lo scopo di delineare la "*Formulazione di un concept tecnologico*", TRL 2. Ulteriore punto chiave della trattazione ha riguardato la valutazione dei software di modellazione e simulazione che vengono ad oggi impiegati per sviluppare analisi strutturali agli elementi finiti. Da questo scenario, emerge come l'innovazione di prodotto sia strettamente connessa all'innovazione di processo. Di fatti è stato dimostrato come questi software provengano dall'ingegneria strutturale e quindi talvolta inadatti a "*leggere*" e "*analizzare*" tutti gli elementi che costituiscono i sistemi di facciata.

Procedendo per ordine e gradi, si riportano gli step essenziali che hanno delineato l'avvio della fase sperimentale della ricerca, scindendo due traiettorie di ricerca diverse.

Nella prima parte della trattazione infatti è stato esaminato il comportamento tipicamente fragile degli elementi vetrati, riportando alcuni risultati emersi da ricerche condotte nel settore che ne definiscono la *prima traiettoria*:

- aumentare le tolleranze di contatto vetro-telaio;
- migliorare le proprietà fisico-meccaniche degli elementi vetrati.

Nel caso dell'aumento delle tolleranze, le ricerche si sono concentrate sulla valutazione di una maggiore distanza tra i profili in alluminio del telaio e il vetro evitando, nel caso di sollecitazioni sismiche e derive di interpiano, il contatto "*critico*" vetro-telaio e definendo questi valori tra i 6 mm e i 13 mm. Questi espedienti, però, risultano di fatto non essere verificati geometricamente da analisi strutturali e per questo motivo non ne può essere riconosciuta la validità applicativa *a priori*. Nel secondo caso, invece, gli studi sono stati incentrati sul miglioramento del comportamento dinamico dei sistemi vetrati attraverso l'implementazione delle proprietà fisico-meccaniche dei vetri. Sono stati proposti infatti vetri con pellicole polimeriche di sicurezza ancorate, vetri stratificati ecc., ma queste soluzioni seppure hanno aumentato la resistenza alla caduta del vetro, non hanno aumentato di conseguenza la resistenza alla fessurazione del vetro.

Da queste considerazioni critiche, per proteggere le vetrate architettoniche dalle azioni sismiche, è stato esaminato il concetto di offrire una compatibilità meccanica tra la struttura dell'edificio e il suo involucro, attraverso la proposta di *connessioni avanzate* che fungano come *strategie di mitigazione sismica*. È in questo scenario che risiede la *seconda traiettoria* e lo *status quo* della ricerca. L'indagine tassonomica degli elementi di connessione *avanzata* ha riguardato in un primo momento le funzionalità principali di questi sistemi che sono in perfetta analogia con quelle dei sistemi tradizionali. Successivamente sono state delineate le caratteristiche che li definiscono come *flessibili*. Il criterio di progettazione di facciate antisismiche, dotate di elementi di connessione *avanzata*, risiede nella consapevolezza che questi siano in grado da un lato, di fungere come dispositivi di controllo delle azioni indotte dai terremoti – traendo ispirazione dal concetto originale degli smorzatori a massa accordata, *Tuned Mass Damper* –, dall'altro di agire come *assorbitori passivi di impatto*. L'attenzione è stata posta – tra le varie tipologie discusse – sulle *connessioni con smorzamento per*

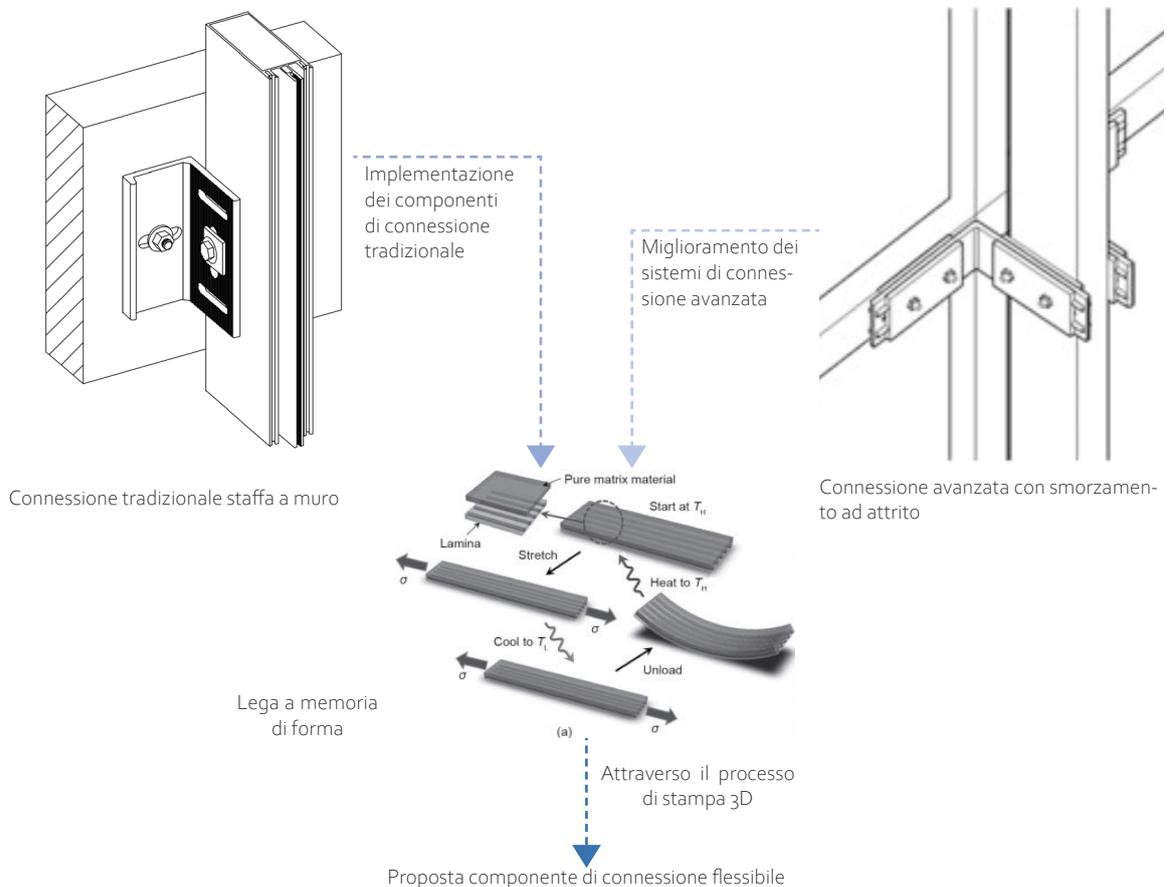
attrito, sviluppate dall'intuizione di alcuni ricercatori attraverso l'osservazione del comportamento dei freni automobilistici. Questi tipi di connessione si presentano a livello formale simili alle staffe di connessione tradizionale in alluminio estruso ma con l'alloggiamento di un materiale che, per la capacità di attrito tra due superfici, "frena" le forze sismiche, evitando di sovraccaricare la struttura primaria di supporto – trasferendogli i carico in modo graduale e filtrato – ed evitando la deformazione del telaio di facciata.

In questo senso, l'innovazione di tipo incrementale che ci si propone di attuare riguarda il miglioramento delle caratteristiche funzionali materiche di questi componenti. Ciò avviene secondo una logica sistemica incentrata sull'indagine dei *materiali cosiddetti intelligenti* che siano in grado di conferire all'intero sistema involucro la loro capacità adattiva.

L'attenzione è stata posta sull'avanzamento della conoscenza nella classe dei materiali a memoria di forma SMA, grazie all'effetto superelastico SE, e nelle loro tecniche di produzione. Derivante da altri settori, come biomedico e aerospaziale, l'innovazione di questi materiali è spinta dalla necessità che questi diventino sempre più performanti, leggeri e di dimensioni ridotte, diminuendo così i costi di produzione.

Alla luce di ciò, è stata avanzata l'ipotesi che il miglioramento dei dispositivi di connessione possa avvenire applicando alle connessioni con smorzamento per attrito una piastra di strato "sottile" con la lega a memoria di forma superelastica, la lega *NiTi*. Andando a definire una connessione, il cui sistema di ancoraggio alla struttura sia in alluminio estruso, e il corpo e il sistema di ancoraggio alla facciata siano di tipo composito – ovvero piastra in alluminio estruso, piastra in lega a memoria di forma e piastra in alluminio estruso.

Fig. 20. Proposta progettuale per il miglioramento delle connessioni telaio-facciata e struttura primaria di supporto



La proposta verrà discussa e valutata con maggiore accuratezza dopo la verifica delle prestazioni attuali del sistema di facciata continua, oggetto della sperimentazione. Da questi assunti si ritiene aver raggiunto uno degli *output specifici* della ricerca rispetto agli obiettivi prefissati, individuando le condizioni necessarie e sufficienti per raggiungere il secondo livello di maturità tecnologica, TRL 2 "Formulazione del concept tecnologico" (Fig. 21).

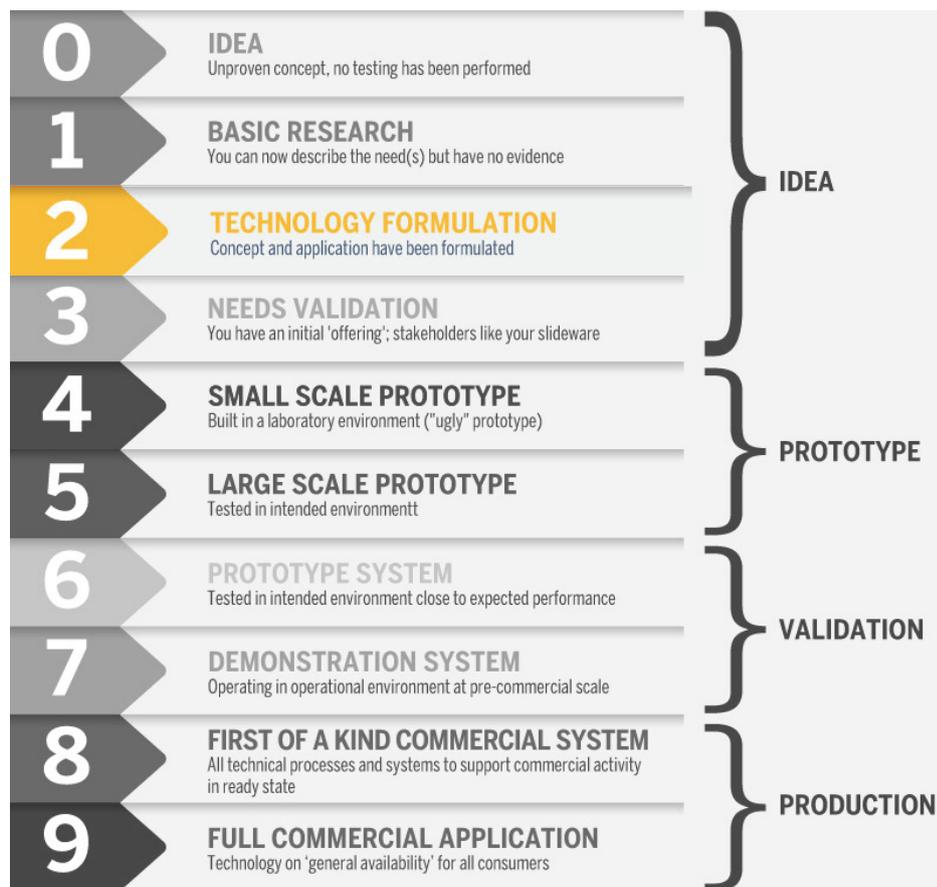


Fig. 21. Technologies Readiness Level TRL.

Le strategie di mitigazione sismica sono state discusse, quindi, in modo empirico, riportando quanto emerso dal settore scientifico disciplinare di riferimento. Dalla consapevolezza di voler progettare e realizzare involucri altamente performanti, il carattere predittivo è risultato ancora una volta strategico.

In questo scenario, rifacendosi a quanto espresso dai ricercatori del settore, si afferma che l'uso di software di modellazione e simulazione può notevolmente accelerare "lo sviluppo di sistemi e materiali adattivi per le facciate, così come la loro penetrazione nell'industria delle costruzioni".

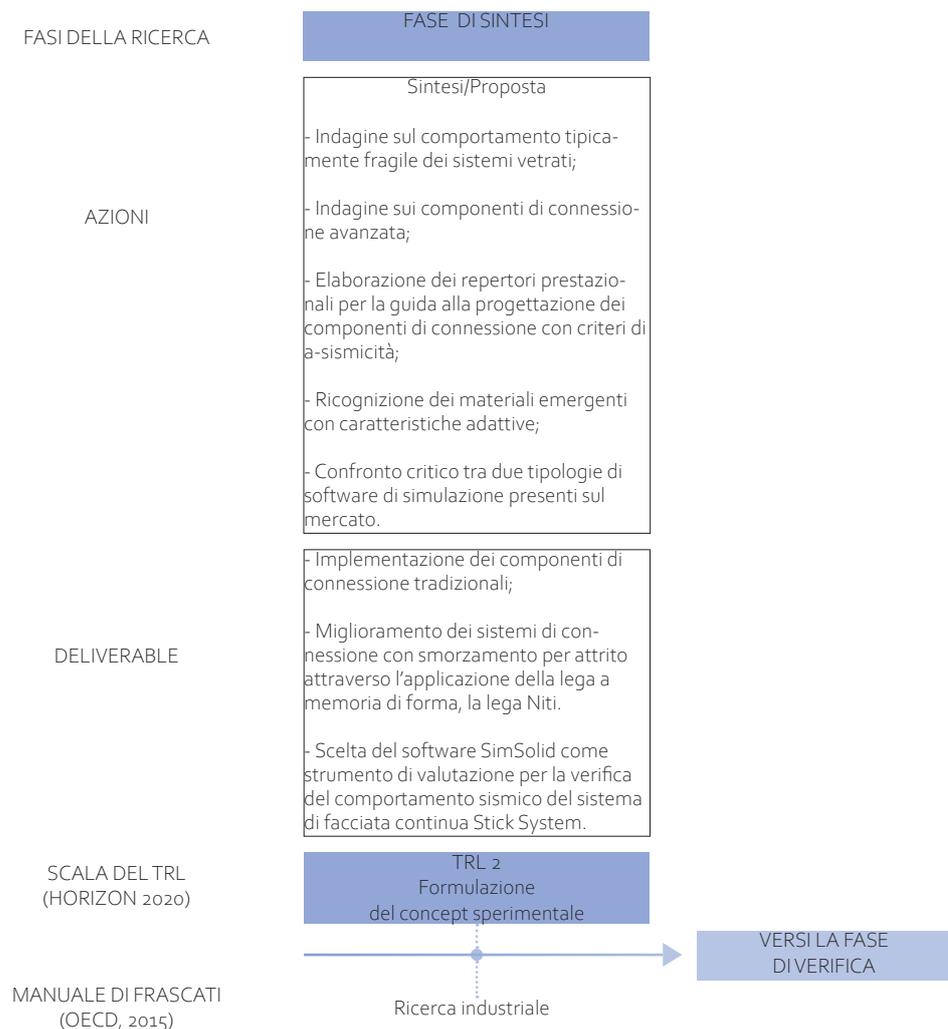
Acclarata la necessità di valutare *ex ante* le prestazioni dell'involucro edilizio, lo scopo principale dell'ultima parte del capitolo risiede nel determinare – rispetto ad una serie di parametri e confronti tra *software convenzionali* e *non convenzionali* – la scelta dello strumento da impiegare nella fase sperimentale della presente ricerca.

L'output finale può essere inteso come la strutturazione di un tool di supporto rivolto a professionisti e ricercatori che si affacciano a queste tematiche, utile per la scelta di un determinato software da utilizzare per le analisi sismiche.

Gli step dei software convenzionali sono tre: *pre-processing* (modellazione), *processing* (simulazione), *post-processing* (visualizzazione) suddivisi successivamente in moduli. Diversamente nei software *non convenzionali* lo step di *pre-processing* e quindi di modellazione viene assorbito attraverso altri software CAD che ne smaltiscono i tempi e le difficoltà. Un'altra differenza è la capacità di questi ultimi software di leggere gli elementi che costituiscono la facciata grazie alla possibilità di inserire "numericamente" le proprietà meccaniche, termiche e di fatica dei materiali.

La scelta di utilizzare un software non convenzionale risiede, nel caso specifico della presente ricerca, nella considerazione che lo step di modellazione non venga effettuato nella fase di *pre-processing*, per cui può essere utilizzato anche da non esperti nel campo della simulazione attraverso "modelli meno complessi". Da queste considerazioni è stata avviata la partnership con Altair Software and Service SL – azienda che sviluppa e fornisce diverse tipologie di software di simulazione –, attraverso l'utilizzo dello strumento SimSolid.

Con questi assunti si avvia la trattazione del Capitolo 5 – "Considerazioni critiche e problematiche aperte per la definizione dei protocolli sperimentali" – di completamento rispetto all'inquadramento dei temi generali e specifici che compongono la tesi dottorale. Il focus è incentrato sulla sintesi delle valutazioni critiche espletate nei capitoli precedenti, delineando le problematiche aperte e i limiti critici utili all'avvio della fase propositiva sperimentale della ricerca.



Note

1. Una facciata non ben progettata rischia di incorrere in diversi problemi, derivanti dalle sue caratteristiche termiche, strutturali e acustiche. Considerando le caratteristiche strutturali, piuttosto che quelle termiche e acustiche che possono rappresentare per lo più un problema di comfort o di durata della facciata, è indispensabile sottolineare che la progettazione appropriata di una facciata è innanzitutto una questione di sicurezza della vita. Tratto da Galli, U. (2012). *Seismic behaviour of curtain wall facades: a comparison between experimental mockup test and finite element method analysis*, p. 14.
2. I sistemi di involucro degli edifici, in particolare il sistema di facciata, su edifici e strutture di grande altezza consumano circa il 20% o più del budget totale di costruzione e sono considerati un attributo economicamente significativo dell'edificio. Tratto da Khoraskani, R. A. (2015). *Advanced connection systems for architectural glazing*. Springer International Publishing, p. 1.
3. Si ci riferisce non solo alla sicurezza degli occupanti dell'involucro edilizio soggetto a stress, ma anche alla sicurezza delle persone la cui incolumità può essere un fattore di rischio a causa della caduta di frammenti di vetro o, in alcuni casi, espulsione totale del vetro che potrebbe causare danni gravi.
4. Quando il sigillante si indurisce con l'invecchiamento, la capacità di deriva laterale del pannello della finestra si riduce notevolmente. Tuttavia, le guarnizioni in neoprene e altri sigillanti morbidi utilizzati nei moderni sistemi di vetrate hanno una resilienza sufficiente a consentire il movimento relativo delle lastre di vetro rispetto al telaio della finestra. Tratto da Sucuoglu, H., & Vallabhan, C. G. (1997). Behaviour of window glass panels during earthquakes. *Engineering structures*, 19(8), p. 687.
5. Sucuoglu e Vallabhan (1997) hanno rilevato che la deformazione laterale totale del pannello della finestra dovuta al movimento del corpo rigido del pannello di vetro nel telaio della finestra può essere espressa in termini di proprietà geometriche dei componenti del pannello della finestra come: $\Delta = 2c(1+h/b)$. Dove Δ è la capacità di deriva laterale del telaio del vetro e c , h e b sono le dimensioni fisiche dimensioni fisiche definite nella Figura 2. Tratto da Sivanerupan, S., Wilson, J. L., Gad, E. F., & Lam, N. T. K. (2009). Seismic assessment of glazed facade systems. In *Proceedings of the Annual Technical Conference of the Australian Earthquake Engineering Society*, Newcastle.
6. I pannelli di facciata continua in vetro Robertson Cupples, di tipo convenzionale, sono stati fissati ad un'apparecchiatura di prova costituita da due tubolari orizzontali in acciaio strutturale, uno dei quali era fisso mentre l'altro era lasciato scorrere. Gli elementi orizzontali erano montati su colonne rigide in acciaio, mentre gli spostamenti erano forniti da un attuatore idraulico collegato al tubo in acciaio inferiore. È stato stabilito un protocollo ciclico dinamico in tre fasi, in cui la prima fase approssimava gli spostamenti di un tipico telaio di un grattacielo di 15 piani sottoposto a movimenti del terreno, mentre le ultime due fasi erano costituite da cicli di intervallo aggiuntivi a frequenza crescente per osservare il comportamento post rottura. Tratto da Behr, R. A., Belarbi, A., & Culp, J. H. (1995). Dynamic racking tests of curtain wall glass elements with in-plane and out-of-plane motions. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 24(1), 1-14.
7. Ci si riferisce – ad esempio – alla corrente decostruttivista di Zaha Hadid, in cui l'uso di tutti gli elementi tradizionali si dissolvono in un'unica superficie fluida, una pelle architettonica che si presenta con continue distorsioni, fratture e si sfrangia in un linguaggio di tipo organico.
8. L'alloggiamento di questi dispositivi avviene in direzione delle travi e dei solai. Una volta installata la facciata, gli elementi che la costituiscono ostacolano le azioni di ispezione per il controllo del funzionamento di questi dispositivi elettronici. Pertanto, la ricerca si rivolge verso la proposta di elementi e componenti il cui carattere adattivo sia intrinseco alle proprietà dei materiali che li costituiscono.
9. Gli studi condotti da Goodno con il suo team del Georgia Institute of Technology (Goodno et al. 1989a, b; Pinelli et al. 1993; Goodno et al. 1998) risultando ancora attuali. I suoi lavori comprendono studi analitici e sperimentali di diversi tipi di connettori di rivestimento "avanzati". I risultati hanno dimostrato che è possibile ottenere fino al 41% di riduzione della risposta in spostamento di picco dalla configurazione di base con l'installazione di connettori di rivestimento avanzati, o il 27% di riduzione del peso strutturale (in direzione longitudinale) per lo stesso livello di risposta di base. Tratto da Khoraskani, R. A. (2015). *Advanced connection systems for architectural glazing*. Springer International Publishing, p. 27.
10. Secondo la normativa comunitaria, la verifica degli elementi di connessione in alluminio deve essere eseguita in conformità alla UNI EN 1999-1-a:2014, Progettazione delle strutture in alluminio al Capitolo 8.
11. Intesa come la capacità del telaio di deflettersi e permettere all'elemento vetrato di muoversi senza causare danni di rottura.
12. I carichi verticali sono quelli che agiscono in direzione verticale sulle connessioni e sono solitamente causati dal peso degli elementi di rivestimento, ma possono anche essere il risultato di espansioni termiche all'interno dei pannelli di rivestimento o di altri eventi nel sistema di rivestimento. La trasmissione del carico verticale è la funzione principale di una connessione nei sistemi di rivestimento e quindi è la sua responsabilità più importante. Tratto da Khoraskani, R. A. (2015). *Advanced connection systems for architectural glazing*. Springer International Publishing, p. 54.
13. I carichi normali sono quelli applicati nella direzione normale alla superficie dell'involucro e sono causati principalmente dal vento e dai carichi della folla e talvolta dall'effetto di accelerazione del movimento degli elementi di rivestimento durante i terremoti. La trasmissione delle forze normali manterrà i sistemi di rivestimento in posizione. Tratto da Khoraskani, R. A. (2015). *Advanced connection systems for architectural glazing*. Springer International Publishing, p. 54.
14. I carichi trasversali sono quelli che agiscono nel piano del sistema di rivestimento in direzione orizzontale e sono causati principalmente dagli spostamenti delle derive interpiano durante i terremoti, sebbene possano essere causati anche dall'espansione termica della superficie dell'involucro o, nel caso di rivestimenti pesanti, dall'accelerazione delle forze sismiche. Tratto da Khoraskani, R. A. (2015). *Advanced connection systems for architectural glazing*. Springer International Publishing, p. 54.
15. La deformazione anelastica delle sostanze metalliche è uno dei meccanismi più efficaci per la dissipazione dell'energia sismica nelle strutture. In questi di-

positivi di connessione la duttilità post-sneramento delle membrature metalliche fornisce la dissipazione di energia richiesta attraverso tre meccanismi di flessione torsionale.

16. Gli smorzatori visco-elastici sono stati utilizzati per la prima nel settore edilizio nel 1969, nelle ultime torri gemelle del World Trade Center per resistere ai carichi del vento. L'implementazione di questi sistemi per scopi sismici ha un'origine più recente, poiché il loro comportamento dipende dalla frequenza richiede un uso molto più efficace di questi meccanismi.

17. Nel meccanismo di connessione ad attrito, l'azione di dissipazione dell'energia che si verifica tra le superfici di due elementi a contatto viene utilizzata come concetto per la progettazione del dispositivo di connessione. L'attrito è una delle proprietà fisiche più influenti dei materiali ed è stato impiegato in molti processi naturali e ingegneristici. Sono stati eseguiti molti studi sull'attrito tra due superfici a contatto, sia a livello microscopico che macroscopico.

18. Esistono due categorie principali di dispositivi di connessione isolanti non dissipanti nei sistemi di rivestimento degli edifici: le connessioni basculanti e le connessioni oscillanti. Nei sistemi di connessione basculanti i dispositivi di connessione sono gestiti in modo che i pannelli di rivestimento possano sostenere un movimento rotatorio nel caso in cui si verifichi una deriva laterale nella struttura principale. Nei sistemi di connessione oscillanti, invece, le connessioni del rivestimento sono gestite in modo che il pannello possa subire liberamente una traslazione in direzione orizzontale. In entrambi i casi, di solito la connessione inferiore fornisce punti di appoggio per il pannello, mentre le connessioni superiori forniscono resistenza solo contro i movimenti fuori piano. Ma non è detto che sia sempre così e a volte la situazione è invertita e i pannelli sono appesi alle loro connessioni superiori.

19. Gli SMA o materiali intelligenti sono stati fondati nel 1932 da Olander. Tuttavia, il termine memoria di forma fu dato da Vernon nel 1941. Anche dopo questa scoperta, l'importanza della SMA è stata riconosciuta nel 1962 in una lega di nichel-titanio (Ni-Ti), che prende il nome di Nitinol derivato dalla composizione di nichel e titanio e ha scoperto un posto nel laboratorio di ordigni navali. Tratto da Rajput, G. S., Vora, J., Prajapati, P., & Chaudhari, R. (2022). Areas of recent developments for shape memory alloy: A review. *Materials Today: Proceedings*.

20. Principalmente le SMA presenti in due forme o fasi la prima è la fase austenite e la seconda è la fase martensite. Le tre diverse strutture cristalline sono austenite, gemellata e martensite separata. Quando questi materiali vengono riscaldati, iniziano a trasformarsi dalla fase martensite alla fase austenite [8]. Come la temperatura iniziale dell'austenite, A_f è la temperatura di finitura dell'austenite. In questa regione avviene la trasformazione dalla fase Martensite a quella Austenite. Quindi, recupera la sua forma originale. M_s è la temperatura iniziale della Martensite e M_f è la temperatura finale della Martensite. Pertanto, durante il ciclo di raffreddamento, avviene la trasformazione della fase Austenite in Martensite [9]. Tratto da Rajput, G. S., Vora, J., Prajapati, P., & Chaudhari, R. (2022). Areas of recent developments for shape memory alloy: A review. *Materials Today: Proceedings*.

21. La previsione delle prestazioni mediante modelli computerizzati può essere utilizzata, ad esempio, per studiare l'impatto di diversi materiali adattivi o configurazioni di facciata sulle performance economiche e ambientali degli edifici, per contribuire

all'ottimizzazione delle strategie di controllo dinamico delle facciate e/o alla progettazione dei materiali. Se effettuata in modo appropriato, può contribuire in modo significativo a migliorare il comfort interno, la solidità del progetto, la riduzione del consumo energetico e la flessibilità energetica degli edifici. Tratto da Loonen, R. C. G. M., Doya, M., Goia, F., Bedon, C., & Babich, F. (2018). *Building Performance Simulation and Characterisation of Adaptive Facades: Adaptive Facade Network*. F. Favoino (Ed.). Delft, The Netherlands: TU Delft Open, p. 17.

22. La metodologia di ricerca adottata per la fase sperimentale è espressa nel Capitolo 6 "La valutazione delle prestazioni sismiche attuali di una facciata continua a montanti e traversi presso Ponzio s.r.l ed Altair Software and Services SL".

23. Per ragioni legate alle condizioni di sicurezza e privacy, all'interno del paragrafo non sono citati i nomi commerciali dei software oggetto di confronto, tuttavia si fa riferimento alle funzionalità di alcuni software utilizzati negli studi e ricerche dagli autori sopracitati.

24. L'analisi agli elementi finiti (FEA) è intesa come la tecnica di simulazione a computer usata nelle analisi ingegneristiche e fondata sul metodo agli elementi finiti (FEM), che ha come obiettivo la risoluzione di problemi generici rappresentati mediante equazioni differenziali.

25. Un CAD parametrico è un software di progettazione in cui ogni operazione viene espressa attraverso dei parametri, ovvero numeri e formule matematiche. Questi parametri danno origine a dei vincoli, ovvero a delle relazioni "vincolanti", fra le parti, impostando delle restrizioni. I vincoli possono essere di due tipi:

- vincoli dimensionali, che riguardano le dimensioni degli oggetti, quindi ad esempio i valori di lunghezza, ampiezza e raggio che possono essere direttamente "compilati" in una tabella nel CAD.

- vincoli geometrici, che collegano la posizione reciproca fra gli oggetti, quindi che indicheranno, ad esempio, se due elementi sono paralleli oppure a 45° gradi fra loro.

Maggiori informazioni sono disponibili al sito: <https://blog.planstudio.it/vantaggi-e-svantaggi-del-designo-parametrico>.

26. La maggior parte degli strumenti deriva da un'epoca in cui l'adattabilità dei componenti dell'edificio non era una considerazione primaria (Ayres e Stamper 1995; Oh e Haberl 2015). Di conseguenza, in questi strumenti la forma dell'edificio e le proprietà dei materiali non sono solitamente modificabili durante l'esecuzione della simulazione, il che limita le opzioni per la modellazione di sistemi di involucro edilizio adattivi. Tratto da Loonen, R. C. G. M., Doya, M., Goia, F., Bedon, C., & Babich, F. (2018). *Building Performance Simulation and Characterisation of Adaptive Facades: Adaptive Facade Network*. F. Favoino (Ed.). Delft, The Netherlands: TU Delft Open.

27. Fenomeno meccanico di progressiva degradazione di un materiale sottoposto a carichi variabili nel tempo (in maniera regolare o casuale) che può portare alla sua rottura (cedimento a fatica o rottura per fatica) anche se sia rimasto nel suo limite d'elasticità, cioè nonostante durante la vita utile del materiale l'intensità massima dei carichi in questione si sia mantenuta ad un valore sensibilmente inferiore alla tensione di rottura o di snervamento statico (in assenza di cicli di sforzo) del materiale stesso.

Riferimenti bibliografici

Abate, M. (2015). *Seismic Behaviour of Post-Installed Anchors: Non-Structural Components and Art Objects Fastenin*. Doctoral Thesis.

Abtahi, P., Samali, B., Zobec, M., & Ngo, T. (2012). Application of flexible façade systems in reducing the lateral displacement of concrete frames subjected to seismic loads. *From Materials to Structures: Advancement through Innovation*, 241.

Abtahi, P. (2017). *Energy Dissipating Facade Systems Designed to Reduce Structural Response During Earthquakes* (Doctoral dissertation, Western Sydney University (Australia)).

Addington, D. M., & Schodek, D. L. (2012). *Smart materials and new technologies: for the architecture and design professions*. Routledge.

Altomonte, S. (2005). *L'involucro architettonico come interfaccia dinamica*. Alinea Editrice, Firenze.

Aiello, C., Caterino, N., Maddaloni, G., Bonati, A., Franco, A., & Occhiuzzi, A. (2018). Experimental and numerical investigation of cyclic response of a glass curtain wall for seismic performance assessment. *Construction and Building Materials*, 187, 596-609.

American Architectural Manufacturers Association. AAMA 501.7, (2017). Recommended Static Test Method for Evaluating Windows, Window Wall, Curtain Wall and Storefront Systems S Subjected to Vertical Inter-Story Movements. American Architectural Manufacturers Association. Schaumburg, IL, USA, 31.

American Architectural Manufacturers Association. AAMA 501.4, (2018). Recommended Static Test Method for Evaluating Curtain Wall and Storefront Systems Subjected to Seismic and Wind Induced Interstory Drifts. American Architectural Manufacturers Association. Schaumburg, IL, USA, 30.

American Architectural Manufacturers Association. AAMA 501.6, (2018). Recommended Dynamic Test Method for Determining the Seismic Drift Causing Glass Fallout from a Wall System. American Architectural Manufacturers Association. Schaumburg, IL, USA.

American Society of Civil Engineers. ASCE SE17-05, (2006). Minimum Design Load for Building and Other Structures. American Society of Civil Engineers Publications. Reston, VA, USA.

Andrawes, B., & DesRoches, R. (2005). Unseating prevention for multiple frame bridges using superelastic devices. *Smart materials and structures*, 14(3), S60.

Antonini, E., Giglio, F., & Rossetti, M. (2019). Innovative features in training methods for sustainable architecture design. *PROCEEDINGS book*, 99-105.

Auricchio, F., Taylor, R. L., & Lubliner, J. (1997). Shape-memory alloys: macromodelling and numerical simulations of the superelastic behavior. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 146(3-4), 281-312.

Bedon, C., & Amadio, C. (2017a). Passive control systems for the blast enhancement of glazing curtain walls under explosive loads. *The Open Civil Engineering Journal*, 11(1).

Bedon, C., & Amadio, C. (2017b). Enhancement of the seismic performance of multi-storey buildings by means of dissipative glazing curtain walls. *Engineering Structures*, 152, 320-334.

Bedon, C., & Amadio, C. (2018a). Glass facades under seismic events and explosions: a novel distributed-TMD design concept for building protection. *Glass Structures & Engineering*, 3(2), 257-274.

Bedon, C., & Amadio, C. (2018b). Improving the dynamic performance of multi-storey buildings via protective glazing curtain walls. *Safety and Security Studies*, 93.

Bedon, C., & Amadio, C. (2018c). Numerical assessment of vibration control systems for multi-hazard design and mitigation of glass curtain walls. *Journal of Building Engineering*, 15, 1-13.

Bedon, C., Zhang, X., Santos, F., Honfi, D., Kozłowski, M., Arrigoni, M., ... & Lange, D. (2018d). Performance of structural glass facades under extreme loads—Design methods, existing research, current issues and trends. *Construction and Building Materials*, 163, 921-937.

Bedon, C., & Amadio, C. (2019). ADAS dampers for the hazard protection of multi-storey buildings with glazing envelopes: a feasibility study. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 60(2).

Bedon, C., Fasan, M., & Amadio, C. (2019). Vibration analysis and dynamic characterization of structural glass elements with different restraints based on operational modal analysis. *Buildings*, 9(1), 13.

Behr, R. A., Karson, M. J., & Minor, J. E. (1991). Reliability analysis of window glass failure pressure data. *Structural safety*, 11(1), 43-58.

Behr, R. A., Belarbi, A., & Brown, A. T. (1995). Seismic performance of architectural glass in a storefront wall system. *Earthquake Spectra*, 11(3), 367-391.

- Behr, M. (2008). Simplex space–time meshes in finite element simulations. *International journal for numerical methods in fluids*, 57(9), 1421-1434.
- Behr, R. A. (Ed.). (2009). *Architectural glass to resist seismic and extreme climatic events*. Elsevier.
- Bekas, D. G., Tsirka, K., Baltzis, D., & Paipetis, A. S. (2016). Self-healing materials: A review of advances in materials, evaluation, characterization and monitoring techniques. *Composites Part B: Engineering*, 87, 92-119.
- Bianco, L., Cascone, Y., Avesani, S., Vullo, P., Bejat, T., Koenders, S., ... & Favoino, F. (2018). *Towards new metrics for the characterisation of the dynamic performance of adaptive façade systems*.
- Bournas, D. (2018). *Innovative materials for seismic and energy retrofitting of the existing EU buildings*. Publications Office of the European Union: Luxembourg.
- Bouwkamp, J. G. (1961). Behavior of window panels under in-plane forces. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 51(1), 85-109.
- Bueggeman, J. L., Behr, R. A., Wulfert, H., Memari, A. M., & Kremer, P. A. (2000). Dynamic racking performance of an earthquake-isolated curtain wall system. *Earthquake spectra*, 16(4), 735-756.
- Casagrande, L., Sisinni, J., Bonati, A., Occhiuzzi, A., & Auricchio, F. (2019). Integrated shape memory alloy devices toward a high-performance glazed curtain wall seismic retrofit. *Engineering Structures*, 179, 540-555.
- Casagrande, L., Menna, C., Asprone, D., & Auricchio, F. (2021). Civil infrastructures. *Shape Memory Alloy Engineering*, 731-755. Butterworth-Heinemann.
- Chan, R. W., & Albermani, F. (2008). Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation. *Engineering Structures*, 30(4), 1058-1066.
- 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.
- Concilio, A., Antonucci, V., Auricchio, F., Lecce, L., & Sacco, E. (2021). *Shape Memory Alloy Effect Engineering. For Aerospace, Structural, and Biomedical Application*. Second Edition. Butterworth-Heinemann. ISBN: 978-0-12-819264-1
- Cupples (1985). *Curtain Wall Tests for Cupples Horizon Series of World Wall*. Cupples test report No. STL-33, St. Louis, MO.
- D'Ambrosio, G., Galuppi, L., & Royer-Carfagni, G. (2019). A simple model for the post-breakage response of laminated glass under in-plane loading. *Composite Structures*, 230, 111426.
- Dewidar, Y., Mohamed, N., Ashour, Y., Dewidar, K. M., Mohamed, N. M., & Ashour, Y. S. (2013). Living skins: A new concept of self-active building envelope regulating systems. *Advancing the green agenda; technology, practices and policies conference-BUID 1-8*.
- Di Giovanni, G., & Bernardini, D. (2020). Vibration damping performances of buildings with moving facades under harmonic excitation. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 1-10.
- Di Sivo, M., & Ladiana, D. (2014). *Designing Safe-Life and Fail-Safe Facade Systems*. Advanced Materials Research, 875, 934-939. Trans Tech Publications Ltd.
- Drossel, W. G., Kunze, H., Bucht, A., Weisheit, L., & Pagel, K. (2015). Smart–smart materials for smart applications. *Procedia Cirp*, 36, 211-216.
- Elattar, S. M. S. (2013). Smart structures and material technologies in architecture applications. *Scientific Research and Essays*, 8(31), 1512-1521.
- European Commission (2019). Communication from the commission to the European parliament, the Council, The European Economic and Social Committee and the Committee of the regions "The European Green Deal", Bruxelles 11.12.2019 COM (2019) 640 final.
- European Commission Decision C (2021). Horizon Europe - Work Programme 2021–2027 "Digital, Industry and Space".
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (1997). "NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part-1-Provisions." FEMA 302, Building Seismic Safety Council for the FEMA, Washington, D.C.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2001). "NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part-1-Provisions." FEMA 368, Building Seismic Safety Council for the FEMA, Washington, D.C.
- Fitzgerald, T. F., Anagnos, T., Goodson, M., & Zsutty, T. (1989). Slotted bolted connections in aseismic design for concentrically braced connections. *Earthquake spectra*, 5(2), 383-391.

- Giglio, F. (2020) New Functional Behaviours for Sustainable Building Skin Material Biometric Features for outer Envelope. In Perriccioli, M., Rigillo, M., Russo Ermolli, S., & Tucci, F. (a cura di) (2020). *Design in the digital age. Technology Nature Culture*, 276-278. Rimini: Maggioli Editore. ISBN: 978-88-916-4327-8.
- Giglio, F., Milardi, M., & Sansotta, S. (2022). Advanced and emerging materials for testing a curtain wall connection element for improved seismic performance. In *Journal of Physics: Conference Series* 2315(1). IOP Publishing.
- Global Manufacturing e Industrialization Summit (2019). *Biomimicry: Nature Inspired Technology*. report
- Gong, Y., Cao, L., Laflamme, S., Ricles, J., Quiel, S., & Taylor, D. (2019a). Motion-based design approach for a novel variable friction cladding connection used in wind hazard mitigation. *Engineering Structures*, 181, 397-412.
- Gong, Y., Cao, L., Laflamme, S., Ricles, J., Quiel, S., & Taylor, D. (2019b). Variable friction cladding connection for seismic mitigation. *Engineering Structures*, 189, 243-259.
- Goodno, B. J., Craig, J. I., Dogan, T., & Towashiraporn, P. (1998). *Ductile Cladding Connection Systems for Seismic Design*. Gaithersberg, MD: Building and Fire Research Laboratory, NIST.
- Graesser, E. J., & Cozzarelli, F. A. (1991). Shape-memory alloys as new materials for aseismic isolation. *Journal of engineering mechanics*, 117(11), 2590-2608.
- Hareer, R. W. (2007). *Seismic response of building façade system with energy absorbing connections* (Doctoral dissertation, Queensland University of Technology).
- Hensel, M., Sunguroglu, D., & Menges, A. (2008). Material Performance. *Architectural Design*, 78(2), 34-41.
- Herzog, T., Krippner, R., & Lang, W. (2012). *Facade construction manual*. Walter de Gruyter.
- Hietanen, S. (2003). ER fluids and MR materials-Basic properties and some application developments. *Vtt symposium*, 225, 33-50. VTT, 1999.
- Huang, B., Chen, S., Lu, W., & Mosalam, K. M. (2017). Seismic demand and experimental evaluation of the non-structural building curtain wall: A review. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 100, 16-33.
- International Code Council (ICC). (2009). International building code. ICC, Washington, DC.
- Iommi, M. (2018). The mediterranean smart adaptive wall. An experimental design of a smart and adaptive facade module for the mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 158, 1450-1460.
- Jain, A., Ong, S. P., Hautier, G., Chen, W., Richards, W. D., Dacek, S., ... & Persson, K. A. (2013). Commentary: The Materials Project: A materials genome approach to accelerating materials innovation. *APL materials*, 1(1), 011002.
- Keiper, W., & Igartua, A. (2018). *Made in Europe*. Impact, 2018(9), 4-5.
- Khoraskani, R. A. (2015). *Advanced connection systems for architectural glazing*. Springer International Publishing.
- Kretzer, M., & Rossi, D. (2012). ShapeShift. *Leonardo*, 45(5), 480-481.
- Lago, A., Trabucco, D., & Wood, A. (2018). *Damping technologies for tall buildings: Theory, design guidance and case studies*. Butterworth-Heinemann.
- Langella, C. (2021). *Hybrid design: progettare tra tecnologia e natura*. FrancoAngeli.
- Le Bourhis, E. (2014). *Glass: mechanics and technology*. John Wiley & Sons.
- Lee, H., Oh, M., Seo, J., & Kim, W. (2021). Seismic and energy performance evaluation of large-scale curtain walls subjected to displacement control fasteners. *Applied Sciences*, 11(15), 6725.
- Lim, K., & King, A. B. (1991). *The behavior of external glass systems under seismic in-plane racking*. Building Research Association of New Zealand (BRANZ) Study Report, 39.
- 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, 483-493.
- Loonen, R. C. G. M., Hoes, P., & Hensen, J. L. M. (2014). Performance prediction of buildings with responsive building elements challenges and solutions. *Proceedings of the 2014 Building Simulation and Optimization Conference (BSO14)*, 23-24. At UCL London.
- Loonen, R. C. G. M., Doya, M., Goia, F., Bedon, C., & Babich, F. (2018). *Building Performance Simulation and Characterisation of Adaptive Facades: Adaptive Facade Network*. F. Favoino (Ed.). Delft, The Netherlands: TU Delft Open.
- López, M., Rubio, R., Martín, S., & Croxford, B. (2017). How plants inspire façades. From plants to architecture: Biomimetic principles for the development of adaptive architectural envelopes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 692-703.
- Lucarelli, M. T., Mandaglio, M., & Pennestri, D. (2012). *The building envelope between process and product innova-*

tion. FrancoAngeli.

Lucarelli, M. T., Mussinelli, E., Daglio, L., & Leone, M. F. (2019). *Designing Resilience*.

Mandaglio, M. (2011). *L'innovazione dell'involucro edilizio tra tecniche di ibridazione e qualità dei materiali* (Doctoral dissertation, Università Mediterranea di Reggio Calabria).

Mandaglio, M. (2019). Chameleon Building. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 296(1). IOP Publishing.

Memari, A. M., Behr, R. A., & Kremer, P. A. (2003). Seismic behavior of curtain walls containing insulating glass units. *Journal of architectural engineering*, 9(2), 70-85.

Memari, A. M., Kremer, P. A., & Behr, R. A. (2006). Architectural glass panels with rounded corners to mitigate earthquake damage. *Earthquake Spectra*, 22(1), 129-150.

Memari, A. M., & Schwartz, T. A. (2009). Glazing and curtain wall systems to resist earthquakes. *Architectural glass to resist seismic and extreme climatic events*, 28-63.

Memari, A. M., Shirazi, A., Kremer, P. A., & Behr, R. A. (2011). Development of finite-element modeling approach for lateral load analysis of dry-glazed curtain walls. *Journal of architectural engineering*, 17(1), 24-33.

Milardi, M., Mandaglio, M., & Musarella, C. C. (2020). Involucro. In: Losasso, M., Lucarelli, M. T., Rigillo, M., & Valente, R. (2020). *Adattarsi al clima che cambia. Innovare la conoscenza per il progetto ambientale*, 145-150. Rimini: Maggioli Editore. ISBN: 9788891643186.

Mohamed, A. S. Y. (2017). Smart materials innovative technologies in architecture; towards innovative design paradigm. *Energy Procedia*, 115, 139-154.

Moloney, J. (2011). *Designing kinetics for architectural facades: state change*. Routledge.

Moon, K. S. (2010). Vertically distributed multiple tuned mass dampers in tall buildings: performance analysis and preliminary design. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 19(3), 347-366.

PakdamaR, F., & Bozkurt, Ö. (2020). Seismic Response of Anchorage Elements Used in Curtain Wall Systems. *Sakarya University Journal of Science*, 24(4), 564-574.

Parisi, S., Spallazzo, D., Ferraro, V., Ferrara, M., Ceconello, M. A., Garcia, C. A., & Rognoli, V. (2018). Mapping ICS materials: e ricerca applicata, 103-116. interactive, connected, and smart materials. *International Conference on Intelligent Human Systems Integration*, 739-744. Springer, Cham.

Pinelli, J. P., Craig, J. I., & Goodno, B. J. (1995). Energy-based seismic design of ductile cladding systems. *Journal of Structural Engineering*, 121(3), 567-578.

Porro, L., & Cavanna, G. (2016). Rischio sismico: prevenzione e ricerca applicata. *Rischio sismico: prevenzione*.

Quirouette, R. L., & Arch, B. (2006). *Glass and Aluminum Curtain Wall Systems*. Canada Mortgage and Housing Corporation.

Rajput, G. S., Vora, J., Prajapati, P., & Chaudhari, R. (2022). Areas of recent developments for shape memory alloy: A review. *Materials Today: Proceedings*.

Rigone, P., & Bianchi, L. (2015). Le facciate continue: tipologie e aspetti legati al requisito di sicurezza all'uso. *Inarch Istituto Nazionale di Architettura-Statica delle facciate continue*, 1-298.

Rigone, P. (2017). *Speciale Facciate Continue-L'interfaccia tra la facciata continua in alluminio-vetro e la struttura portante in acciaio. Le tolleranze dimensionali*.

Rizzo, F., Franco, A., Bonati, A., Maddaloni, G., Caterino, N., & Occhiuzzi, A. (2021). Predictive analyses for aerodynamic investigation of curtain walls. In *Structures*, 29, 1059-1077. Elsevier.

Rognoli, V., & Ferraro, V. (2022). *ICS Materials: Interactive, connected, and smart materials*. FrancoAngeli.

Romano, R. (2011). *Smart Skin Envelope: Integrazione architettonica di tecnologie dinamiche e innovative per il risparmio energetico* (p. 330). Firenze University Press.

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.

Santarsiero, M., Bedon, C., & Moupagitsoglou, K. (2019). Energy-based considerations for the seismic design of ductile and dissipative glass frames. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125, 105710.

Seo, J., Kim, Y. C., & Hu, J. W. (2015). Pilot study for investigating the cyclic behavior of slit damper systems with recentering shape memory alloy (SMA) bending bars used for seismic restrainers. *Applied Sciences*, 5(3), 187-208.

Sivanerupam, S., Wilson, J. L., Gad, E. F., & Lam, N. T. K. (2009). Seismic assessment of glazed facade systems.

Proceedings of the Annual Technical Conference of the Australian Earthquake Engineering Society, Newcastle.

Soong, T. T., & Dargush, G. F. (1997). *Passive energy dissipation systems in structural engineering*. New York: Wiley.

Song, G., Ma, N., & Li, H. N. (2006). Applications of shape memory alloys in civil structures. *Engineering structures*, 28(9), 1266-1274.

Sousa, L., & Monteiro, R. (2018). Seismic retrofit options for non-structural building partition walls: Impact on loss estimation and cost-benefit analysis. *Engineering structures*, 161, 8-27.

Sucuoglu, H., & Vallabhan, C. G. (1997). Behaviour of window glass panels during earthquakes. *Engineering structures*, 19(8), 685-694.

Sun, L., Wang, T. X., Chen, H. M., Salvekar, A. V., Naveen, B. S., Xu, Q., ... & Huang, W. M. (2019). A brief review of the shape memory phenomena in polymers and their typical sensor applications. *Polymers*, 11(6), 1049.

Sung, D. K. (2011, March). Skin deep: making building skins breathe with smart thermobimetals. *99th ACSA Annual Meeting Proceedings, Where Do You Stand, ACSA*, 145-152.

Vernerey, F. J., Musiket, K., & Barthelat, F. (2014). Mechanics of fish skin: A computational approach for bio-inspired flexible composites. *International Journal of Solids and Structures*, 51(1), 274-283.

Tuissi, A., Biffi, C. A., Ruella, S., & Casati, R. (2015). High performance shape memory effect (HP-SME) for new shape memory devices: a diamond-like actuator. *Materials Today: Proceedings*, 2, S975-S978.

Ufficio Tecnico UNCSAAL (Rigone, P., Bianchi, L., Abelli, I., Ferrari, V., & Vitali, M., a cura di). (2011). *UX70. Statica delle facciate continue*.

Wang, M. L. (1987). Cladding performance on a full scale test frame. *Earthquake spectra*, 3(1), 119-173.

Wigginton, M., & Harris, J. (2013). *Intelligent skins*. Routledge.

Zareie, S., Issa, A. S., Seethaler, R. J., & Zabihollah, A. (2020). Recent advances in the applications of shape memory alloys in civil infrastructures: A review. *Structures*, 27, 1535-1550. Elsevier.

Considerazioni critiche e problematiche aperte per la definizione dei protocolli sperimentali

Abstract

This chapter, of completion for framing the general and specific themes that make up the doctoral thesis, aims to synthesize the critical evaluations carried out in the previous chapters, outlining the open issues and critical limits useful for the initiation of the experimental proposal phase of the Research project. The multidisciplinary character constituted by the different fields, such as architectural technology, civil engineering, and materials science, allowed for an integrated, holistic approach to understanding to a greater extent, the research trajectories aimed at the evolved functionalization of the building envelope. These trajectories are interdependent on each other and result in the need for collaboration between industry and academia, where the common denominator concerns the high-performance aspect of the vertical closure systems that make up the envelope. This is done with a view toward incremental technology-push innovation, in which product innovation of the components that make up the façade systems could have strong repercussions on process innovation. The focus is on process innovation for the earthquake-resistant design of curtain wall systems, where the applied methodology could be understood as a replicable model for implementing building envelope performance. In this sense, the industrial nature of the project is evident, thanks to the contribution of the partner companies, in which the continuous exchange of feedback encourages the dissemination of innovative models for research conducted between universities and companies.

Highlights

- Identification of the industrial and multidisciplinary nature of the research and its implications;
- Framing of the general themes that constitute the research through a cognitive process that aims to build the thread running through the thesis;
- Identification of the critical considerations arising from the issues addressed, with particular attention to the need to adopt a predictive design process;
- Definition of the open issues related to the design of earthquake-resistant curtain wall systems and its related verification and evaluation;
- Framing of the methodology adopted for the experimental phase following the chapter's discussion.



Il tentativo di costruire un quadro riepilogativo, scandito dalle tematiche affrontate, si fonda sulla necessità di preparare il terreno per la fase sperimentale del progetto, intendendo questo capitolo come di *sintesi* rispetto le considerazioni critiche e le problematiche aperte emerse finora. Prima di questo passaggio – e per una maggiore chiarezza – risulta doveroso riprendere le ragioni che hanno spinto la ricerca sin qui.

La tesi dottorale dal titolo:

"Seismic Mitigation strategies di componenti adattivi non-strutturali degli involucri. Processi di sperimentazione per il miglioramento delle prestazioni sismiche attraverso Simulazione e Testing"

risponde all'esigenza di fornire una panoramica generale sulle indagini condotte nel settore accademico per l'implementazione delle performance delle facciate continue sollecitate alle azioni sismiche, attraverso metodi e verifiche sperimentali, in diversi domini di interesse.

Il carattere multidisciplinare costituito dai diversi settori, quali tecnologia dell'architettura, ingegneria civile e scienza dei materiali, ha permesso di adottare un *approccio integrato di tipo olistico*, al fine di comprendere, in maggiore misura, le traiettorie di ricerca rivolte alla *funzionalizzazione evoluta dell'involucro edilizio*. In questo senso, il rapido sviluppo delle tecnologie e dei materiali emergenti e dirompenti è seguito lentamente ma costantemente dallo sviluppo di metodi e strumenti numerici-sperimentali per quantificarne le performance degli involucri, in cui, il periodo storico – caratterizzato dalla contaminazione delle innovazioni provenienti dalla quarta rivoluzione industriale – influisce significativamente mediante la sperimentazione di *tools innovativi e digitalizzati*.

Il carattere predittivo dei processi di progettazione risulta una strategia virtuosa, poiché è rivolto allo studio delle attività di simulazione in grado di valutare *ex ante* le performance delle facciate in diversi ambiti, proiettandosi come campo fertile per gli sviluppi delle ricerche future nel settore. Il trend di ricerca è dovuto, da un lato, al crescente ruolo che riveste l'involucro edilizio, dall'altro, all'aumento della domanda di produzione nel settore dei serramenti e facciate continue. In questo senso, dimostrativi appaiono i *"rapporti sul mercato italiano dell'involucro edilizio"* redatti dall'Unione Nazionale delle Industrie delle Costruzioni Metalliche dell'Involucro e dei serramenti, *UNICMI*. Tali rapporti hanno comprovato, attraverso analisi statistiche di mercato, l'esponentiale crescita della domanda di produzione dei sistemi di facciata, esimendo il macro-settore dalla crisi globale del 2020.

Queste traiettorie sono interdipendenti l'una dall'altra e si traducono nella necessità di collaborazione tra il settore industriale e accademico, in cui il comune denominatore riguarda l'aspetto altamente prestazionale dei sistemi di chiusura verticali che compongono l'involucro edilizio. Ciò avviene in un'ottica che si orienta verso un'innovazione incrementale di tipo *technology-push*, dove l'*innovazione di prodotto* dei componenti che costituiscono i sistemi di facciata potrebbe avere forti ripercussioni sull'*innovazione processo*.

La spinta di innovazione, sulle tematiche sopra esposte, viene recepita e sostenuta anche in ambito europeo attraverso la redazione di piani e strategie che rispondano agli obiettivi presenti all'interno del Green Deal e al Programma Horizon 21-27, con particolare riferimento all' SDG 11.5: *"Ridurre gli effetti negativi dei disastri naturali"*. Gli obiettivi della tesi dottorale, come già espresso nella parte introduttiva, sono, altresì, in linea con gli ambiti prioritari nazionali e regionali, quali il Cluster 3 del PNR 2021-2027, *"Improved disaster risk management and societal resilience"*, la Missione 2 del PNRR *"Rivoluzione verde e transizione ecologica"* e la traiettoria 2 dell'area prioritaria Ambiente, Economia Circolare e Biodiversità della S3 Calabria 2021/2027 *"tecnologie, dispositivi e sistemi elettronici "embedded", reti di sensori intelligenti, Internet of Things per la protezione antisismica del territorio"*. Infine, la caratterizzazione industriale della ricerca permette di identificarsi con gli obiettivi prefissati all'interno della Missione 4 del PNRR *"Sostegno ai processi di innovazione e trasferimento tecnologico"*.

Fig. 1. Posa in opera sistema di facciata continua Ponzio s.r.l.

Perciò, la ricerca si propone di supportare professionisti e ricercatori impegnati nella progettazione antisismica dell'involucro edilizio e intende contribuire positivamente a una maggiore compenetrazione nel mercato produttivo dei sistemi, dei componenti e dei materiali altamente performanti, intesi come valide *strategie di mitigazione sismica*, con l'obiettivo di razionalizzare le risorse energetiche e materiali e di raggiungere un elevato standard di qualità ambientale interna, salute e sicurezza nell'ambiente costruito.

La metodologia, adottata per la strutturazione della ricerca dottorale, segue un modello di tipo deduttivo, sistematico e scalare, articolando un quadro tematico di riferimento, passando dalla definizione del macro-tema, definito dalle tematiche relative all'innovato concetto di involucro edilizio e soggetto all'azione sismica, all'individuazione delle caratteristiche prestazionali che i componenti non strutturali devono asseverare, con particolare riferimento agli elementi di connessione telaio-facciata e struttura primaria di supporto.

Le considerazioni critiche di seguito riportate sono state sviluppate in maniera più approfondita e a livello scalare, per macro-temi, nei vari capitoli.

Queste vengono ora riprese attraverso un processo cognitivo in cui si propone di ricostruire il *file rouge* della ricerca, superando l'apparente disconnessione tra gli argomenti che hanno popolato la tesi.

L'involucro edilizio è stato inteso nella sua accezione ampia e consolidata di *frontiera*, ovvero come un elemento che da un lato separa fisicamente l'ambiente esterno ed interno degli edifici, dall'altro ne è chiamato a dialogare. Tematica chiave risulta l'involucro come parte dell'organismo architettonico che più di ogni altra reagisce agli stimoli ambientali e ne assorbe i contenuti tecnologici e gli aspetti formali.

Di fatti, la trasformazione nel tempo dei bisogni antropici, così come la variabilità delle condizioni al contorno, ha portato le prestazioni di base, garantite dall'involucro, a evolversi in funzione di esigenze sempre più articolate, tra cui gestire gli effetti della risposta dinamica del contesto in cui si innesta il sistema, con particolare riferimento ai carichi sismici. È emersa la tematica emergente di progettare *"superfici di involucro con caratteristiche di adattabilità tali da rispondere in maniera efficiente al contesto dinamico e, allo stesso tempo, essere in grado di assorbire gli effetti da questo generati"*. In questo senso, il concetto di adattività è stato indagato in una chiave di lettura che reinterpreta le sue definizioni, declinandosi ulteriormente in funzione dell'aspetto strutturale che coinvolge l'involucro edilizio.

Ciò identificandolo – attraverso l'integrazione di tecnologie e materiali altamente performanti – quale strategia che può rispondere in modo reattivo agli effetti indotti e subiti dall'involucro a seguito di eventi sismici.

Dal background scientifico è, infatti, emerso come l'accezione di involucro adattivo sia stata, nel passato, in maggiore misura legata agli aspetti energetico-prestazionali, considerando in modo marginale l'aspetto sismico-strutturale.

Per cui, la trattazione è perseguita verso la comprensione dei livelli di vulnerabilità dell'involucro soggetto ai carichi sismici. Seppur vero che i codici normativi, in modo univoco, definiscono gli elementi di chiusura come elementi *"non-strutturali"*, i terremoti del passato hanno evidenziato come gli involucri siano altamente vulnerabili e falliscono più frequentemente degli edifici stessi. Come lascito degli eventi sismici, inoltre, si è arrivati alla consapevolezza che i sistemi di facciata abbiano un contributo strutturale per la stabilità degli edifici. Di fatti, l'involucro in condizioni di carico estremo viene definito, da diversi versanti della ricerca, condotta in ambito accademico, come *"strutturalmente reattivo"*, poiché – a causa degli spostamenti imposti – sovraccarica la struttura primaria di supporto, dando origine a effetti devastanti in termini di sicurezza e salute delle persone, non solo per chi occupa l'edificio ma anche per chi si trova in adiacenza.

Infatti, soprattutto in riferimento agli standard antisismici americani, le maggiori raccomandazioni sono rivolte ad analisi e verifiche al fine di evitare che l'elemento vetrato venga espulso dal telaio, cadendo a terra ed identificandosi come detrito volante, *flying debris*.

Queste considerazioni derivano dall'analisi del comportamento tipicamente fragile e della limitata resistenza a trazione delle lastre di vetro – una volta che avviene il contatto tra vetro e telaio – e si sono rivolte verso una progettazione basata sull'approccio *fail-safe*.

Nel percorso evolutivo della ricerca, il contatto critico vetro-telaio è stato oggetto di trattazione, mettendo in luce quanto deriva dal background scientifico.

In passato, il miglioramento delle prestazioni sismiche è stato affidato ad un aumento dello spazio che intercorre tra il bordo del vetro e la "tasca" del telaio – in cui si innesta la superficie vetrata –, al miglioramento delle prestazioni del materiale attraverso pellicole polimeriche o vetri stratificati e in alcuni casi ad arrotondare gli spigoli della lastra di vetro. Ne sono derivati alcuni limiti, tra cui, l'aumento della capacità di resistenza alla caduta del vetro non si è tradotto in aumento della resistenza alla fessurazione delle lastre.

Ad ogni modo, le implicazioni che derivano dagli eventi sismici sono anche di tipo economico, infatti, in alcuni casi – seppure la facciata o il sistema strutturale non abbia subito danni a livello di stabilità – si sono presentate forti ripercussioni nelle condizioni di servizio, come perdita delle prestazioni di permeabilità all'aria e all'acqua ecc., che ne interrompono anche la funzionalità. L'aspetto economico, perciò, non riguarda solo i costi diretti, ovvero quelli che devono essere sostenuti per la "riparazione" degli elementi incriminati ma anche di tipo indiretto causati dall'interruzione "forzata" delle attività che rappresentano il principale introito per diversi edifici, soprattutto se strategici, aggravandone le motivazioni sopra menzionate.

In un quadro di sintesi, si può affermare che la necessità di implementare i sistemi di facciata sotto condizioni di carico estreme risulta una prerogativa per diversi aspetti e per gli stakeholder coinvolti nel processo.

Dalla consapevolezza che il comportamento strutturale può – e deve – essere previsto e valutato con sicurezza, si stanno sviluppando, negli ultimi decenni, alcune procedure globali che contribuiscono al cambiamento del *paradigma* del processo progettuale.

L'attenzione viene posta, in particolar modo, su due approcci specifici quali il Performance Based Seismic Design PBSB e il Building Performance Simulation BPS. Il primo viene inteso come orientamento che si basa sul principio di produrre, nella fase di progettazione, requisiti prestazionali a seconda delle esigenze. Il PBSB costituisce un orientamento, una filosofia di approccio organizzata con una trama a maglie larghe che si sostanzia secondo l'applicazione di un principio prestazionale basato sulla teoria di progettazione *fail-safe*. Il secondo, invece, è una disciplina di ricerca ben consolidata e uno strumento di supporto alla progettazione utilizzato nel campo dell'ingegneria edilizia. Si basa, cioè, sulla proposta di utilizzare strumenti di simulazione che possano valutare le prestazioni "reali" dell'involucro progettato. Per cui, se il primo è relativo al processo che definisce i requisiti prestazionali da asseverare durante la fase di progettazione, il secondo può essere inteso come uno strumento utile alla valutazione delle prestazioni, dopo una prima fase di progettazione, tramite *tools* rappresentati dai *software di modellazione e simulazione*. In questo senso è necessario che questi strumenti siano affidabili e coerenti con i risultati dei laboratori di testing specializzati. L'importanza di avvalersi di prove di laboratorio è stata riscontrata sia in ambito scientifico sia dalle normative, internazionali e comunitarie.

Nel corso degli anni, sono state normate procedure di prova standardizzate, affinché possa essere valutato in ambienti e dimensioni "reali" il comportamento dei sistemi sollecitati in condizioni di servizio e sicurezza, classificandole, in modo generico, in prove "*distruitive*" e "*non distruitive*". Soprattutto nel caso dei test sismici, queste valutazioni sono di tipo "visivo" e non vi sono strumenti con cui si possono rilevare valori numerici sugli stati in cui riversano i singoli elementi durante il test e a fine test. Per questo motivo, utilizzare software affidabili e coerenti può essere una strategia virtuosa per colmare i gap delle procedure di rilevazione dei test, fornendo coefficienti di collasso e potendo intervenire in modo mirato sull'implementazione del sistema facciata posto in esame.

Postulati gli strumenti attraverso cui la vulnerabilità sismica può essere valutata, la ricerca si è rivolta verso le *strategie di mitigazione sismica* messe in atto. Il parallelismo con le strategie in ambito strutturale è risultato inevitabile. Infatti, proveniente dalla progettazione antisismica è stata proposta, in prima battuta l'analisi dei dispositivi di risposta dinamica, *smorzatori*, – disaminando componenti elementi e funzioni –, in un secondo momento è stata valutata l'ipotesi di applicare questi dispositivi in facciata.

Attraverso l'analisi dei casi studio, con particolare riferimento alle facciate a doppia pelle, l'ipotesi avanzata ha subito gli effetti delle considerazioni critiche emerse che risiedono non solo in costi elevati ma anche in difficoltà di progettazione, caratteristiche dimensionali elevate nonché pratiche di non semplice manutenibilità.

Dai limiti critici emersi per l'applicazione di tale tecnologia in facciata è stata avanzata l'ipotesi di progettare un elemento di *connessione flessibile* che, attraverso l'integrazione di *materiali intelligenti/avanzati*, sia in grado di assolvere le caratteristiche funzionali-prestazionali degli smorzatori, traducendosi in una valida *strategia di mitigazione sismica*. L'attenzione è stata posta – tra le tipologie analizzate nel relativo paragrafo – sulle *connessioni con smorzamento per attrito* quali elemento chiave della fase propositiva della ricerca.

Costruito il quadro di sintesi in cui emergono le criticità degli elementi di connessione attuali sottoposti ai carichi sismici, la ricerca si è incentrata sullo studio degli *smart material*, ovvero sui materiali che sono in grado di mutare le loro proprietà fisiche-formali in funzione delle azioni imposte. Le recenti innovazioni materiche sono fortemente correlate all'innovata concezione di involucro edilizio, il cui scopo è legato alla progettazione e realizzazione di *elementi con capacità adattive a prova fail-safe*. In questo senso, grande attenzione è stata posta all'evoluzione di materiali intelligenti con *effetti a memoria di forma SME* e *effetti superelastici SE*. Il punto focale riguarda, quindi, la capacità del materiale di generare un movimento reversibile e trasferire all'intero sistema le capacità adattive, costituendo in un unico elemento in ciò che spesso viene attuato attraverso l'inserimento di attuatori e sensori sempre più complessi ed informatizzati.

Il miglioramento delle prestazioni sismiche dei dispositivi di connessione può avvenire applicando – alle connessioni con smorzamento per attrito – una piastra di strato sottile con la lega a memoria di forma superelastica, la *lega NiTi*. L'implementazione del sistema di connessione avviene, quindi, applicando sulle *"ali"* delle staffe in alluminio estruso una configurazione di tipo composito costituito da alluminio estruso e lega a memoria di forma. La produzione della piastra con lega a memoria di forma può avvenire servendosi delle recenti innovazioni provenienti dalla quarta rivoluzione industriale attraverso l'*Additive Manufacturing*.

In conclusione, progredendo a ritroso rispetto la trattazione del capitolo, si può affermare che:

"i componenti di connessione flessibile attraverso l'integrazione delle leghe a memoria di forma – con effetto superelastico – potrebbero essere in grado di rispondere reattivamente alle sollecitazioni imposte da eventi sismici, trasferendo all'intero sistema involucro il loro carattere adattivo. Ciò è reso possibile sfruttando la compatibilità meccanica tra la struttura dell'edificio e i sistemi di facciata continua".

In questo scenario, lo studio e l'analisi dello stato dell'arte lasciano le redini alla fase sperimentale, in cui le prestazioni dell'involucro edilizio vengono valutate allo stato attuale in condizioni di servizio e sicurezza. Il carattere industriale, che ha accompagnato la tesi in tutto il suo processo evolutivo, è rivolto verso la proposta di soluzioni a-sismiche che devono essere valutate in funzione del requisito di *"fattibilità"* prestazionale, tecnica, economica e di reperimento delle risorse, il cui scopo è relativo alla loro immissione nel mercato produttivo.

Al fine di espletare in modo esaustivo la metodologia della fase sperimentale che seguirà, si specifica che la sperimentazione viene svolta per la tipologia di facciata a montanti e

traversi "Ponzio WS50 PG Curtain Wall", prodotta dall'azienda Ponzio s.r.l., e i sistemi di connessione, impiegati per il dato sistema, rispetto al quale verranno effettuate, attraverso accurati metodi di analisi, verifiche che riguardano il comportamento dinamico dovuto alle sollecitazioni dell'azione sismica.

Le valutazioni sulle prestazioni della facciata, correntemente in uso nel mercato produttivo, saranno condotte tramite due step, dati due provini di facciata a montanti e traversi progettati con il supporto dell'azienda partner:

- il primo, attraverso la modellazione e l'analisi agli elementi finiti servendosi del *software di simulazione SimSolid*, fornito dall'azienda partner Altair Software and Services SL;
- il secondo che riguarda la verifica dei sistemi di facciata tramite procedure di prova normale attraverso il *laboratorio di Testing, TCLab del Building Future Lab* di Reggio Calabria.

Valutate le prestazioni della facciata continua, la ricerca mira a verificare la validità dei risultati ottenuti durante lo step di simulazione, tenendo in considerazione due tra le problematiche aperte – emerse precedentemente –:

- *verificare la validità dei risultati ottenuti dalla fase di simulazione*, attraverso la capacità del software di leggere e analizzare tutti gli elementi che costituiscono i modelli agli elementi finiti, in coerenza con i test effettuati in laboratorio;
- superare l'impasse di *estrapolare dati numerici durante le fasi di testing* al fine di analizzare gli stati limite, ultimo e di danno, dei singoli elementi e materiali che costituiscono il sistema di facciata.

Soprattutto in riferimento alla prima problematica la fase di "*sovrapposizione dei risultati ottenuti dallo step di simulazione e lo step di testing*", risulta strategica poiché permette di individuare i *deficit* del software di simulazione.

Tra gli output finali della ricerca, il miglioramento delle funzionalità del software può permettere di definirlo come tool "*affidabile*" e di conseguenza costruire una metodologia progettuale replicabile per le varie tipologie dei sistemi di facciata continua, in cui tempi e costi potrebbero essere dimezzati.

D'altro canto, le valutazioni e verifiche delle prestazioni attuali del sistema di facciata aprono diversi scenari, tra cui l'indagine della fattibilità della proposta per la sperimentazione dei componenti adattivi non strutturali per il miglioramento delle prestazioni sismiche degli involucri edilizi, grazie all'integrazione di materiali intelligenti quali le leghe a memoria di forma con effetti superelastici negli elementi di connessione.

Questi assunti definiscono la terza e ultima parte della tesi dottorale che verrà trattata nei successivi capitoli.

Parte III_

Le fasi di Industrializzazione della Ricerca, la collaborazione
con le aziende Ponzio srl e Altair Software and Services.
Verso la sperimentazione di componenti adattivi non-strutturali degli involucri

La sperimentazione

La valutazione delle prestazioni sismiche attuali di una facciata continua a montanti e traversi presso Ponzio s.r.l. e Altair Software and Services SL

Abstract

The experimental phase of the research project focuses on evaluating the current performance of the facade system, currently in use in the Italian market and produced by the partner company, Ponzio s.r.l. The design for the Project Mock-Up (PMU) took place with the support of that company. The model configuration led to the development of two types of Mock-Up, Physical Mock-Up, and Digital Mock-Up, in line with the approaches adopted for the verification phase. The façade performance evaluations, in fact, were conducted through a methodology punctuated by two steps. The first involves verifying the façade system through modeling and finite element analysis using SimSolid simulation software, supplied by Altair Software and Services SL, imposing loads and displacements consistent with the indications provided by the sector standards. The second step is through standardized test procedures using the testing laboratory, BFL's TCLab section, under service and safety conditions. The sixth chapter aims to expound on the research methodology adopted and lead the experimental phase toward analyzing the results obtained from the digital model and physical model. In apparent antithesis to each other, simulation and testing are called to compete concurrently for the verification phases. In this sense, the research moves toward developing a methodological tool to support simulation processes, intending to adopt a reliable and replicable approach that leads toward analysis results consistent with laboratory test results, thus innovating the design process.

Highlights

- Identification of Project Mock-Up Design variables useful for the development of the verification phase of the conventional curtain wall system;
- Design of the Project Mock-Up in line with the methodology of the verification phase through Physical Mock-Up and Digital Mock-Up;
- Development of the methodological tool for the SimSolid simulation software approach;
- Discussion of the finite element analyses conducted and the results obtained through the simulation step;
- Definition of the test protocols conducted within the TCLab section and the type-technological set-up of the relevant test chamber;
- Development of the "Method Statement" and technical test report for the service and safety conditions of the Physical Mock-Up.



6.1 Alcuni assunti di partenza utili all'avvio della fase di verifica

Costruito il quadro teorico in cui sono state indagate le *strategie di mitigazione sismica*, risulta necessario valutare la *vulnerabilità dello stato di fatto dei sistemi di facciata convenzionali*, ovvero, dei *sistemi privi di elementi a-sismici*. In questo senso, si avvia la fase di verifica basata sulle azioni di *sperimentazione* e *comparazione*, al fine di definire le performance che devono essere implementate e/o migliorate. Per cui, le strategie, discusse precedentemente, saranno riprese in chiave critica per valutarne la *fattibilità* – prestazionale, economica e di reperibilità delle risorse – della proposta emersa all'interno del paragrafo 4.3¹. In sintesi, la fase di sperimentazione mira a verificare le prestazioni sismiche di una facciata continua, *Stick System*, sottoposta a spostamenti "statici" e "dinamici", attraverso due "strumenti" di valutazione differenti, riprendendo l'approccio metodologico di confronto² proposto da diversi versanti della ricerca [Memari et al., 2007; Aiello et al., 2019; Lee et al., 2021].

In questo scenario, la metodologia, adottata, risponde al trend di concretizzare nuovi processi che siano in grado di leggere e analizzare "in modo dinamico" [Milardi, 2020] i differenti livelli di rischio e vulnerabilità e, di conseguenza, le risposte degli involucri edilizi soggetti agli stress sismici. Ciò deriva dalle risultanze degli effetti devastanti, subiti da tali sistemi, a seguito dei terremoti del passato (Cfr. Paragrafo 2.3). Da questi assunti, l'approccio operativo – basato sull'uso di strumenti di modellizzazione e simulazione, e su test di misura e valutazione in regime "simulato" – assume particolare rilevanza.

Nel corso degli anni, infatti, più volte è stato messo a confronto il ruolo dei test *versus* – nell'accezione di opposizione – il ruolo dei software di simulazione. In linea generale, il carattere ancora "incerto" dei risultati ottenuti dai software ha portato, di fatto, a prediligere i test di laboratorio, come unici strumenti in grado di misurare gli effetti "reali" subiti dall'involucro edilizio, nonostante il "dispendio economico e di risorse³" che questi comportano.

Quest'affermazione non vuole porsi in modo dirimente rispetto le procedure di prova effettuate in laboratorio, al contrario, si afferma che la presente ricerca intende il test come uno *step fondamentale e strategico*, poiché è in grado di condurre la sperimentazione verso risultati affidabili e di conseguenza essere inteso come *strumento di calibrazione* per il settaggio di alcune funzionalità del software posto in esame.

Di fatti, utilizzare strumenti di simulazione, che siano coerenti con i test, può snellire i processi di valutazione e progettazione, ricorrendo a prove di laboratorio nella misura in cui vengono messe in atto "nuove" variabili, per l'involucro edilizio, da valutare. In questo senso, il termine *versus* si rifà alla sua locuzione latina quale "in direzione di", per cui – superando l'apparente antitesi – simulazione e testing sono chiamati a concorrere contestualmente per lo sviluppo di processi di innovazione sia tecnologica che progettuale.

Conclusa questa premessa, nel paragrafo successivo, si riportano le azioni condotte per la fase di progettazione del Mock-Up. In letteratura, con il termine "Mock-Up" si riferisce ad un modello in scala reale, full-size, – che "rappresenta e replica sezioni o porzioni del sistema di facciate continue o dell'involucro edilizio" [McFarquhar, 2011] – le cui funzioni e performance risultano ancora non del tutto esplorate e per questo motivo, oggetto di valutazione. Nella maggior parte dei casi, questo termine viene utilizzato per i sistemi fisicamente prodotti e finalizzati ai test di laboratorio. In quest'ambito, rifacendosi alla definizione espressa da Ogata et al. [1998], il Mock-Up viene inteso sia come modello fisico, *Physical Mock-Up*, che come modello digitale, *Digital Mock-Up*.

6.2 Il Design per il PMU (Project Mock-Up) del sistema di facciata convenzionale

Da questi assunti, la configurazione scelta per il sistema di facciata continua sottoposto ad analisi e verifica per le fasi di testing e simulazione risulta essere identica, costituendo in modo univoco il modello di progetto, *Project Mock-Up* (PMU).

Fig. 1. Profili in alluminio estruso per il PMU

La fase di progettazione del PMU è stata avviata grazie al supporto dell'azienda *Ponzio s.r.l.*⁴ e, in particolar modo, grazie agli ingegneri dell'ufficio tecnico⁵, che hanno reso possibile il raggiungimento delle competenze tecniche di base per la progettazione dei sistemi di facciata continua. Questa fase è stata intesa come la *concretizzazione dell'obiettivo specifico del periodo aziendale*, svolto presso la suddetta azienda.

Nello specifico, le attività condotte sono risultate in piena coerenza con le fasi metodologiche della ricerca – esplicitate nell'introduzione – con particolare riferimento alla *fase istruttoria* e la *fase di verifica*. Si denota, ancora una volta, come il carattere industriale costituisca lo sfondo ricorrente per il percorso evolutivo della presente ricerca e possa condurre ad attività di formazione non solo in ambito professionale ma con forti ripercussioni sull'accrescimento del background scientifico rispetto il *know-how* in materia di progettazione delle facciate continue per l'involucro edilizio.

Per maggiore chiarezza, gli *step metodologici* – oggetto di attività trasversali e complementari – che hanno costituito la *fase di design del Project Mock-Up* (PMU), vengono di seguito riportati:

- scelta della tipologia del sistema di facciata che si intende valutare attraverso testing e simulazione;
- dimensionamento dei singoli elementi e prime analisi strutturali attraverso software di verifica interni dell'azienda;
- studio e analisi dell'assetto tipo-tecnologico della camera di prova, in cui dovrà essere installato il Mock-Up, utile alla definizione dei limiti dimensionali del modello da valutare;
- configurazione di diverse ipotesi progettuali ed elaborazione dell'assetto tecnologico-dimensionale definitivo del Mock-Up.

In prima istanza, la fase sperimentale si è incentrata sulla scelta tipologica del sistema di facciata continua da progettare e valutare. La presa visione e sistematizzazione dei ventagli tipologici dei sistemi di facciata, "*a marchio Ponzio*", ha condotto la ricerca verso la scelta della tipologia a montanti e traversi – Stick System – "*WS50 PG Curtain Wall*" (Fig. 2); la cui denominazione PG, Pressure Glass, è riferita al sistema con cui gli elementi di tamponamento sono sostenuti, ovvero mediante pressori⁶ e carter⁷.



Fig. 2. WS50 PG Curtain Wall. Tipologia Stick System, Ponzio s.r.l.

Tali attività sono perseguite verso la fase di dimensionamento dei componenti principali – montanti e traversi – del modello e i sistemi di connessione ad esso annessi. Per il processo di dimensionamento dei montanti è stato utilizzato un software di analisi strutturale sviluppato dagli stessi ingegneri dell'ufficio tecnico. Ciò ha permesso di delimitare il campo verso la classificazione degli elementi costitutivi di tale sistema individuando, come si evince dall'Allegato 1, il montante da 125 mm e di conseguenza il traverso da 129,5 mm, quali profili le cui caratteristiche di inerzia risultano idonee con i requisiti di spostamento prefissati e in linea con le normative di settore per la valutazione degli stress sismici.

Nelle fasi di configurazione del PMU e di conseguenza per la definizione di tutti gli elementi costitutivi ad esso annessi, le attività – per ragioni di limitazione dell'assetto tipo-tecnologico – si sono rivolte verso l'analisi delle caratteristiche dimensionali della camera di prova della sezione TCLab del Building Future Lab – queste vengono riprese all'intero del paragrafo 6.3 "Le attività di laboratorio: protocolli di Testing presso la sezione TCLab del BFL".

Nello specifico, le tolleranze dimensionali riguardano, in prima battuta, l'apertura massima della campata – in cui sarà alloggiato il PMU – le cui dimensioni in larghezza sono di 6570 mm. In questo senso, è stata definita la prima dimensione che il provino dovrà asseverare. Inoltre, la configurazione strutturale della camera di prova ha portato a un'altra delimitazione di campo in ragione della tipologia di montaggio dei sistemi di facciata – in luce, appesa o poggiata (Fig. 3). La presenza del sistema di travi ha condotto la scelta verso la tipologia "appesa" ovvero utilizzando, in modo univoco, i sistemi di connessione staffa a muro in alluminio estruso.

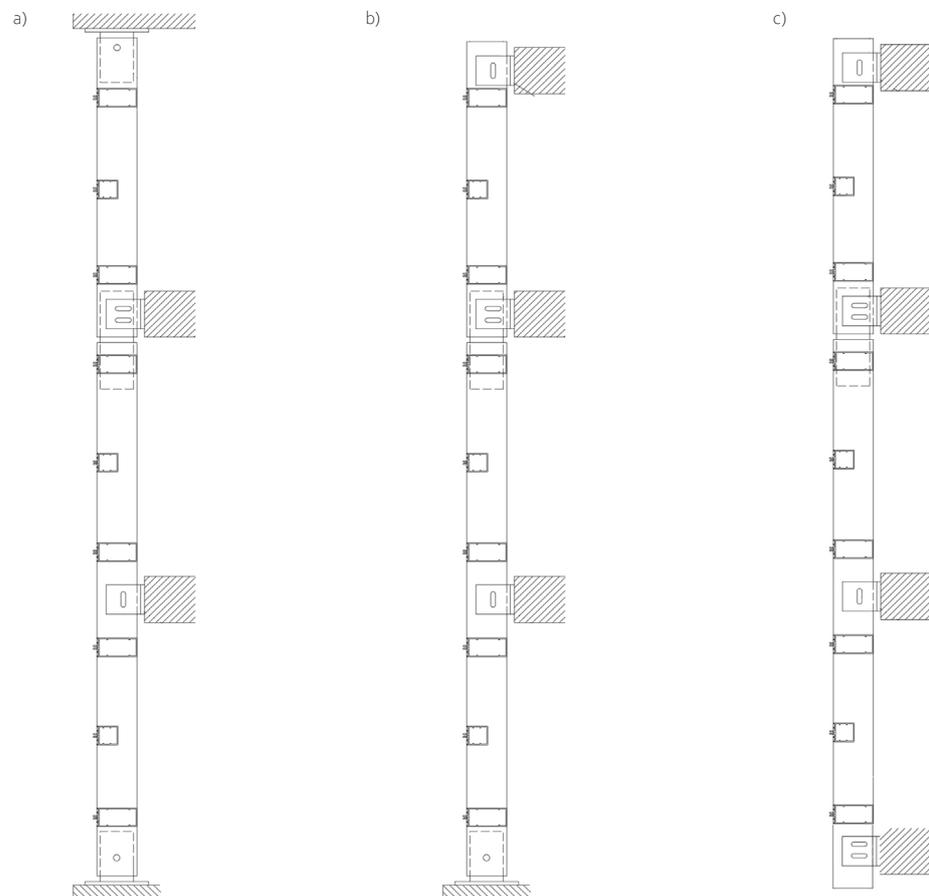


Fig. 3. Tipologia di montaggio per il sistema Ponzio WS50 Curtain Wall: a) in luce, b) poggiata, c) appesa

Nel riprendere lo step di design PMU, risulta necessario dichiarare che, in questa fase, la ricerca non può esimersi dalle considerazioni critiche che sono emerse nel corso della trattazione rispetto i risultati, derivanti dal background scientifico, per il miglioramento del comportamento dinamico degli elementi che costituiscono i sistemi di facciata (Cfr. Capitolo 5). Di fatti, nel Project Mock-Up sono state messe in campo alcune variabili legate a tali considerazioni, ovvero:

- l'utilizzo di due tipologie di cavallotti⁸, quali elementi di connessione trasverso-montante;
- un aumento variabile dello spazio che intercorre tra il bordo del vetro e la "tasca" del telaio in cui si innesta il sistema vetrato, al fine di evitare il contatto critico tra vetro-telaio;
- la scelta della tipologia di vetro stratificato che consente il miglioramento della risposta del sistema vetrato sottoposto a spostamenti di interpiano.

Proseguendo per ordine, la scelta di due tipologie di cavallotti risiede in alcune valutazioni prestazionali. La prima, di carattere dimensionale e di peso che questo elemento di connessione può "sopportare", la seconda considerazione riguarda il comportamento dinamico degli elementi sollecitati. Nello specifico, è stato scelto il *cavallotto a pulsante* (Fig. 4a) tenendo in considerazione le tolleranze dimensionali che variano a seconda del peso delle singole specchiature e si riferiscono ad un peso compreso tra 100-150 kg.

Diversamente, il *cavallotto tondo* è utilizzato per gli elementi vetrati il cui peso varia da 100 a 400 kg. In questa tipologia rientra, anche, la seconda considerazione prestazionale, le caratteristiche geometriche-strutturali del cavallotto tondo consentono un movimento rotazionale, che può essere inteso come "*a favore del comportamento dinamico del telaio sottoposto a derive di interpiano*" (Fig. 4b), caso che può verificarsi durante gli eventi sismici. Da questo scenario, si evince come la tipologia dei cavallotti risulti fortemente dipendente dalla configurazione dimensionale delle specchiature, in cui, per la prime verifiche prestazionali ci si è serviti del *software SJ Mepla*⁹.

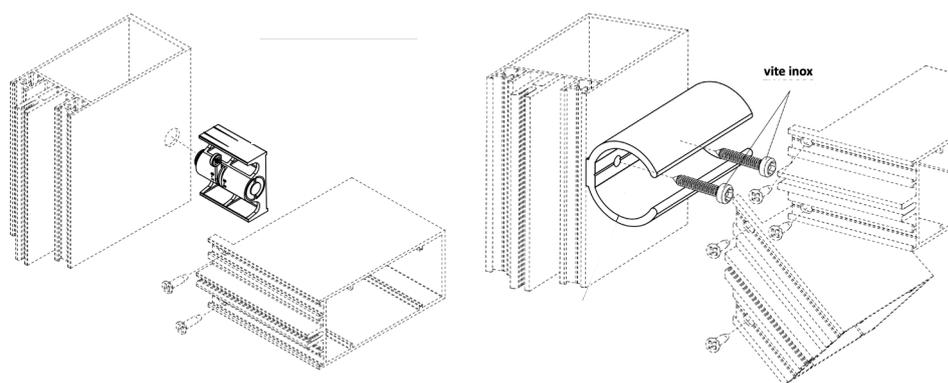


Fig. 4. Tipologia di cavallotti per il sistema Ponzio WS50 Curtain Wall: a) cavallotto a pulsante, b) cavallotto tondo

Tenendo conto delle indicazioni riportate all'interno delle normative di settore, americana ed europea, e dei risultati della ricerca condotta da Behr et al. [2009], la scelta si è rivolta verso specchiature con doppio vetro stratificato con vetrocamera il cui spessore, in termini tecnici, è $5,5,2 + 16 + 5,5,2^{10}$, ovvero pari a 38 mm e le cui dimensioni superficiali risultano variabili. Infine, in accordo con quanto espresso da Memari et al. [2011] il limite minimo di "ingresso vetro" di 6 mm, come fissato da Sucuoglu e Vallabhan [1997] – Cfr. Paragrafo 4.1. – è risultato inadeguato. Per questo motivo, lo spazio di innesto tra il bordo della lastra di vetro e la "tasca" del telaio è stato fissato tra i 10 e i 13 mm¹¹.

In seguito a una serie di ipotesi, proposte e discusse con il supporto dell'ufficio tecnico dell'azienda Ponzio, sono stati progettati due provini – *WS50 PG Curtain Wall* – uguali nelle

caratteristiche dimensionali complessive, ma diversi nell'assetto tecnologico del montante. Infatti, nel primo provino, il montante si presenta ad asse unico, nel secondo caso, invece, i montanti si presentano ad asse spezzato – il cui elemento di connessione è rappresentato dal canotto¹². Le ragioni legate a questa configurazione risiedono nella necessità di verificare il comportamento del singolo montante, come nei casi di montaggio "in luce". Per la messa in opera di tale ipotesi e considerando che le barre dei profili vengono prodotte con una lunghezza massima di 7000 mm, è stata definita l'altezza dei provini pari a 6860 mm – dimensione che deriva dagli scarti di lavorazione previsti per i profili estrusi.

Infine, per la configurazione delle variabili del PMU, si è tenuto conto che nella maggior parte dei casi, le valutazioni per gli stress sismici sui sistemi "serramenti" e sistemi "facciata" non vengono verificati simultaneamente in unico sistema, ma ciò avviene isolando i singoli sistemi. Per questo motivo, in ragione delle tipologie di serramento installabili sui sistemi di facciata continua, la fase di progettazione è perseguita verso il dimensionamento di due tipologie di serramenti: *apribile a sporgere* e *anta ribalta*.

Con questo step metodologico si è conclusa la *fase di design del Project Mock-Up*, in cui sono state messe in atto le variabili emerse nel corso del periodo aziendale e dagli studi condotti per la costruzione del background scientifico. Per maggiore chiarezza, l'Allegato 2 riporta l'abaco degli elementi costitutivi dei Mock-Up, che costituiscono la configurazione del caso sperimentale oggetto di verifica e valutazione.

Per cui sinteticamente, come descritto nella Tabella 1, i Mock-Up – da testare all'interno della sezione TCLab e analizzare tramite software SimSolid – sono progettati con montanti da 125 mm ad asse unico e spezzato e traversi da 129,5 mm, le cui dimensioni nel complesso sono rispettivamente 6860 mm (altezza) x 6570 mm (larghezza). Per la messa in atto di diverse variabili all'interno dei singoli Mock-Up, montanti e traversi sono stati disposti in modo asimmetrico configurando campate ad altezza e lunghezza variabile, con 6 serie di specchiature fisse e due tipologie di apribili per Mock-Up, anta a ribalta e apribile a sporgere (Cfr. Allegato 3).

Tabella 1. Caratteristiche tecniche Mock-Up

Facciata Stick System		WS50 PG Curtain Wall
Dimensioni		2 Mock-up: 3050 mm (W) x 6860 mm (H)
Frame facciata	Montanti	125 x 50 mm (barre estruse)
	Traversi	129,5 x 50 mm (barre estruse)
	Taglio termico	Distanziale in Polyammide
Doppio vetro stratificato		5,5,2 + 16 (vetrocamera) + 5,5,2
Guarnizioni vetro		Interna ed esterna in EPDM
Dimensioni apribile a sporgere		1800 mm (W) x 1700 mm (H)
Dimensioni apribile anta a ribalta		1250 mm (W) x 1700 mm (H)
Ingresso vetro		13 mm – 10 mm
Elementi di connessione traverso - montante		Cavallotto a pulsante in alluminio
		Cavallotto tondo in alluminio
Sistema di ancoraggio		Tubolare quadrato in acciaio 200 x 200mm
		Staffa a muro in alluminio estruso

Concluso lo step di design del Project Mock-Up, la sperimentazione si avvia verso la fase di verifica, procedendo da un lato verso l'elaborazione dei disegni tecnici per la produzione del *Physical Mock-Up*, dall'altro, verso la modellazione del *Digital Mock-Up* – finalizzato all'analisi da effettuate tramite software. Per la realizzazione del modello fisico, sono stati elaborati i disegni tecnici e le distinte di lavorazione degli elementi da realizzare (Cfr. Allegato 4), ponendo l'attenzione sulla progettazione dei componenti di connessione utili all'alloggiamento dei provini all'interno della camera di prova.

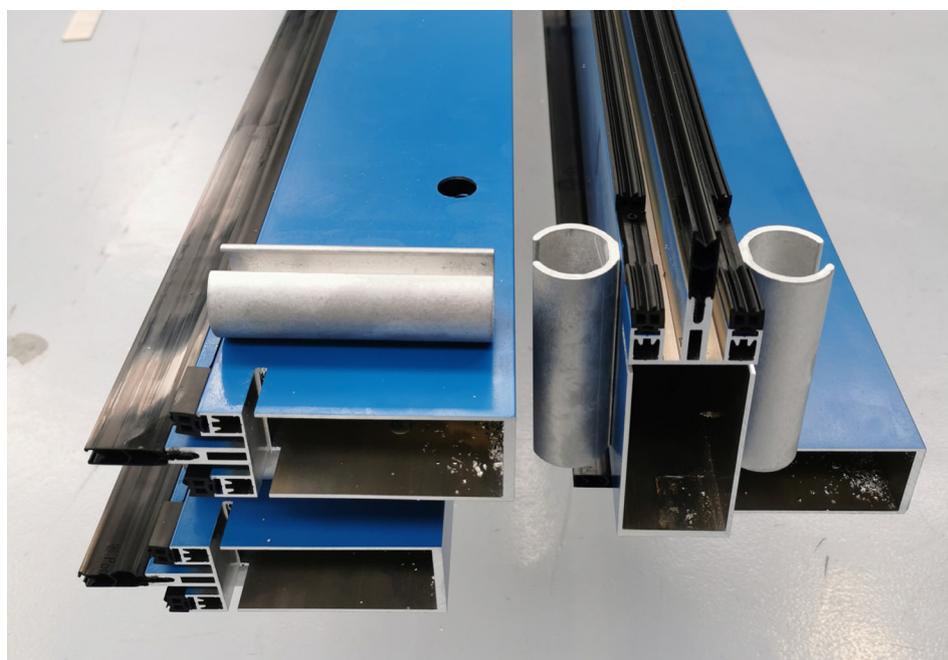


Fig. 5. Profili trasversi del Mock-Up con cavallotti tondi per la connessione montante-traverso

Come già emerso precedentemente, il dialogo sinergico con la sezione TCLab ha permesso di valutare le dimensioni dello stato di fatto della camera di prova, il cui scopo è di progettare sistemi che risultino coerenti con le condizioni reali¹³ con cui questi sistemi saranno installati. Di fatti, la configurazione dell'assetto tipologico dei Mock-up ha avuto seguito con il posizionamento "virtuale" degli stessi all'interno della camera di prova del TCLab.

Ciò ha permesso di misurare, da un lato, le distanze effettive che si creano tra il sistema di travi della camera e la staffa di ancoraggio prevista per i Mock-Up, dall'altro, di progettare, di conseguenza, un ulteriore sistema di ancoraggio per superare il gap tra il sistema strutturale della camera e il sistema di connessione telaio-facciata, attraverso tubolari quadrati in acciaio, le cui dimensioni in sezione sono 200 x 200 mm.

In conclusione, gli step di analisi – che costituiscono il *corpus* dei paragrafi successivi e della *fase di verifica* – riguardano la lettura del comportamento dinamico della facciata convenzionale, *WS50 PG Curtain Wall*, il cui scopo è legato all'individuazione degli elementi critici che insorgono nel processo di stress. Ciò permette di indirizzare la ricerca verso il miglioramento delle performance sismiche del sistema facciata e proporre un'innovata metodologia di progettazione, resa possibile grazie all'implementazione del software di simulazione. La trattazione del paragrafo successivo riguarda la discussione della *prima fase di verifica relativa alle analisi condotte attraverso il software di simulazione SimSolid*.

6.3 Modellazione e analisi agli elementi finiti del sistema facciata convenzionale tramite software di simulazione SimSolid

La prima fase di verifica del caso sperimentale è incentrata sulla discussione delle attività condotte e dei risultati ottenuti dalla fase di modellazione e analisi agli elementi finiti, FEA, tramite software di simulazione. Le principali funzionalità degli strumenti di valutazione numerica, presenti sul mercato, sono state introdotte e affrontate criticamente all'interno del Paragrafo 4.4 – "Confronto tra i software di simulazione per la valutazione delle performance sismiche dei sistemi di facciata continua" –, queste vengono qui riprese sinteticamente al fine di riallacciarsi alla tematica principale della trattazione: il processo di simulazione per il sistema di facciata convenzionale. Come emerso nel paragrafo sopracitato, la metodologia di analisi agli elementi finiti – attraverso software di simulazione – per i sistemi di facciata continua è un approccio relativamente recente, sviluppato originariamente per verificare il comportamento dinamico delle strutture degli edifici. Per questo motivo, i maggiori limiti di tali strumenti di analisi risiedono nell'inadeguatezza degli stessi di "leggere" tutti gli elementi/materiali che costituiscono i sistemi di facciata e di conseguenza essere in grado di analizzarli in modo coerente rispetto le valutazioni che risultano dalle "antagoniste" attività di testing. Generalmente, come già descritto¹⁴, le tipologie di software sono due:

- *convenzionali*, ovvero strutturati in tre step, rispettivamente *pre-processing*, *processing* e *post-processing*;

- *non convenzionali o meshless*, strutturati in due step, *processing* e *post-processing*, in cui la fase di *pre-processing* viene in parte assorbita da altri software di modellazione.

Le differenze maggiori risiedono, quindi, nella disposizione o meno della fase di *pre-processing* ma anche nella descrizione numerica degli elementi di facciata – nei software convenzionali – quali elementi strutturali come *shell* e *beam*. Tra le due tipologie dei software discusse, l'attenzione si è focalizzata, infine, sullo strumento non convenzionale. La scelta di utilizzare questa tipologia di software per la fase di verifica risiede, pertanto, nella funzionalità dello stesso di superare – grazie a complessi algoritmi – le fasi di modellazione e *meshing*¹⁵ e di essere in grado valutare il comportamento di qualsiasi tipo di materiale purché se ne conoscano le proprietà meccaniche, termiche e di fatica (Cfr. Paragrafo 4.4). Nello specifico ci si riferisce al software "SimSolid" sviluppato dall'azienda madre Altair One¹⁶ e fornito da Altair Software and Services SL¹⁷, partner della presente ricerca.

Il primo step della fase di verifica è, quindi, incentrato sulle *analisi agli elementi finiti*, riprendendo la metodologia adottata dalla letteratura di settore [Behr, 2008; Memari et al., 2011; Bedon & Amadio, 2018]. Lo scopo principale è di prevedere i danni che insorgono durante gli spostamenti causati dagli effetti sismici, definiti come *derive di interpiano* (Cfr. Paragrafo 4.1). La sfida della ricerca risiede nel dimostrare che, nonostante l'esistenza di diversi elementi e materiali in una facciata continua, l'approccio agli elementi finiti dovrebbe essere considerato un metodo di "analisi ingegneristica" valido per prevedere la rottura del vetro dei sistemi di involucro e per questo motivo essere utilizzato per i processi di progettazione. Di fatti, seppure le linee di ricerca si stanno orientando verso la proposizione di elementi di *connessione flessibili*, è necessario ricordare che i limiti critici dei sistemi di facciata sollecitati alle azioni sismiche – come acclarato – risiedono nei *danni subiti sugli elementi vetrati* (Cfr. Paragrafo 4.2). Per questo motivo, i maggiori sforzi sono legati alla prevenzione di tali danni attraverso il *miglioramento del comportamento dinamico dell'intero sistema facciata*, adottando quindi un approccio di progettazione *fail-safe*.

Per cui, in questo scenario, lo step di verifica riguarda lo sviluppo di analisi che siano in grado di valutare il comportamento dinamico dei sistemi di facciata continua con particolare riferimento agli elementi vetrati, al fine di prevedere la possibile rottura di tali superfici causata da uno specifico spostamento, che le induce a "fessurazione" e conseguente caduta dal sistema telaio, identificandosi come *flying debris*.

Utilizzando un modello ad elementi finiti *FEM*, è possibile calcolare le sollecitazioni in qualsiasi punto, non solo della superficie vetrata ma di tutto il *Digital Mock-Up*. In questa funzione risiede uno dei principali vantaggi degli strumenti di simulazione. Sottoponendo i modelli a spostamenti crescenti, infatti, una volta "*processata*" l'analisi si possono ottenere, da un lato, i valori nominali dello stato finale di "*stress*" dei singoli elementi, dall'altro, identificare il valore dello spostamento in cui gli elementi entrano nella "*fase critica*" di rottura. In particolare, le sollecitazioni ai bordi nelle regioni angolari – intesi come probabili punti di fessurazione – possono essere stimate dal modello agli elementi finiti e confrontate con i risultati dei test di laboratorio. Come già espresso più volte, le verifiche effettuate tramite attività di testing non riguardano l'elaborazione di valori numerici, di fatti, non sembrano esistere ad oggi sensori o strumenti di misurazione che rilevino geometricamente il comportamento dinamico degli elementi dei sistemi di facciata sollecitati. In questo scenario, risiedono gli *obiettivi specifici* della prima *fase di verifica* che – analogamente alle attività condotte presso l'azienda Ponzio s.r.l. – afferiscono agli obiettivi del periodo aziendale presso Altair Software and Services SL, grazie al supporto degli ingegneri²⁸ impegnati nello sviluppo dei software. La trattazione di tale fase persegue destrutturandosi in due sezioni:

- la prima, relativa alla *costruzione del tool metodologico* (uno degli output della ricerca) sviluppato per l'apprendimento e l'utilizzo del software di simulazione;
- la seconda, relativa al *processo di analisi*, modali e lineare, e la discussione dei risultati ottenuti dalle analisi condotte.

6.3.1 Lo sviluppo del tool metodologico per il software SimSolid

Prima di avviare la trattazione verso la discussione degli step metodologici, riportati di seguito, risulta necessario dichiarare che queste fasi non sono state sviluppate in modo consequenziale, talvolta si sono sovrapposte o anticipate al fine di apprendere le modalità con cui il "*software opera ai fini delle analisi*", provando ad individuare, in modo circoscritto, i limiti ad esso annessi. Ciò, in un'ottica che si orienta *verso lo sviluppo di un tool metodologico*²⁹ di supporto per progettisti, ricercatori del settore delle facciate che si affacciano ai processi di simulazione al fine di adottare un *approccio affidabile e replicabile* che conduca verso risultati di analisi coerenti con i risultati dei test di laboratorio, innovando così il processo di progettazione.

In questo senso, lo sviluppo del tool metodologico viene inteso come uno dei *risultati specifici della ricerca*, portando la stessa verso il raggiungimento degli obiettivi prefissati.

Si riportano, in modo puntuale, gli step metodologici della prima fase di verifica:

- *modellazione* dei Digital Mock-Up su 3D parametrico attraverso alcune semplificazioni geometriche utili alla lettura del modello sul software SimSolid;
- importazione del 3D su software SimSolid attraverso il settaggio delle tolleranze geometriche;
- creazione delle *connessioni* tra i vari elementi del sistema, attraverso il tool "connection";
- l'assegnazione dei *materiali* ai singoli elementi con la relativa caratterizzazione materica;
- sviluppo dell'*analisi modale* al fine di verificare lo stato delle connessioni create;
- *analisi lineare* attraverso l'applicazione dei carichi sismici in linea con le prescrizioni normative di riferimento.

Il secondo step metodologico della fase sperimentale ha riguardato la modellazione del primo Mock-Up²⁰ – ovvero il sistema in cui il montante si presenta ad asse unico – su software 3D parametrico, *Inventor*, andando a identificare gli step di semplificazione utili alla lettura del modello sul software SimSolid.

Nella *fase di modellazione*, gli elementi costitutivi del sistema di facciata sono stati estrusi e "*lavorati*" in linea con i processi di produzione, prevedendo cioè i fori per l'innesto dei giunti meccanici o per i sistemi di drenaggio e tutte le lavorazioni previste per la posa in opera

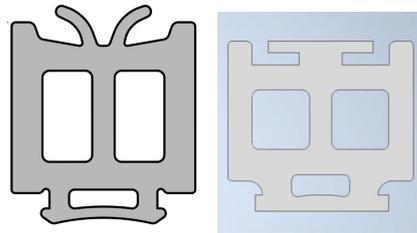
del sistema, configurando così l'assetto reale dei singoli elementi. In un'ottica che mira alla restituzione della condizione reale che si creerà all'interno della sezione del TCLab, questa fase ha previsto finanche la modellazione delle travi della camera di prova, riconfigurando l'assetto tipo-tecnologico sul quale verranno installati i due Mock-Up.

Inoltre, servendosi del software Inventor gli elementi sono stati assemblati, in prima battuta, attraverso la creazione dei vincoli²²; questo step è stato sviluppato al fine di rendere il modello come un unico sistema solidale, evitando di incorrere in possibili errori di posizionamento/collegamento degli elementi/componenti.

Nello step di modellazione, grande attenzione è stata posta sulla configurazione geometrica di alcuni elementi. La differenza tra la modellazione dei sistemi strutturali e dei sistemi di facciata infatti non riguarda solo il numero degli elementi che lo compongono – superando l'apparente considerazione che i sistemi di facciata siano composti da un numero "irrisorio" di elementi –, ma, anche e soprattutto, le dimensioni geometriche di questi elementi.

Nelle facciate il sistema di misurazione, infatti, è nella scala del millimetro, diversamente dalla scala utilizzata per le strutture. La modellazione degli elementi, che compongono il sistema facciata continua, si è quindi focalizzata, sulle *guarnizioni in EPDM*, intese come elementi critici sia per la creazione delle connessioni su software SimSolid che per le dimensioni ridotte. Rispetto le connessioni, è risultato necessario "*semplificare geometricamente*" gli elementi in EPDM andando a "*modellarli*" sul software parametrico rispetto l'assetto finale che le guarnizioni presentano una volta installate sul sistema. Per maggiore chiarezza la Figura 6 riporta un confronto tra la configurazione della guarnizione non installata, "*a riposo*", e la configurazione che questa assume una volta installata sul sistema, "*in condizione di servizio*".

Fig. 6. Tipologia di guarnizioni per il sistema Ponzio WSgo Curtain Wall: a) guarnizione "a riposo", b) guarnizione "in condizione di servizio"



Gli step di semplificazione sono stati verificati, di volta in volta, importando il Digital Mock-Up sul software SimSolid. Si dichiara, infatti, che le analisi non sono state condotte simultaneamente sui Mock-Up bensì singolarmente al fine di analizzare in modo accurato i comportamenti dinamici che ne derivano.

La metodologia con la quale sono stati importati tali elementi ha riguardato una prima scomposizione dei Mock-Up, ovvero importando inizialmente sul software una parte di elementi, ad esempio un montante e/o un traverso e le guarnizioni ad essi annesse. Ciò al fine di verificare se l'approccio di semplificazione risultasse corretto per la creazione delle connessioni. In questo risiede uno dei limiti maggiori del software; di fatti, seppure geometricamente le facce della guarnizione fossero corrispondenti rispetto la faccia in cui vengono installate le guarnizioni, il software non sempre è risultato idoneo nella creazione delle connessioni, questo a causa delle dimensioni notevolmente ridotte degli elementi in EPDM. Il riscontro di questo limite ha portato ad una prima proposta di implementazione delle funzionalità del software. Grazie al supporto degli sviluppatori, infatti, si è proposto di migliorare le tolleranze geometriche al fine di creare connessioni anche tra due elementi le cui dimensioni sono ridotte.

Verificato l'approccio di semplificazione per gli elementi di guarnizione, la modellazione si è rivolta verso la *presenza di apribili* all'interno dei provini. I serramenti sono stati considerati come ulteriori elementi critici poiché costituiti da componenti meccanici, "accessori", che operano per l'apertura di tali sistemi. In modo analogo alla metodologia applicata per gli elementi in EPDM, il sistema di apribili è stato scomposto, semplificando, per il sistema specifico, non solo la geometria dei singoli elementi che lo costituiscono ma anche il numero degli elementi.

La verifica delle semplificazioni attuate, in questo caso, ha riguardato l'importazione sul software SimSolid, con la creazione delle relative connessioni, ma anche la conduzione di analisi modali al fine di valutare, in prima istanza, lo stato della connessione dell'intero sistema apribile e, successivamente, il comportamento del serramento rispetto il sistema di facciata. Si evince come le prime fasi di sviluppo si siano incentrate su:

- la *classificazione delle condizioni al contorno* – che identificano e simulano l'ambiente reale;
- la *semplificazione geometrica* degli elementi del primo Mock-Up;
- i *vincoli* imposti tra i vari elementi.

Incentrando la trattazione sulla creazione delle connessioni – ovvero vincolando rigidamente le superfici di contatto tra i vari componenti – si è proceduto servendosi di due modalità di connessione: "automatiche" e "manuali".

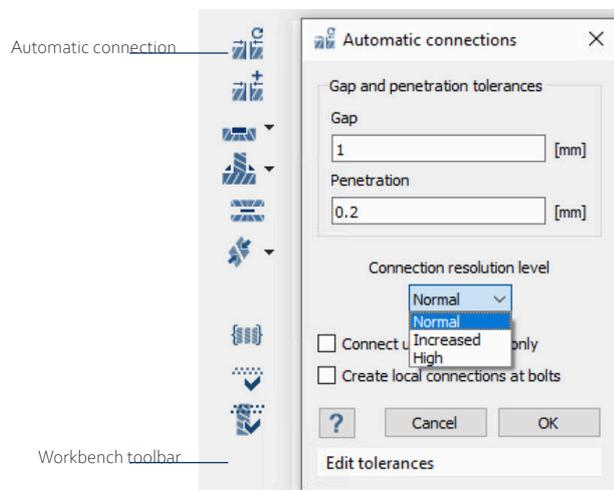


Fig. 7. Modalità connessioni automatiche all'interno del Workbench toolbar. Interfaccia SimSolid

In un primo momento, i vincoli sono stati imposti – utilizzando all'interno del tool "connections" – la funzione di "automatic connection" (Fig. 7), in questa funzione sono stati settati numericamente due parametri, quali "gap" e "penetration".

Questi permettono di prevedere le possibili tolleranze geometriche tra gli elementi di contatto, relative ad una possibile distanza o compenetrazione. Con questa modalità, il software rileva automaticamente le superfici vincolate tra i vari elementi.

Come ampiamente emerso, a causa delle dimensioni ridotte degli elementi in EPDM, questa funzionalità non è risultata idonea per la creazione delle connessioni tra le guarnizioni e gli elementi annessi, montante e/o traverso.

Per questo motivo, la creazione delle connessioni è avvenuta in modo "manuale", utilizzando nel tool "connection" la funzione "add/edit part connection" (Fig. 8). In questo modo il software consente di operare con tre approcci differenti:

- *master connect*, ovvero selezionando all'interno del modello un elemento "master" a cui

sono connessi uno o più elementi;

- *group connect*, ovvero selezionando un insieme di elementi connessi tra di loro senza individuare l'elemento master;

- *edge to surface*, ovvero selezionando il bordo di un elemento come punto di connessione rispetto ad una faccia di un altro elemento.

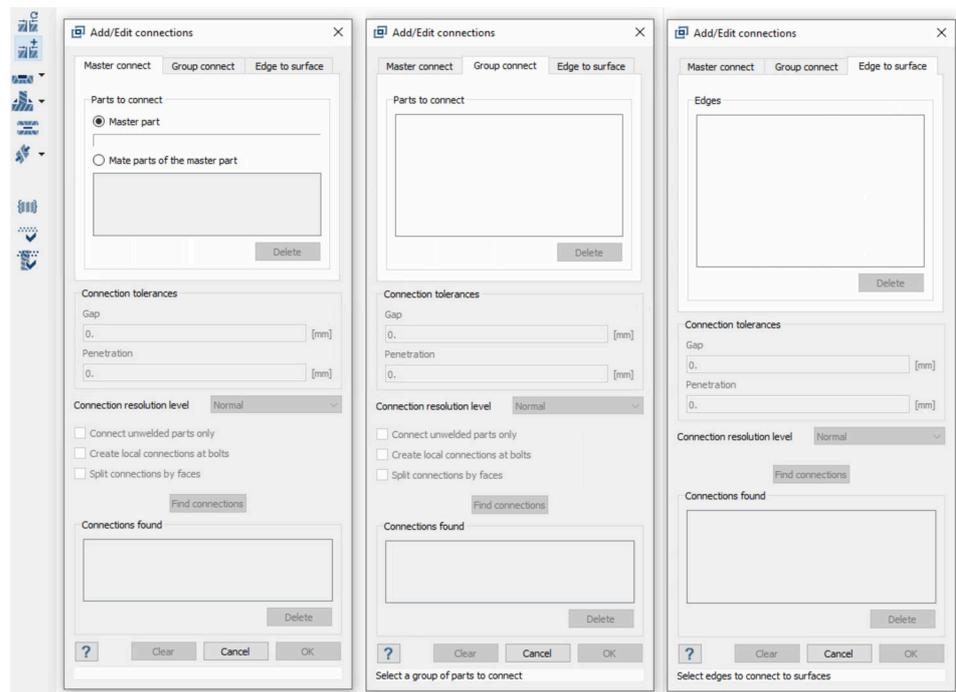


Fig. 8. Modalità connessioni manuali all'interno del Workbench toolbar. Interfaccia SimSolid

Nel caso della presente ricerca, l'approccio utilizzato si è rivolto verso la modalità "*master connect*", la quale – analogamente alla funzione di connessione automatica – deve essere settata rispetto i parametri "*gap*" e "*penetration*".

Inoltre, il tool "*connection*" – sia automaticamente che manualmente – consente di impostare il livello di risoluzione con cui vengono create le connessioni attraverso i parametri "*increased*", "*normal*" e "*high*". Questi livelli hanno ripercussioni sulla fase successiva di analisi. Creare connessioni attraverso la risoluzione "*increased*", ovvero il livello di risoluzione più alto, ha il vantaggio di settare numericamente "*gap*" e "*penetration*" con valori numerici "*bassi*", di contro produce dei rallentamenti nella fase di processo dell'analisi²². Per questo motivo, è necessario utilizzare parametri di "*gap*" e "*penetration*" con valori numerici molto bassi attraverso la risoluzione "*normal*", assicurandosi che gli elementi geometrici siano stati modellati su software parametrico evitando punti di intersezione o distanze che superino il millimetro, laddove possibile.

Nella metodologia adottata, infatti, solo nel caso delle guarnizioni in EPDM le connessioni sono state create *manualmente* con il livello di risoluzione "*increased*". Con le modalità sopra descritte, le connessioni sono di tipo "*bonded*", ovvero connessioni *rigide* tra i vari elementi del sistema di facciata. In questo caso, il software non ammette gradi di libertà tra i componenti/elementi. Analizzando il possibile comportamento delle guarnizioni – grazie allo scambio di feedback con gli sviluppatori del software e l'ufficio tecnico Ponzio s.r.l. –

innestate tra i profili in alluminio estruso e il vetro, questa tipologia di connessione non è risultata coerente con il comportamento reale.

Alla luce di ciò, si è proceduti verso un'altra tipologia di connessione che può essere impostata solo in una fase successiva, ovvero solo quando viene impostata l'analisi che s'intende processare per il modello. Tra le varie tipologie che possono essere modificate, rientrano le connessioni "*sliding without friction*" che permettono un grado di libertà nella traslazione verticale o orizzontale di un elemento rispetto ad un altro, diminuendo i fattori di rigidità che potrebbero compromettere il comportamento dell'intero sistema di facciata.

Operare solo con connessioni di tipo "*bonded*" potrebbe conferire al sistema un'eccessiva rigidità non coerente con la realtà. Nello step di connessione, come si evince, risiedono le maggiori difficoltà e limiti dell'utilizzo del software. In questo senso, servirsi di una metodologia che possa supportare questa fase risulta necessario al fine di evitare possibili errori che potrebbero inficiare i risultati delle analisi.

Definiti, quindi, i vincoli del modello (Cfr. Allegato 5), la fase sperimentale si è rivolta verso l'assegnazione materiale degli elementi che costituiscono il sistema di facciata. Come dichiarato nel paragrafo di presentazione delle funzionalità del software (Cfr. Paragrafo 4.4), lo strumento di simulazione dispone di un database in cui sono assegnate numericamente le proprietà meccaniche, termiche e di fatica dei vari materiali. Inoltre, è possibile non solo modificare i parametri predisposti ma anche inserire manualmente "nuovi" materiali – implementando il database – e importare il diagramma stress-deformazione²³ attraverso lo studio della caratterizzazione materiale dei singoli elementi. Per questa fase la ricerca, grazie al supporto dell'azienda Ponzio s.r.l., si è servita del contributo delle aziende fornitrici degli elementi di facciata, attraverso la trasmissione delle schede tecniche dei materiali in cui sono riportati i valori delle proprietà sopracitate (Cfr. Tabella 2).

Tabella 2. Caratterizzazione materiale dei materiali dei Mock-Up

Materiale	Modulo di Elasticità (Gpa)	Rapporto di Poisson	Densità (Kg/m ³)	Carico di rottura (Gpa)
Acciaio	210	0,3	7850	0,35
Alluminio	69	0,33	2700	0,19
EPDM	0,1	0,3	2000	0,25
Polyammide	32	0,40	1140	0,8
PVC	34	0,41	1400	4,65
Vetro	72	0,22	2520	0,7

In questo scenario, si delinea il *risultato finale della presente fase* che ha riguardato lo *sviluppo del tool metodologico* (Cfr. Allegato 6) che può essere adottato nel processo di progettazione.

Ciò viene inteso come un importante *output della ricerca*, poiché consente di avviare i processi di analisi, dimezzando i tempi di apprendimento del software, il cui scopo è di valutare *ex ante* le prestazioni sismiche che il sistema intende asseverare. In questo senso, l'utilizzo del software risponde all'esigenza di adottare strumenti predittivi durante i processi di progettazione. Un ulteriore aspetto da considerare nello sviluppo del *tool metodologico* è l'aspetto di innovazione incrementale che si ritiene raggiunta, conseguendo il soddisfacimento del secondo livello di maturità tecnologica TRL 2 "*Formulazione del concept tecnologico*", intendendo il tool come strumento che abbia forti ricadute sull'innovazione del processo progettuale. La metodologia sviluppata, inoltre, può ritenersi "*replicabile*" e "*flessibile*".



Fig. 9. Technologies Readiness Level TRL.

Nello specifico, è stata adottata e replicata per condurre la modellazione e analisi agli elementi finiti per il secondo Mock-Up da valutare. Diversamente, il concetto di flessibilità risiede nella possibilità di utilizzare questo strumento anche per altre tipologie di facciata, tenendo conto delle specificità tecniche e tecnologiche che costituiscono il caso studio in esame.

Per cui, sviluppato il tool metodologico e raggiunto uno dei risultati specifici della ricerca, la fase sperimentale di verifica è perseguita verso lo sviluppo delle prime analisi, modali e lineari.

6.3.2 Le analisi agli elementi finiti condotte sui Digital Mock-Up e la discussione dei risultati ottenuti

Definita la metodologia con cui la fase di sperimentazione è stata messa in atto, attraverso il tool metodologico sviluppato, la fase di verifica è perseguita verso lo sviluppo delle prime analisi:

- *analisi modali*, per verificare lo stato delle connessioni effettuate sul software;
- *analisi strutturali lineari*, per classificare il comportamento del Digital Mock-Up soggetto alle azioni sismiche.

Attraverso il tool "analysis", il software permette di scegliere la tipologia che s'intende processare per il modello. Nella prima parte il *Digital Mock-Up* è stato assoggettato ad analisi modale²⁴, lo scopo riguardava di verificare le connessioni del sistema attraverso il calcolo delle frequenze naturali ed i modi di vibrare del sistema facciata. In quest'ottica, all'interno del modello digitale, il sistema strutturale della camera di prova non è stato previsto. Per cui definendo il numero di "modi" – nel caso specifico, 9 – con cui sarà processata l'analisi, il software richiede di impostare ulteriori vincoli. In questo caso, tutte le staffe di connessione al muro sono state settate come "incastri" e l'analisi è stata condotta con la risoluzione legata alla rigidità del sistema, "adapt for stiffness". La risoluzione dell'analisi può avvenire per "adapt for stress" oppure in modalità "custom", attraverso l'impostazione del numero di soluzioni "adattive" identificando possibili gruppi di elementi che devono essere verificati. Riportando la trattazione sull'analisi condotta, i risultati hanno dimostrato alcuni errori di settaggio con particolare riferimento ai sistemi di apertura (Fig. 10).

La metodologia sopra esposta è stata ripresa, scomponendo ulteriormente i sistemi di apertura e semplificandoli nel loro assetto tipo-tecnologico. In questo caso, i parametri "gap" e "penetration" sono stati re-impostati con valori numerici maggiori, sfruttando la capacità di rigidità, che ne deriva, utile a restituire il comportamento reale del telaio. Le operazioni di settaggio e conduzione di analisi modale, sono state replicate più volte al fine di ricondurre il modello digitale al comportamento sovrapponibile alla realtà, ovvero verificando che durante la fase di stress gli elementi non si disconnettano gli uni dagli altri e conducendo la sperimentazione verso la specifica fase di verifica, l'analisi strutturale lineare.

In linea teorica, il modello risulta essere settato in modo coerente con le condizioni reali e per questo motivo è stata avviata la fase di processo delle analisi strutturali lineari. Per ragioni metodologiche, queste sono state condotte, inizialmente, su una porzione del Digital Mock-Up – senza il sistema strutturale della camera di prova – individuando le condizioni più sfavorevoli in caso degli spostamenti indotti durante gli eventi sismici²⁵, ad esempio importando il telaio montanti-traversi e gli elementi vetrati con dimensioni maggiori, o il telaio montanti-traversi e il serramento. La metodologia adottata ha condotto la sperimentazione verso la configurazione finale del modello digitale.

Per cui, attraverso il tool "analysis" – "structural" – "structural linear" è stata impostata la soluzione dell'analisi – ovvero come nel caso dell'analisi modale – attraverso il parametro "adapt for stiffness". In questo caso, gli incastri riguardano solo le staffe al muro inferiori e superiori del modello, configurando l'assetto che si crea all'interno della camera di prova e simulando il sistema di travi fisse. Diversamente nella zona centrale del modello, ovvero, la parte in cui i sistemi di connessione sono installati sulle travi sismiche, sono stati impostati i valori numerici degli spostamenti ai quali si assoggetta il modello.

Rispetto la metodologia adottata, il Mock-Up è stato sottoposto a *spostamenti*, inizialmente, ridotti, ad esempio 25 mm, sull'asse Z, asse corrispondente allo spostamento di piano che si verifica durante gli eventi sismici. Da qui emerge un ulteriore limite dello strumento di simulazione, di fatti, in opposizione ai test dei laboratori specializzati che consentono lo spostamento in due direzioni all'interno dello stesso ciclo/step, nelle analisi lineari condotte all'interno del software, questi spostamenti devono essere impostati singolarmente, sviluppando due analisi distinte con spostamenti positivi e negativi rispetto l'asse di traslazione, in questo caso "Z".

Nelle prime analisi, nonostante gli spostamenti indotti fossero ridotti, i risultati delle analisi condotte sulla porzione del Mock-Up non hanno riportato un comportamento coerente.

Nel caso specifico, il *comportamento torsionale del montante non risulta congruo* rispetto le verifiche statiche sviluppate in fase di progettazione, poiché i valori di stress rientrano nella *fase plastica di snervamento*²⁶ (Allegato 7).

In questo senso, è risultato fondamentale studiare il comportamento degli elementi di guarnizione rispetto alla tipologia delle connessioni create.

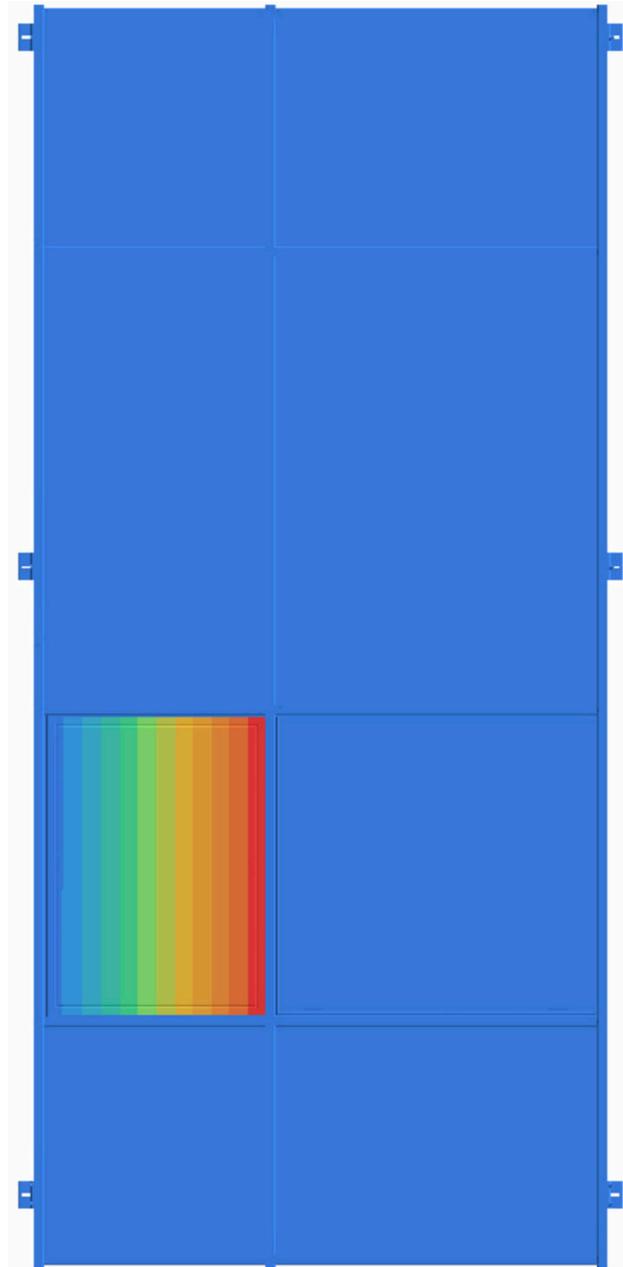


Fig. 10. Mock-Up1
Analisi modale_
SimSolid

Durante la trattazione è emerso, come la tipologia di connessioni "bonded" non fosse sovrapponibile al comportamento reale delle guarnizioni. Di fatti, la caratterizzazione materica e di conseguenza la funzionalità di tali elementi consentono spostamenti, seppur minimi, rispetto il piano in cui vengono installati.

Nello step di analisi sono state impostate, nelle regioni di connessione tra le guarnizioni interne e le corrispondenti superfici vetrate, le connessioni di tipo "sliding without friction". Questa tipologia di connessione non può essere applicata anche nelle ragioni di connessione tra le guarnizioni esterne e le corrispondenti superfici vetrate poiché comporterebbero, in fase di analisi, un distacco tra gli elementi del telaio montanti-traversi e la superficie

vetrata. La fase di verifica è perseguita verso l'assetto finale del Mock-Up – prevedendo tutti gli elementi che costituiscono il modello con montante ad asse unico – e il sistema strutturale della camera di prova (Allegato 8).

In questo senso, l'analisi è stata condotta settando le travi fisse della camera di prova come "corpo rigido" e impostando di conseguenza il valore nominale della densità del materiale (kg/m³), diversamente su una delle facce – trasversali rispetto il sistema di facciata – è stato imposto il valore dello spostamento. Afferendo al Method Statement – sviluppato per i protocolli di testing (Cfr. Allegato 11) meglio espletato nella seconda parte della fase di verifica – lo spostamento è pari a 75 mm – in direzione positiva rispetto l'asse Z (Cfr. Allegato 9); questo valore corrisponde alla deriva di interpiano prevista dalla normativa AAMA 501.6.

L'analisi condotta è di tipo lineare ovvero non prevedendo all'applicazione dello spostamento i valori di frequenza – con il quale viene applicata la deriva – e la variabile del tempo. La Tabella 3 mostra le principali vulnerabilità della facciata continua convenzionale ottenute dopo aver eseguito l'analisi strutturale lineare, la lettura dei risultati è avvenuta attraverso l'approccio basato sul *principio di Von Mises*²⁷.

Tabella 3. Tipologie di vulnerabilità insorte attraverso l'analisi lineare sul Mock-Up attraverso SimSolid

Componente	Tipologia di vulnerabilità
Apribile a sporgere	- Snervamento del telaio del vetro, con valori di stress pari a 440 MPa.
Anta ribalta	- Snervamento del telaio e conseguente espulsione del vetro, con valori di stress pari a 297 MPa.
Giunti meccanici	- Distorsione dei giunti meccanici installati sull'intera altezza dei montanti con valori di stress pari a 300 MPa; - Distorsione dei giunti meccanici installati sui traversi nelle regioni esterne, con valori di stress pari a 529 MPa.
Guarnizioni in EPDM	- Deformazione dell'elemento con conseguente perdita di funzione della pressione di attrito tra gli elementi in alluminio e le superfici vetrate.
Montanti	- Distorsione del montante in direzione dello spostamento imposto con valori di snervamento pari a 400 MPa; - Distacco tra montante e traverso e conseguente espulsione del vetro dal telaio.
Traversi	- Sforzo di compressione nelle regioni esterne del traverso a causa del contatto rigido tra montanti e traversi che porta ad un distacco degli stessi.
Vetri	- Valori di stress che identificano la fase di fessurazione e conseguente rottura della superficie vetrata, i cui valori di stress sono pari a 155 MPa.

Come mostrato all'interno dell'Allegato 10, il comportamento dinamico del sistema facciata subisce valori di picco quasi 100 volte superiori alla fase di snervamento, arrivando ad uno stress di circa 20000 MPa.

Da questa considerazione, si ritiene che le analisi condotte non possano considerarsi congruenti con i valori nominali che sono risultati dalle analisi sviluppate per i singoli elementi del sistema.

Per questo motivo, risulta necessario mettere in discussione i parametri impostati sul software. Ciò può avvenire in ottemperanza alle fasi di testing che, come espresso nel paragrafo precedente, dovranno essere condotte.

Dalla discussione dei risultati ottenuti dalle analisi lineari "processate", è emerso come i limiti legati a software non convenzionali utilizzati soprattutto per lo svolgimento di analisi agli elementi finiti di sistemi non-strutturali non siano ancora in grado di simulare il comportamento reale del sistema sollecitato.

La semplificazione degli elementi e il feedback continuo con gli sviluppatori del software ha come fine ultimo l'implementazione delle performance dello stesso affinché sia in grado di analizzare i sistemi di facciata.

In conclusione, si ritiene opportuno dichiarare che la metodologia adottata, ai fini dello sviluppo delle analisi, può essere applicata e replicata per qualsiasi tipologia di facciata, tenendo conto delle specifiche tecniche, dimensionali, materiche e di funzionamento che costituiscono il caso studio da valutare. Di fatti, la modellazione del secondo Mock-Up – ovvero con montante ad asse spezzato – è avvenuta seguendo gli step del tool metodologico sviluppato per il primo Mock-Up (Cfr. Allegato 6). Per i motivi sopracitati, i risultati delle analisi lineari per il secondo Mock-Up e le analisi dinamiche non lineari su entrambi i Mock-Up costituiranno parte delle fasi successive alla ricerca in modo analogo alle attività di testing. La fase di verifica persegue con la trattazione degli step che costituiscono la fase di simulazione "dal vero".

6.4 Protocolli di Testing presso la sezione TCLab del Building Future Lab

Prima di trattare le attività di testing – e come è avvenuto nel caso del software di simulazione (Cfr. Paragrafo 4.4) –, risulta necessario fare un passo indietro, riservando la trattazione del presente paragrafo all'introduzione delle strumentazioni e attrezzature che costituiscono il laboratorio di prova, al fine di comprendere in maggiore misura le azioni di testing – che vengono effettuate all'interno dello stesso – e come queste incidano notevolmente sui processi di innovazione che investono l'involucro edilizio.

Il TCLab rappresenta una delle sezioni del Building Future Lab, BFL²⁸ e un laboratorio di ricerca permanente²⁹, istituito presso il Dipartimento di Architettura e Territorio, *DARTe*, all'interno dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria [Trombetta & Milardi, 2015].

Il laboratorio basa la propria attività su prove standardizzate e sperimentali³⁰, aventi per oggetto l'involucro nei suoi assetti tecnologici e materiali valutandone le relative prestazioni. Nel settore edilizio, l'innovazione tecnologica si presenta come un rilevante fattore di sostegno alla ricerca progettuale, con processi, prodotti e tecniche capaci di incidere sulla qualità e realizzazione dei manufatti. Di fatti, nel corso della presente ricerca, è emerso come il focus degli attuali studi scientifici sia incentrato sull'evoluzione dell'involucro edilizio – inteso quale "*sistema in grado di reagire ai macro-fenomeni ambientali-climatici esterni*" [Lucarelli et al., 2020] – e come i maggiori sforzi siano legati ad un aumento delle funzionalità prestazionali dello stesso. Secondo recenti rapporti, infatti, il settore produttivo sta puntando verso un'innovazione sempre più evoluta che mira a involucri frutto di *modellizzazioni, testing e customizing* migliorativi. In questo senso, grande attenzione viene posta sugli strumenti che consentono di verificare il comportamento di tali innovazioni sull'involucro, facendo progredire la ricerca verso la funzionalizzazione evoluta non solo del *sistema tecnologico* ma anche degli *strumenti di misurazione e valutazione*.

Come ormai acclarato, il momento congiunturale che si sta affrontando fonda le sue radici sul *carattere predittivo del processo progettuale*, al fine di introdurre sul mercato prodotti che siano "misurabilmente³¹" innovativi.

Questa innovazione, infatti, è fortemente legata alla sperimentazione in laboratorio attraverso le attività di testing ed è proprio per questo che il ruolo degli *strumenti di rilevazione fenomenologica* e, soprattutto, dei centri che svolgono attività di testing assumono particolare rilevanza e richiedono nuove modalità e attrezzature in grado di essere sempre in linea con gli aspetti tracciati dall'innovazione [Trombetta et al., 2022].

Infine, è emerso come le innovazioni provenienti dai risultati delle ricerche scientifiche siano stati inglobate anche dalle prescrizioni normative (Cfr. Paragrafo 4.1). Con particolare riferimento all'involucro edilizio, queste prescrizioni riguardano le procedure di prova che devono essere effettuate al fine di poter valutare le prestazioni dell'intero sistema.



È in questo scenario di "strumenti di misurazione e valutazione" che si colloca la sezione del TCLab, le cui attività riguardano la "simulazione dal vero"³² del comportamento degli involucri [Lucarelli et al., 2020b], sia in condizioni di servizio che di sicurezza, attraverso procedure di prova, *distruttive e/o non distruttive*, condotte su modelli in scala reale, *Physical Mock-Up*.

Ciò può avvenire adottando due modalità di approccio differenti: certificazione e sperimentazione. La prima, *in ambito di certificazione*, avviene eseguendo prove standardizzate, ovvero seguendo i protocolli normativi. Le strumentazioni e attrezzature di base³³ del laboratorio sono certificate per la conduzione di prove in linea con gli standard europei – *UNI EN 13830 Curtain Walling. Product Standard* – e gli standard americani³⁴ *ASTM – American Society for Testing and Materials International* – e *AAMA - American Architectural Manufacturers Association*.

Il secondo approccio avviene *in campo sperimentale*, ovvero mettendo in atto, attraverso le strumentazioni a disposizione del laboratorio, nuovi *ciclogrammi di test* al fine di valutare non solo, in modo sperimentale, i *Mock-Up* ma intendendo le procedure come possibili *upgrade* dei protocolli normativi attraverso un approccio *tailor made*, basato su un iter operativo costituito da interlocuzioni e feedback con lo staff degli esperti esterni.

Al fine di adottare questi due approcci, il laboratorio è dotato di due grandi attrezzature:

- una "Camera di Prova", *Test Lab*;
- una "Cella" di Simulazione Climatica per test accelerati indoor e outdoor, *Test Cell*.

Ai fini degli obiettivi della presente ricerca, l'attenzione viene posta sull'assetto tecnologico e prestazionale del *Test Lab*. Si rimanda ad altri testi scientifici per le specifiche descrittive della *Test Cell* [Cfr. Trombetta et al., 2022].

Nello specifico il *Test Lab* è una "camera di prova" (Fig. 11), realizzata secondo le caratteristiche di funzionamento stabilite dalle prove da effettuare. Nello specifico sono state condotte esperienze di test su facciate e involucri, che riguardano prove di:

- permeabilità all'aria, in regime statico [ASTM E 283-04(2012), UNI EN 12153:2002];
- tenuta all'acqua, in regime statico [ASTM E 331-00 (2009), UNI EN 12155:2002] e dinamico [AAMA 501.1-17 (2017), UNI EN 13050:2011];
- resistenza al carico del vento e carico permanente [ASTM 330-02 (2010), UNI EN 12179:2002];
- resistenza all'urto [ASTM E 303-22 (2022), EN 13036-4:2011];
- resistenza alle azioni sismiche su elementi non strutturali sugli assi x-y-z, sia in regime statico [AAMA 501.4-09 (2009), UNI EN 13830:2015] che dinamico [AAMA 501.6-09 (2009), non regolamentato dallo standard europeo].

L'assetto strutturale del *Test Lab* è definito da un'intelaiatura in acciaio di dimensione 15.000 (altezza) x 13.720 (larghezza) x 2.500 (profondità) mm, costituito da due campate – *Test Lab* destro e *Test Lab* sinistro – dove vengono alloggiati i *Mock-Up* in scala 1:1, di facciate continue e serramenti, al fine di testarli a seconda dell'approccio sopra descritto. Per la messa in atto delle procedure di prova, il *Test Lab* è formato da un impianto di aria, acqua, vento, AAV (pressione-depressione), pannelli sandwich in poliuretano espanso di tamponamento³⁵, una camera termica e infine travi sismiche e mobili. Le 8 travi ricoprono un ruolo strategico poiché simulano i solai degli edifici e si dividono in 6 travi mobili – tre per campata – e 2 travi fisse che corrispondono alle travi sismiche – una per campata. L'assetto dimensionale del *Test Lab* consente di testare *Mock-Up* le cui dimensioni massime possono corrispondere a 14.000 x 12.000 mm, ovvero circa 170 mq per un peso massimo di 130 kg/mq.

Ciò denota la capacità della camera di prova ad accogliere le sempre maggiori richieste di installare provini di grandi dimensioni, *jumbo-size*.

Definito l'assetto tipo-tecnologico del *Test Lab*, l'attenzione si rivolge verso le attrezzature di base che consentono la messa in opera dei protocolli normati europei e americani. Il *Test Lab* è dotato di laser per la misurazione delle deflessioni frontali durante le prove di resi-

Fig. 11. Camera di prova *Test Lab* presso la sezione TCLab del Building Future Lab (Reggio Calabria)

stenza al carico da vento e di un impianto sprinkler (Fig. 11) il cui scopo è di generare un film di acqua uniforme sulla superficie del provino con spruzzi di diverse intensità, in conformità con le portate richieste dalla normativa UNI e ASTM, e per durate variabili.



Fig. 11. Impianto griglia sprinkler progettato secondo normative UNI - AAMA presso la sezione TCLab del Building Future Lab (Reggio Calabria)

Le strumentazioni, messe a disposizione, non riguardano invece strumenti di misurazione per gli effetti subiti dall'involucro per gli stress sismici. La rilevazione delle performance ottenute, infatti, è di tipo visivo, riguarda cioè la presa visione di danni e/o rotture dei singoli elementi dei sistemi di facciata.

In questo senso, il dialogo sinergico con l'azienda partner, Altair Software and Services SL – che sviluppa software di simulazione – potrebbe essere definito come uno step di *upgrade*, identificando la necessità di sviluppare strumenti di lettura e controllo che siano in grado di rilevare numericamente gli stati limite di esercizio e di danno dei singoli elementi sollecitati durante le attività di testing. In conclusione, la disamina condotta non vuole intendersi come una descrizione fine a sé stessa delle caratteristiche che identificano la sezione del TCLab, bensì intende ritenersi come una premessa che permette di aprire lo scenario della ricerca verso la seconda fase di verifica, l'attività testing, riprendendo così il filo conduttore della sperimentazione.

Nella trattazione del seguente capitolo, infatti, l'attenzione viene posta sul secondo step della fase di verifica, andando ad identificare, secondo la lettura di "*simulazione dal vero*", gli elementi critici dell'involucro edilizio soggetto a stress in condizioni di servizio e di sicurezza. L'attenzione viene posta sul *Method Statement* come documento di avvio per la fase di testing, di fatti, la redazione del metodo di prova, delineata con il supporto dell'azienda

Ponzio e sviluppata con la sezione TCLab, definisce le procedure di prova che devono essere condotte su entrambi i Mock-Up per la verifica delle prestazioni attuali del sistema di facciata convenzionale.

6.5 Il metodo di prova e le attività di Testing del sistema facciata convenzionale presso il Test Lab

Entrando nel focus della fase sperimentale, il presente paragrafo è incentrato sulla discussione delle *attività di testing* presso la sezione TCLab del BFL, precedentemente descritta. La fase di sperimentazione e il suo carattere industriale hanno come obiettivo quello di delineare gli step utili all'adozione di un approccio corretto per la progettazione dei sistemi di facciata a-sismici. Nel corso della trattazione della tesi dottorale, infatti, più volte è emerso come la progettazione debba rispondere al carattere "*predittivo*", attraverso una conoscenza approfondita del comportamento dinamico che il sistema assume durante gli stress sismici, tenendo conto delle variabili messe in atto per il dato sistema.

Questa conoscenza, soprattutto nel caso di una tematica complessa quale il comportamento sismico dei sistemi di facciata – costituiti da diversi componenti prodotti con materiali differenti e le cui proprietà meccaniche sono talvolta agli antipodi – può essere raggiunta solo con verifiche accurate e affidabili.

In questo senso, la fase di testing viene intesa come imprescindibile e riconosciuta, sia in ambito scientifico che normativo, poiché può condurre le sperimentazioni verso risultati che si riverberano da un lato all'*upgrade* del processo di progettazione, dall'altro all'implementazione delle funzionalità dei software utilizzati per lo sviluppo delle analisi agli elementi finiti, FEA. Riportando la trattazione sulle attività di testing – che s'intendono condurre all'interno del Test Lab – l'attenzione si focalizza sulle performance da valutare in questo specifico step di verifica. Di fatti, il laboratorio – disponendo di strumentazioni e attrezzature conformi alle prescrizioni normative – può condurre ciclogrammi di testing completi. "*La facciata continua viene solitamente sottoposta a prove di infiltrazione di aria e acqua fino all'integrità strutturale attraverso una maggiorazione pari al 150% del carico del vento di progetto*" [McFarquhar, 2011]. Questi test vengono condotti al fine di verificare che il sistema di facciata sia in grado di supportare, nel suo ciclo di vita, azioni che possono indurre a danni permanenti, interrompendo la funzionalità del sistema involucro e di conseguenza dell'intero edificio.

In linea con quanto espresso, la ricerca si propone di mettere in atto protocolli di testing afferendo alle linee guida degli standard europei e americani per valutare il comportamento del sistema di facciata convenzionale sia in condizioni di servizio che di sicurezza.

Grande attenzione è stata posta allo studio e al confronto tra le prescrizioni normative, europee e americane, per i protocolli di testing, al fine di delineare, da un lato, le attività che s'intendono condurre per la valutazione delle performance del sistema di facciata, dall'altro, di identificare la metodologia con la quale i test saranno condotti. Quest'ultima fase è stata condotta grazie al dialogo sinergico tra l'azienda Ponzio s.r.l. e la sezione TCLab e orientata verso lo sviluppo della metodologia di prova, Method Statement, oggetto del seguente paragrafo.

6.5.1 Il Method Statement dei Physical Mock-Up

Come emerso nel paragrafo precedente le attività riconducibili alla definizione della metodologia di prova hanno riguardato lo studio e il confronto tra le prescrizioni normative europee e americane per la valutazione delle performance dei sistemi di facciata continua. Il focus della ricerca è incentrato sull'indagine del comportamento dinamico degli involucri edilizi sottoposti agli stress sismici. Per questo motivo, grande attenzione è stata posta sulla normativa di settore per le azioni sismiche.

Come ormai acclarato, le recenti disposizioni in materia di progettazione sismica richiedono che "i componenti architettonici non strutturali siano progettati per resistere agli effetti dei terremoti" [Behr, 2009; FEMA E-74, 2011; UNI EN 1998:2003, UNI EN 13830:2015].

In ambito di test, la norma UNI EN 13830:2015 specifica le caratteristiche dei "kit" per facciate continue anche in relazione alle performance sismiche, alle condizioni di servizio e ai limiti di sicurezza richiesti. Il sistema di facciate deve essere sottoposto a spostamento orizzontale in piano, cosiddetto, di rottura, identificando in questo modo le procedure per la conduzione del "test statico". Questa procedura di prova prevede che vengono condotte una sequenza di test, tra cui prove di permeabilità all'aria, tenuta all'acqua e di resistenza al carico del vento, per verificare sia la capacità di servizio che gli stati limite ultimi.

Diversamente, l'American Architectural Manufacturers Association, AAMA, ha recepito le disposizioni sismiche raccomandate dal National Earthquake Hazards Reduction Program, NEHRP [2000], fornendo linee guida per i test da condurre sui Mock-Up attraverso due procedure di prova:

- AAMA 501.4-00, per determinare il comportamento allo stato limite di servizio dei sistemi di chiusura verticale;
- AAMA 501.6-01, per determinare il comportamento allo stato limite ultimo sismico rispetto le performance degli elementi vetrati.

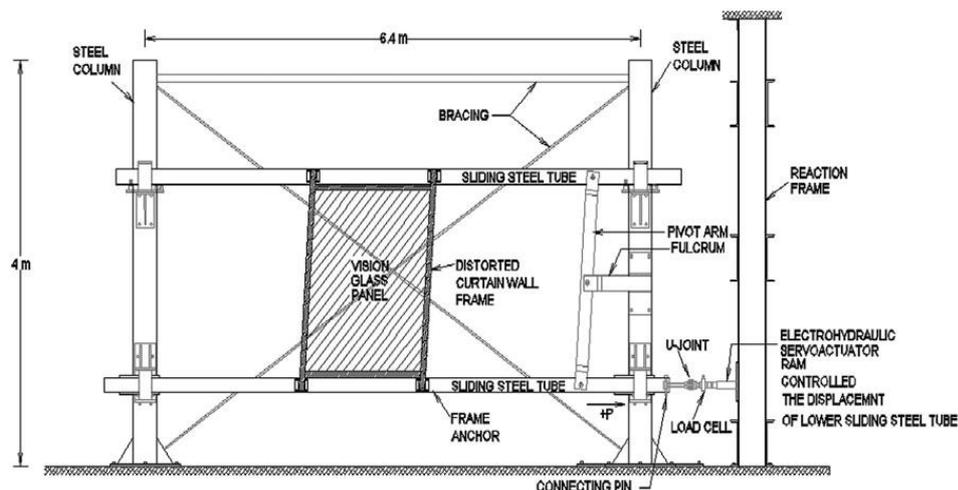


Fig. 13. Schema dell'impianto di prova con alloggiamento del provino. (Source: Memari et al., 2003)

In particolare, la norma AAMA 501.4-00 consente di determinare la prestazione delle facciate continue in presenza di spostamenti di rottura in piano, "essendo lo spostamento di progetto pari al 10% dell'altezza maggiore del piano adiacente" [Aiello et al., 2018].

L'obiettivo di questo metodo di prova è quello di valutare principalmente i cambiamenti nella funzionalità dei Mock-Up per i sistemi di facciata, come risultato degli spostamenti orizzontali applicati staticamente sul piano. Di conseguenza, è possibile valutare l'idoneità della facciata continua attraverso i criteri *pass/fail* previsti per tre diversi tipi di strutture: essenziali, ad alta occupazione e ad occupazione standard.

Inoltre, i vari requisiti per ciascuna di esse sono correlati ai diversi *Performance Level* identificati sia nelle Disposizioni NEHRP [1997] che nella FEMA 273 [2002]. Rispetto la metodologia di prova, la norma richiede l'applicazione di almeno *tre cicli di spostamento al provino*; tuttavia, non fornisce alcuna informazione su come determinare o calcolare le diverse ampiezze di movimento da applicare o sul requisito minimo della durata del test.

Queste decisioni vengono demandate, secondo la normativa, al "Test Agency" ovvero all'ente che certifica le attività di testing. L'unico requisito è che il test deve essere condotto "abbastanza lentamente" da evitare qualsiasi accelerazione o decelerazione. Per verificare lo stato limite di servizio, prima e dopo la prova di spostamento statico devono essere condotte almeno le *prove di tenuta all'aria* e di *penetrazione dell'acqua*. Questa metodologia è stata ripresa e in parte inglobata dalla normativa europea sopracitata [UNI EN 13830:2015]. L'AAMA 501.6-01 è intesa come una norma di complemento rispetto l'AAMA 501.4-00 e permette di determinare il cosiddetto $\Delta fallout$, ovvero "lo spostamento sismico relativo (drift) che causa l'espulsione del vetro dalla facciata continua". Questo metodo di prova, "Crescendo Test", è stato introdotto da Behr e Belarbi [1995] e ha permesso di strutturare la normativa tutt'ora utilizzata in modo frequente per determinare il comportamento dinamico dei sistemi di facciata (Fig. 13).

Nello specifico, questa determinazione sperimentale è richiesta dal NEHRP, nel caso specifico in cui non sia stato previsto uno spazio sufficiente tra il bordo di un pannello di vetro e lo spazio del telaio in alluminio per l'innesto dell'elemento vetrato [Cfr. Sucuoglu, Valabhan, 1997] per evitare il contatto critico vetro-telaio durante lo spostamento sismico.

Il "Crescendo Test", consiste in una serie concatenata di intervalli quali "rampa di salita" e di intervalli di "ampiezza costante". Gli intervalli di rampa e di ampiezza costante sono costituiti da quattro *cicli sinusoidali* ciascuno. In questo modo il campione viene sottoposto a spostamenti sull'asse orizzontale di piano con valori in positivo e negativo e con movimenti sinusoidali ad ampiezze di rampa gradualmente e progressivamente maggiori. Nella seguente Figura 14 è riportata l'intera storia temporale di deriva, "inter-story drift", di una prova in crescendo. La norma definisce con precisione sia la metodologia di prova con cui dove essere condotto il test sia la soglia accettabile per la determinazione del $\Delta fallout$ ³⁶.

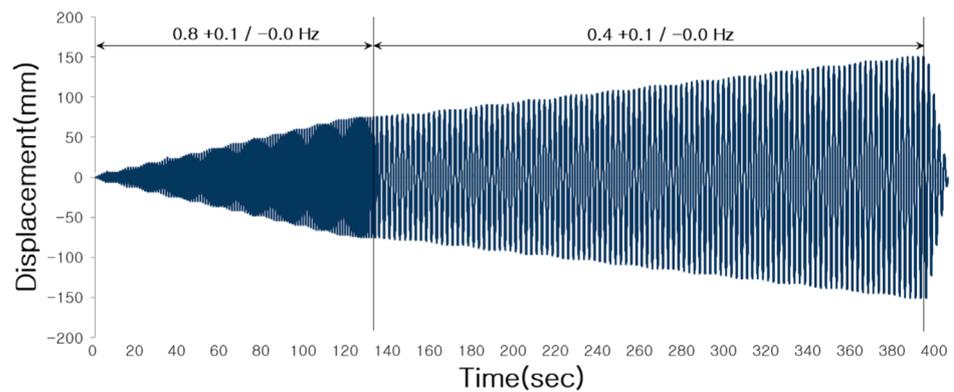


Fig. 14. Inter-Story Drift, normativa AAMA 501.6. (Source: Lee et al., 2021)

Con queste metodologie di prova vengono definiti diversi livelli di performance classificati in base al comportamento dell'elemento fragile, inteso come componenti più critico a resistere alle sollecitazioni sismiche. Nello specifico, questi livelli riguardano:

- la capacità del vetro di rimanere intatto all'interno del telaio, ovvero non subire spostamenti che lo possano portare e fessurazione e/o rottura (I Livello);
- la possibile fessurazione del vetro nelle regioni angolari della superficie senza la conseguente espulsione dal telaio (II Livello);
- la completa rottura del vetro senza espulsione del telaio seppur in condizioni precarie (III Livello);

- espulsione dal telaio del vetro con conseguente caduta, in frammenti – schegge – pannelli interi, che vengono identificati come *flying debris* (IV Livello).

Per cui, si desume che i primi due livelli di performance sono legati alle condizioni di servizio, prevedendo l'occupazione immediata dell'edificio successivamente all'evento sismico. Di contro, i livelli III e IV sono rivolti alle condizioni di sicurezza della vita. In questo quadro emerge l'esigenza di valutare attentamente il comportamento dei sistemi di facciata servendosi delle prescrizioni che sono state messe in atto all'interno della normativa.

La disamina condotta ha come fine ultimo l'identificazione delle possibili procedure di prova da condurre all'interno del Test Lab.

Se nella fase di simulazioni, le analisi sono state condotte per le condizioni di sicurezza³⁷ – simulando gli spostamenti che vengono imposti per le procedure normate degli stress sismici – nel caso dei test di laboratorio, i provini verranno sollecitati rispettivamente per le condizioni di servizio – rispetto le normative europee sulla permeabilità all'aria, acqua e vento –, ma anche in condizioni di sicurezza, seguendo la normativa europea UNI EN 13830:2015 e americana AAMA 501.6-09 "*Recommended Dynamic Test Method for Determining the Seismic Drift Causing Glass Fallout from a Wall System*".

La scelta di rifarsi alla normativa americana è giustificata dal fatto che, come emerso, in ambito europeo non ci sono di fatto protocolli di testing che postulano il comportamento sismico dinamico, in "*crescendo*". Per questo motivo e grazie alla flessibilità della sezione TCLab – le cui attrezzature consentono di riprodurre le normative internazionali – il test distruttivo sarà eseguito adottando le indicazioni riportate all'interno della normativa AAMA 501.6-09. Per maggiore chiarezza, la Tabella 4, riporta in modo puntuale le procedure dei test che s'intendono adottare per le attività di testing. Infine, l'Allegato 11, contiene il Method Statement redatto grazie alla collaborazione con la sezione TCLab del Building Future Lab e con il supporto dell'azienda Ponzio s.r.l.

Tabella 4. Method Statement dei Physical Mock-Up

Permeabilità all'aria	UNI EN 12153:2002
Tenuta all'acqua in regime statico	UNI EN 12155:2002
Resistenza al carico del vento	UNI EN 12179:2002
Racking test	UNI EN 13830:2015
Ripetizioni: – permeabilità all'aria; – tenuta all'acqua sotto pressione statica	UNI EN 12153:2002 UNI EN 12155:2002
Prova di Resistenza al carico del vento – sicurezza 150%	UNI EN 12179:2002
Crescendo Test	AAMA 501.6-01

6.5.2 Il report tecnico di prova

Definito il Method Statement per le procedure di prova, la fase di verifica si orienta verso le attività di testing. Tali attività vengono intese come uno degli step successivi della ricerca delineandosi come "*sviluppi futuri*", meglio esplicitati nella parte conclusiva della tesi dottorale.

Tuttavia, l'esperienza condotta all'interno della sezione TCLab del BFL ha riguardato la partecipazione attiva rispetto al ruolo di assistente tecnico per la conduzione di alcuni test svolti su diverse tipologie di sistemi di facciate continue per prove sperimentali e in ambito di certificazione. Le esperienze condotte hanno portato al conseguimento delle conoscen-

ze tecniche di base per procedure di prova normate – secondo i protocolli europei e americani – e alla costruzione del background scientifico, rispetto ai processi di testing per la valutazione prestazionale dei sistemi di involucro edilizio in ambiente simulato.

Le competenze acquisite hanno, quindi, consentito di perseguire la ricerca verso la redazione del *report tecnico di prova* – inteso come uno degli *output finali* per il raggiungimento degli obiettivi specifici della fase sperimentale della ricerca – ipotizzando il comportamento reale dei Mock-Up assoggettati a stress. Prima di avviare la trattazione, risulta necessario porre l'attenzione sulla metodologia adottata, al fine di espletare il processo che ha condotto la ricerca verso la costruzione del report di prova. In questo processo, sono stati individuati due casi studio di riferimento identificandosi come *benchmarking*, ovvero come indicatori chiave interni ed esterni – rispetto la sezione del TCLab – il cui scopo riguarda l'ipotesi del possibile comportamento del caso sperimentale – sollecitato nelle condizioni di servizio e sicurezza. Tali benchmarking concernono:

- il *primo caso studio*, che costituisce il riferimento per gli indicatori esterni relativo ai risultati ottenuti dalle procedure di prova condotte e certificate, per le condizioni di servizio in ambito normativo europeo, sulla tipologia di facciata "WS50 PG Curtain Wall" all'interno del banco di prova dell'azienda Ponzio s.r.l.;

- il *secondo caso studio*, che costituisce il riferimento per gli indicatori interni relativo ai risultati ottenuti dalle procedure di prova condotte e certificate, per le condizioni di servizio e sicurezza in ambito normativo americano, su una tipologia di facciata continua di tipo *Stick System*³⁸ – equiparabile ai Mock-Up sperimentali – testata all'interno della sezione TCLab del BFL.

Come si evince dalla Tabella 5, i due casi studio e di conseguenza gli indicatori derivanti fanno riferimento a due procedure di prova differenti, identificate dai protocolli europei – per il caso studio 1 – e americani – per il caso studio 2.

Tabella 5. Method Statement dei casi studio di riferimento e il caso sperimentale

Tipologia di test	Normativa di riferimento		
	Caso Studio 1	Caso studio 2	Caso sperimentale
Permeabilità all'aria	UNI EN 12153:2002	ASTM 283-04 (2012)	UNI EN 12153:2002
Tenuta all'acqua in regime statico	UNI EN 12155:2002	ASTM E 331-00 (2009)	UNI EN 12155:2002
Resistenza al carico del vento	UNI EN 12179:2002	ASTM E 330-02 (2010)	UNI EN 12179:2002
Racking test	–	AAMA 501.4.00	UNI EN 13830:2015
Ripetizioni: – permeabilità all'aria; – tenuta all'acqua sotto pressione statica	UNI EN 12153:2002 UNI EN 12155:2002	ASTM 283-04 (2012) ASTM E 331-00 (2009)	UNI EN 12153:2002 UNI EN 12155:2002
Prova di Resistenza al carico del vento – sicurezza 150%	UNI EN 12179:2002	ASTM E 330-02 (2010)	UNI EN 12179:2002
Crescendo Test	–	AAMA 501.6-01	AAMA 501.6-01

Ciò consente, quindi, non solo di ipotizzare il comportamento dei Mock-Up, progettati per la fase sperimentale della ricerca, ma anche di individuare le principali differenze tra le procedure di prova condotte secondo i protocolli normativi europei e americani e di conseguenza delineare il processo metodologico che viene attuato per la conduzione dei test sugli involucri edilizi, attenzionando gli aspetti sismici legati ai sistemi di facciata convenzionali prodotti nel mercato italiano.

Da questi assunti, il report tecnico si struttura seguendo la sequenza delle prove – precedentemente definite all'interno del Method Statement (Cfr. Allegato 5) – e in linea con la struttura dei report tecnici redatti dai laboratori specializzati sugli involucri edilizi in ambito di certificazione. Nello specifico, per le prove di *permeabilità all'aria, acqua e vento*, il report tecnico verte sulla comparazione del comportamento dei due casi studio di riferimento – i cui risultati vengono identificati come *benchmarking* – sollecitati rispettivamente secondo la normativa europea e americana. Il report tecnico di tali prove sarà costituito in tre parti:

- la trattazione dei test condotti all'interno del banco di prova dell'azienda Ponzio s.r.l, tramite procedure di prova secondo gli standard europei;
- la trattazione dei test condotti all'interno della sezione TCLab, tramite procedure di prova secondo gli standard americani;
- il confronto delle due metodologie di prova messe in atto unitamente all'ipotesi del comportamento dei Mock-Up progettati per la fase sperimentale della ricerca e oggetto di verifica.

Diversamente, per i test sismici, in regime statico e dinamico, i *benchmarking* saranno costituiti dai risultati ottenuti dalle attività condotte presso la sezione TCLab del BFL, afferendo alle procedure di prova in ambito normativo americano. Di conseguenza, il report sarà costituito in due parti:

- la trattazione dei test condotti all'interno della sezione TCLab tramite procedure di prova secondo gli standard americani;
- l'ipotesi del comportamento dei Mock-Up progettati per la fase sperimentale della ricerca e oggetto di verifica

Definito il processo metodologico che costituisce la struttura del report tecnico di prova, la trattazione persegue sulla discussione dei test condotti per i casi studio e sull'ipotesi dei risultati che saranno ottenuti dai test da condurre per la fase sperimentale all'interno della sezione del TCLab.

Permeabilità all'aria

Rispetto ai *benchmarking esterni*, ovvero ai risultati ottenuti dai test condotti presso il banco di prova dell'azienda Ponzio, la prova di permeabilità all'aria è stata eseguita secondo il metodo di prova postulato all'interno della normativa UNI EN 12153:2002 – per il sistema di facciata continua – e a quello della normativa UNI EN 1026:2000 – per gli apribili.

Il *principio di prova* consiste nell'applicazione di fasi di pressione incrementale e decrescente, positiva e negativa, al fine di determinare la permeabilità all'aria della facciata continua, sia nelle parti fisse che nelle parti apribili, in cui il valore massimo della pressione è stato stabilito pari a 660 Pa.

I risultati sono stati espressi in conformità al § 8.4 della norma EN 12153:2000 e, ai fini della classificazione, ai § 4 e 6 della norma EN 12152:2002, con riferimento alla EN 1026:2000 e ai fini della classificazione ai § 4.4 e 4.5 della norma EN 12207:1999 per gli apribili presenti. In corrispondenza di ciascuna pressione di prova viene determinata la permeabilità all'aria per la parte fissa (Q_f) e per i giunti apribili (Q_j), espressa in metri cubi all'ora (m^3/h), nel rispetto delle relazioni:

- parte fissa: $Q_f = Q_{fc} - Q_c$

- parte apribile: $Q_j = Q_{tc} - Q_{fc}$

dove Q_c è il flusso d'aria nella camera di prova, escluso l'effetto del Mock-Up, Q_{fc} è il flusso

d'aria nella camera di prova, misurato con i giunti apribili sigillati, Q_{tc} è il flusso d'aria nella camera di prova, misurato con i giunti apribili non sigillati.

Per determinare i valori sopra espressi la norma postula la determinazione dell'area totale del Mock-Up (A) e le lunghezze dei giunti apribili (L_o) e dei giunti fissi (L_f). Infine, la permeabilità all'aria viene calcolata per unità di area dei pannelli fissi (Q_f/A) e per lunghezza unitaria del giunto fisso (Q_f/L_f), rispettivamente espresse in m^3/m^2h e in m^3/mh , e rappresentate graficamente in corrispondenza alle varie pressioni di prova, con correzione dei valori ottenuti (V_x) in base ai valori effettivi di temperatura T_x (espressa in °C) e di pressione atmosferica (espressa in kPa), al fine di ricavare il flusso d'aria (V_o) in condizioni normali (con $T_o = 293$ K e $P_o = 101,3$ kPa), secondo la formula:

$$V_o = V_x \times \frac{293}{273 + T_x} \times \frac{P_x}{101,3}$$

Per la classificazione dell'intero campione sottoposto a prova in base ai risultati dei test condotti a pressione positiva e negativa, si è considerata l'appartenenza alla specifica classe del campione di facciata continua quando la permeabilità all'aria ottenuta non supera il limite superiore fissato (Cfr. § 4 e 6 della norma EN 12152:2002) per quella classe per tutti i livelli di pressione di prova intermedi e per il valore massimo stabilito. Tali valori vengono riportati all'interno delle Tabelle 6 e 7.

Tabella 6. Facciate continue - classi di permeabilità all'aria per unità di area dei pannelli fissi

Pressione massima Pmax (Pa)	Permeabilità all'aria m^3/m^2h	Classe
150	1,5	A1
300	1,5	A2
450	1,5	A3
600	1,5	A4
<600	1,5	AE

Nota: i campioni che lasciano passare > 1,5 m^3/m^2h di aria alle pressioni < 150 Pa non possono essere classificati; quelli che lasciano passare < 1,5 m^3/m^2h di aria alle pressioni > 600 Pa sono classificati come E (eccezionale).

Tabella 7. Facciate continue - classi di permeabilità all'aria per lunghezza unitaria del giunto fisso

Pressione massima Pmax (Pa)	Permeabilità all'aria m^3/mh	Classe
150	0,5	A1
300	0,5	A2
450	0,5	A3
600	0,5	A4
<600	0,5	AE

Nota: i campioni che lasciano passare > 0,5 m^3/mh di aria alle pressioni < 150 Pa non possono essere classificati; quelli che lasciano passare < 0,5 m^3/mh di aria alle pressioni > 600 Pa sono classificati come E (eccezionale).

Per la classificazione delle parti apribili inserite all'interno del campione, in base ai risultati dei test condotti a pressione positiva e negativa, si è considerata l'appartenenza alla specifica classe (Cfr. § 4.4 e 4.5 della norma EN 12207: 1999) quando la permeabilità all'aria ottenuta non supera il limite superiore fissato – come riportato all'interno della Tabella 8 – per quella classe per tutti i livelli di pressione di prova fino al valore massimo.

Tabella 8. Apribili inseriti nel campione - Classi di permeabilità all'aria per unità di area e per lunghezza dei giunti apribili secondo UNI EN 12207:1999

Classe	Pressione massima di prova Pmax (Pa)	Perdita massima ammessa riferita all'aria del serramento in m ³ /m ² h (a 100 Pa)	Perdita massima ammessa riferita alla lunghezza dei giunti apribili in m ³ /mh (a 100 Pa)
0	–	–	-
1	150	50	12,50
2	300	27	6,75
3	600	9	2,25
4	600	3	0,75

Il campione sottoposto a prova di permeabilità all'aria a pressione positiva e negativa è stato classificato in *classe AE660*³⁹ (relativamente ai giunti fissi e alla superficie totale).

Rispetto ai *benchmarking interni*, ovvero ai risultati ottenuti dai test condotti presso la sezione, TCLab, la prova di permeabilità all'aria è stata eseguita in conformità della normativa americana ASTM 283-04 (2012), il cui *principio di prova* consiste nella misurazione della permeabilità all'aria del campione, sottoposto a pressioni differenziali positive e negative al fine di determinare la permeabilità all'aria della facciata continua, sia nelle parti fisse che nelle parti apribili, in cui il valore massimo della pressione è stato stabilito pari a 300Pa.

I risultati sono stati espressi in conformità al § 12 della norma ASTM 283-04 (2012) in cui vengono determinati la perdita d'aria Q_s (ft³/min) attraverso il flusso d'aria totale, Q_t , e la perdita estranea, Q_e , secondo la seguente equazione:

$$Q_s = Q_t - Q_e$$

Il flusso d'aria totale Q_t e la perdita estranea, Q_e , sono espressi in termini di flusso alle condizioni standard, Q_{st} , utilizzando le seguenti equazioni:

$$Q_{st} = Q \left(\frac{W}{W_s} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$W = 3,485 \times 10^{-3} \left(\frac{B}{T+273} \right)$$

dove:

Q = flusso d'aria in condizioni non standard, L/s (ft³/min)

Q_{st} = flusso d'aria corretto alle condizioni standard, L/s (ft³/min)

W_s = densità dell'aria alle condizioni standard di riferimento-1,202 kg/m³ (0,075 lb/ft³),

W = densità dell'aria nel sito di prova, kg/m³ (lb/ft³),

B = pressione barometrica nel sito di prova corretta per la temperatura, Pa

T = temperatura dell'aria al flussimetro, °C (°F).

Infine, la permeabilità all'aria viene calcolata per unità di area q_a e per lunghezza unitaria del giunto q_l rispettivamente espresse in ft³/min ft² e in ft³/min ft

Per la classificazione dell'intero campione sottoposto a prova, in base ai risultati dei test condotti a pressione positiva e negativa, sono stati considerati i limiti prestazionali imposti dalla norma di riferimento pari a 0,06 ft³/min. Per la classificazione delle parti apribili inserite all'interno del campione, in base ai risultati dei test condotti a pressione positiva e negativa, sono stati considerati i limiti prestazionali imposti dalla norma di riferimento pari a 0,10 ft³/min. Il valore numerico di tali limiti è strettamente dipendente dalle dimensioni del Mock-Up sottoposto a prova e può essere ulteriormente definito dall'ente che emette la certificazione.

La prova di permeabilità all'aria, condotta sul provino, a pressione positiva e negativa è risultata inferiore al limite indicato dalla norma sia rispetto alle parti fissi che ai giunti apribili.

Dai test condotti per i benchmarking di riferimento, la *prova di permeabilità all'aria*, sia afferendo alle procedure europee che americane, è stata condotta secondo la seguente sequenza:

- prova a pressione positiva – parte fissa (sigillatura dei giunti fissi);
- prova a pressione negativa – parte fissa (sigillatura dei giunti fissi);
- prova a pressione positiva – Mock-Up completo (rimozione sigillatura);
- prova a pressione negativa – parte fissa (rimozione sigillatura).

Diversamente dalla sequenza di prova postulata all'interno della normativa europea di riferimento EN 12153:2000 – che prevede pulsazioni di pressione d'aria crescenti per la classificazione della permeabilità d'aria (Cfr. Tabelle 6 – 7 – 8) – la normativa americana ASTM 283-04 (2012) prevede uno step singolo alla pressione stabilita in positivo e successivamente in negativo, imponendo i limiti prestazionali che il Mock-Up deve asseverare. Dalle attività di testing, sopraccitate, è stato dimostrato come i Mock-Up risultano essere progettati e installati in modo coerente rispetto i requisiti prestazionali definiti all'interno delle normative europea e americana, per cui i flussi d'aria registrati durante test risultano inferiori rispetto a tali limiti.

Tabella 9. Principali differenze per la prova di permeabilità all'aria secondo protocolli europei e americani

	Norma di riferimento	P max	Metodologia di prova	Requisiti prestazionali
Caso studio 1	UNI EN 12153:2000	± 660 Pa	Impulsi di pressione crescenti	Classi di permeabilità
Caso studio 2	ASTM 283-04 (2012)	± 300 Pa	2 step per pressione stabilita positiva e negativa	Limiti prestazionali: < 0,06 ft ³ /min (facciata) < 0,10 ft ³ /min (apribili)

In questo scenario, s'ipotizza che il test sperimentale della presente ricerca confermi la classificazione "eccezionale" AE660 raggiunta nei benchmarking esterni. Di fatti, l'unica differenza rispetto alla soluzione tecnologica-costruttiva del caso studio 1 – sottoposto ai test all'interno del banco di prova dell'azienda Ponzio s.r.l – riguarda la diminuzione del valore di ingresso vetro nella parte di testa dei Mock-Up, da 13mm – valore ricorrente nei sistemi di facciata a marchio Ponzio – a 10 mm – valore stabilito per il miglioramento delle prestazioni sismiche del sistema facciata. Tuttavia, il valore imposto per l'ingresso vetro, non dovrebbe inficiare sull'ingresso dei flussi d'aria, grazie alle elevate performance di tenuta degli elementi di guarnizione in EPDM.

Rispetto al processo metodologico che struttura la conduzione delle attività di testing, risulta necessario ricordare che i provini verranno installati all'interno di una campata del Test Lab, per cui la prova verrà condotta singolarmente per ogni Mock-Up andando a sigillare di volta in volta uno dei due provini e identificandolo come parte integrante della camera di prova.

Tenuta all'acqua sotto pressione statica

Rispetto ai *benchmarking esterni*, ovvero ai risultati ottenuti dai test condotti presso il banco di prova dell'azienda Ponzio, la prova di tenuta all'acqua sotto pressione statica è stata eseguita secondo la normativa UNI EN 12155:2002, il cui *principio di prova* consiste nell'applicazione di una quantità costante di acqua – impostata al valore di $2\text{l/m}^2\text{min}$ – in una pellicola continua sulla superficie esterna del provino con incrementi delle pressioni statiche positive di prova applicate ad intervalli di tempo stabiliti, sia nelle parti fisse che nelle parti apribili, in cui il valore massimo della pressione è pari a 1650 Pa.

I risultati sono espressi in conformità al § 9 della norma EN 12155:2000 e, ai fini della classificazione, al § 6 della norma EN 12154:1999 (Cfr. Tabella 10), rispetto la presenza, durata e localizzazione delle eventuali infiltrazioni d'acqua per tutto il periodo della prova.

Il campione sottoposto a prova di tenuta all'acqua sotto pressione statica non ha presentato infiltrazioni sotto pressione statica fino al valore pari a 1650 Pa, classificandolo in classe RE_{1650} .

Rispetto ai *benchmarking interni*, ovvero ai risultati ottenuti dai test condotti presso la sezione, TCLab, la *prova di tenuta all'acqua sotto pressione statica* è stata eseguita in conformità della normativa americana ASTM E 331-00 (2009), il cui *principio di prova* consiste nell'applicazione di una quantità di acqua costante – impostata al valore di $3,4\text{l/m}^2\text{min}$ – ad una pressione statica di 1200 Pa per un tempo pari a 15min. I risultati sono stati espressi in conformità al § 12 della norma ASTM E 331-00 rispetto la presenza e localizzazione delle eventuali infiltrazioni d'acqua per tutto il periodo della prova. La norma non fa riferimento ai requisiti prestazionali minimi, per questo motivo, tali limiti vengono imposti dagli addetti degli enti che emettono la certificazione. Il campione sottoposto sollecitato non ha evidenziato infiltrazioni di acqua e per questo motivo il test si classifica come "superato".

I procedimenti di prova, dei test condotti per i benchmarking di riferimento, hanno evidenziato alcune differenze sostanziali per la prova di tenuta all'acqua sotto pressione statica rispetto i protocolli normativi europei e americani. Nello specifico, nel caso della normativa europea il Mock-Up è stato sottoposto a un valore di una quantità d'acqua minore ($2\text{l/m}^2\text{min}$) ma a differenti impulsi di pressione positiva crescente fino al valore prestabilito per una durata, in minuti, maggiore (1h e 25min) rispetto il metodo di prova postulato all'interno della ASTM E 331-00 (2009).

La normativa americana, invece, prevede un unico step – in modo analogo al test di permeabilità all'aria – ma ad un valore di quantità d'acqua maggiore rispetto il protocollo europeo ($3,4\text{l/m}^2\text{min}$) della durata complessiva di 15min il cui valore di pressione è quello concordato dai committenti, nel caso specifico pari a 1200 Pa. Entrambi i risultati si basano sull'individuazione di infiltrazioni d'acqua all'interno dei provini sollecitati, identificando una prova di tipo visivo, ovvero non prevedendo strumentazioni che misurano i valori numerici di tenuta. Dalle attività di testing, sopracitate, è stato dimostrato come i Mock-Up risultano essere progettati e installati in modo coerente rispetto i requisiti prestazionali definiti all'interno delle normative europea e americana, per cui non sono state registrate infiltrazioni d'acqua. In modo analogo rispetto al test condotto per la prova di permeabilità all'aria, s'ipotizza che il test sperimentale, della presente ricerca, confermi la classificazione RE_{1650} del sistema facciata *Stick System WS 50 PG*. Di fatti, la diminuzione dell'ingresso vetro a 10mm, come

enunciato sopra, non dovrebbe inficiare sulle possibili infiltrazioni d'acqua. Rispetto al processo metodologico, nel test di tenuta all'acqua sotto pressione statica, i Mock-Up verranno sollecitati in modo simultaneo, evitando, così, di sottoporre il provino a ulteriore stress attraverso due serie di impulsi di pressioni d'aria positive considerando la durata notevole del test pari a 1h e 25min.

Tabella 11. Principali differenze per la prova di tenuta all'acqua sotto pressione statica secondo protocolli europei e americani

	Norma di riferimento	P max	Metodologia di prova	Requisiti prestazionali
Caso studio 1	UNI EN 12155:2000	1600 Pa	Velo costante di acqua pari a 2l/m ² min per 15 min a pressione pari a 0 Pa. 2l/m ² min per 5 min in valori crescenti di pressione positiva fino al valore stabilito	Classi di tenuta
Caso studio 2	ASTM E 331-00 (2009)	1200 Pa	Velo costante di acqua pari a 3,4l/m ² min per 15 min a pressione positiva costante	Presenza o meno di infiltrazioni d'acqua

Resistenza al carico del vento

Rispetto ai *benchmarking esterni*, ovvero ai risultati ottenuti dai test condotti presso il banco di prova dell'azienda Ponzio, la *prova di resistenza al carico del vento* è stata eseguita secondo la normativa UNI EN 12179:2002, il cui *principio di prova* consiste nell'applicazione di una sequenza stabilita di pressioni di prova (Cfr. Tabella 12), al fine di determinare la resistenza al carico del vento del campione, sia delle sue parti fisse che di quelle apribili, in condizioni di pressioni d'aria statica positiva e negativa, in cui il valore massimo della pressione è pari a 2000 Pa.

Tabella 12. Sequenza di pressioni positive e negative stabilite per la prova di resistenza al carico del vento

Pressione positiva (Pa)	Pressione negativa (Pa)
500	500
1000	1000
1500	1500
2000	2000
0	0

I risultati sono espressi in conformità al § 9 della norma EN 12179:2000. Sono stati riportati i valori delle inflessioni frontali calcolate e delle misurazioni degli spostamenti frontali e delle deformazioni residue, in funzione delle pressioni di prova, confrontando i dati con i valori massimi consentiti specificati nella norma EN 13116:2001 per la valutazione della loro ammissibilità. Ai fini del soddisfacimento dei requisiti prestazionali dettagliati nella norma EN 13116:2001 ed in particolare in conformità al § 4, i risultati devono rispettare i seguenti criteri di accettabilità:

- la facciata continua deve trasmettere in modo sicuro il carico di progetto per mezzo dei

punti di supporto alla struttura dell'edificio;

- la facciata continua deve essere in grado di resistere al carico di progetto senza riduzione dei requisiti prestazionali specificati.

In particolare, devono essere raggiunte almeno le seguenti prestazioni in condizioni di carico di progetto:

- la deflessione frontale in condizioni di carico di progetto positivo e negativo non deve essere maggiore della misura minore tra $1/200$ dell'ampiezza dell'elemento del telaio considerato misurata tra i punti di supporto strutturale e 15 mm;

- la deflessione frontale deve essere solo una deformazione temporanea e dopo rimozione del carico deve essere recuperata di almeno il 95% entro 1 h;

- lo spostamento frontale degli elementi di fissaggio degli elementi del telaio sulle loro connessioni alla struttura dell'edificio o altro componente strutturale deve essere limitata a meno di 1 mm e questa deve essere ammessa come deformazione residua;

- la differenza positiva tra la permeabilità all'aria misurata alla pressione massima nella prima e nella seconda prova non dovrebbe differire di più di $0,3 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ o $0,1 \text{ m}^3/\text{hm}$ di lunghezza del giunto.

Le deflessioni frontali rilevate in condizioni di carico di progetto positivo e negativo del campione sottoposto a prova sono risultate inferiori della misura minore tra $1/200$ della relativa ampiezza dell'elemento e 15 mm, in conformità ai requisiti prestazionali di cui al § 4 della norma EN 13116:2001. Per la specifica facciata sottoposta a prova, il limite risulta quindi essere 15 mm (che risulta inferiore a $1/200$ del montante, pari a 16,4 mm). Inoltre, le deflessioni frontali, rilevate, sono risultate temporanee e recuperate ad almeno il 95% entro il periodo di tempo consentito pari a 1 h, in conformità ai requisiti di cui al § 4 della norma EN 13116:2001.

Rispetto ai *benchmarking interni*, ovvero ai risultati ottenuti dai test condotti presso la sezione, TCLab, la prova di *resistenza al carico del vento* è stata eseguita secondo la normativa ASTM E 330-02 (2010), il cui principio di prova consiste nell'applicazione di una pressione di prova crescente – con velocità non superiore a 100 Pa/s – positiva e negativa alla quale si eseguono misurazioni e controlli per verificare che sotto tali effetti il campione presenti una deformazione ammissibile e conservi le sue proprietà, in cui il valore massimo della pressione è pari a 2400 Pa . Nel caso specifico del provino sollecitato, la prova di resistenza al carico del vento è stata strutturata in 2 step; il primo ad una pressione pari al 50% di carico del vento, ovvero pari a 1200 Pa . Il secondo step al 100% del carico del vento pari a 2400 Pa .

I risultati sono espressi in conformità al § 12.1.6 e 12.1.7 della norma ASTM E 330-02 (2010). Sono stati riportati i valori delle inflessioni frontali calcolate in base ai seguenti requisiti prestazionali:

- Montanti (struttura portante verticale tra i solai): inflessione perpendicolare al piano della facciata minore a $L/175$ della luce libera tra gli ancoraggi.

Traversi (struttura portante orizzontale tra i solai): inflessione perpendicolare al piano della facciata minore a $L/254$ della luce libera tra i punti di vincolo ai montanti.

Le deflessioni frontali rilevate in condizioni di carico di progetto positivo e negativo del campione sottoposto a prova risultano essere inferiori dei requisiti prestazionali imposti all'interno della normativa per questo motivo il test viene considerato superato.

La trattazione dei procedimenti di prova, discussi per la costruzione dei benchmarking di riferimento, ha fatto emergere alcune *differenze di processo* per la prova di resistenza al carico del vento rispetto i protocolli normativi europei e americani.

Nello specifico, tali differenze riguardano la *modalità* con cui le apparecchiature di prova devono raggiungere il *valore della pressione di carico del vento stabilita*. Infatti, nel caso del-

la normativa europea, il Mock-Up viene sottoposto a una sequenza stabilita di impulsi di pressione crescenti (Cfr. Tabella 12), la normativa americana, invece, postula la velocità con la quale la camera/banco di prova devono raggiungere la pressione stabilita del carico di progetto, pari a 100 Pa/s.

Per entrambe le procedure, i risultati riguardano la rilevazione delle deflessioni/inflessioni frontali – a seconda di pressione positiva o negativa – attraverso una serie di sensori di misurazione che – posizionati in punti nevralgici del sistema di facciata sollecitato – rilevano gli spostamenti degli elementi durante tutto il processo di prova. I sensori sono, infatti, in grado di misurare in modo costante e continuo – per tutta la durata del test – gli spostamenti che si registrano alle varie pressioni raggiunte all'interno della camera/banco di prova. Alla luce di ciò, si può affermare che i *due procedimenti di prova possono essere intesi come equiparabili*.

Infine, entrambe le procedure di prova postulano, come ultimo step, la misurazione del posizionamento degli elementi quando la pressione arriva a 0 Pa , in modo tale da rilevare la deformazione residua degli elementi di facciata e degli elementi di connessione telaio-facciata e struttura primaria di supporto.

Tabella 13. Principali differenze per la prova di resistenza al carico del vento secondo protocolli europei e americani

	Norma di riferimento	P max	Metodologia di prova	Requisiti prestazionali
Caso studio 1	UNI EN 12179:2000	2000 Pa	Sequenza stabilita di pressione di prova	Limiti di deflessione frontale e tempi di recupero del sistema facciata sollecitato
Caso studio 2	ASTM E 330-02 (2010)	2400 Pa	Velocità di rampa per il raggiungimento del valore di pressione 100 Pa/s	Limiti di inflessione montante e inflessione trasverso

I *benchmarking interni ed esterni*, di riferimento, hanno mostrato come i sistemi di facciata continua sollecitati, siano progettati e installati in modo coerente rispetto ai requisiti prestazionali fissati all'interno delle normative di riferimento.

Da queste osservazioni, si ipotizza che il *test per il caso sperimentale*, della presente ricerca, *confermi i livelli prestazionali* raggiunti dal test condotto all'interno del banco di prova dell'azienda Ponzio s.r.l.

L'elemento critico potrebbe essere considerato ancora una volta, la diminuzione dell'ingresso vetro nella parte di testa dei Mock-Up. Tuttavia, gli spostamenti registrati non superano i valori di 10 mm e per questo motivo, il vetro non dovrebbe incorrere in deformazioni tali da provocare l'espulsione dell'elemento vetrato dal sistema del telaio in alluminio.

Racking test

Conclusa la discussione dei test di permeabilità all'aria, acqua e vento che costituiscono, come enunciato nell'introduzione del paragrafo, la prima parte del report tecnico, la redazione di tale documento persegue verso la discussione dei risultati dei test sismici condotti per il secondo caso studio. Di fatti, il Method Statement, adottato per il primo caso studio, non prevede i test sismici e per questo motivo le procedure di prova consistono nella ripetizione del test di permeabilità all'aria e tenuta all'acqua statica ed infine la prova di resistenza di carico del vento al 150% della pressione di progetto.

In questo scenario, il report riguarda la trattazione dei risultati ottenuti per il secondo caso studio secondo i protocolli normativi americani. Rispetto ai *benchmarking interni*, ovvero ai risultati ottenuti dai test condotti presso la sezione TCLab, la prova di *racking test* è stata eseguita secondo la normativa AAMA 501.4-00 (2009), il cui principio di prova consiste nel sollecitare il provino con 3 cicli di spostamento quasi statici nel piano della facciata, tale valore è stato stabilito, nel caso specifico, pari a ± 50 mm.

I risultati sono espressi in conformità al § 11 della norma AAMA 501.4-00 (2009), in cui livelli prestazionali vengono stabiliti in base al tipo di occupazione dell'edificio in cui verrà installato il sistema di facciata progettato e testato, suddivisi in 3 gruppi:

- strutture essenziali;
- strutture ad alta occupazione;
- strutture ad occupazione standard.

I requisiti di performance sismica per facciate continue e sistemi di pareti vetrate in strutture essenziali (Gruppo di utilizzo sismico III)

(Questi requisiti intendono rappresentare il livello di prestazione "operativo" sia nelle disposizioni NEHRP che nella FEMA 273).

- Tutte le funzioni sono rimaste inalterate senza danni visibili;
- non è ammessa la rottura o la fuoriuscita del vetro;
- le performance dopo lo spostamento del progetto (ad esempio, infiltrazioni d'aria, perdite d'acqua, prestazioni strutturali, ecc.) devono rimanere entro i limiti consentiti senza aggiustamenti o riparazioni;
- nessun componente della parete può cadere. Le finiture non devono essere visibilmente sganciate.

I requisiti di performance sismica per le facciate continue e i sistemi di pareti vetrate nelle strutture ad alta occupazione (Gruppo di utilizzo sismico II).

(Questi requisiti intendono rappresentare il livello di prestazione "operativo" sia nelle Disposizioni NEHRP che nella FEMA 273).

- non è consentita la rottura o la ricaduta del vetro;
- qualsiasi danno deve essere facilmente riparabile/regolabile in loco, senza necessità di sostituzione di parti;
- le performance successive allo spostamento del progetto (ad esempio, infiltrazioni d'aria, perdite d'acqua, prestazioni strutturali, ecc. Le guarnizioni visibili possono essere riparate o ripristinate.
- nessun componente della parete può cadere. Le finiture non devono essere smontate in modo visibile.

I requisiti di performance sismica per le facciate continue e i sistemi di pareti vetrate in strutture ad occupazione standard (Gruppo di utilizzo sismico I)

(Questi requisiti intendono rappresentare il livello di performance per "occupazione immediata" previsto dalle disposizioni NEHRP e dalla FEMA 273).

- Una lastra di vetro o fino al 10% delle lastre totali può rompersi, ma deve essere mantenuta completamente nell'apertura vetrata senza che si verifichino cadute di vetro;
- qualsiasi danno deve essere facilmente riparabile/regolabile in loco;
- le performance successive alla progettazione (ad esempio, infiltrazione d'aria, perdite d'acqua, prestazioni strutturali, ecc. I vetri rotti possono essere sostituiti per effettuare i test di prestazione successivi. Le guarnizioni visibili possono essere riparate o ripristinate;
- nessun componente della parete può cadere. Le finiture non devono essere visibilmente disinnestate;
- gli elementi di rivestimento possono richiedere la sostituzione.

Come si evince dai requisiti prestazionali imposti dalla normativa, i risultati riguarderanno delle rilevazioni di tipo visivo, come nel caso della prova di tenuta all'acqua sotto pressione statica. Gli spostamenti imposti rispetto al piano di facciata pari a ± 50 mm, rispondono ai livelli prestazionali relativi al I gruppo di utilizzo sismico. In ogni caso, il test condotto non ha riportato danni e rotture sia negli elementi vetrati che negli elementi di guarnizione del Mock-Up sollecitato, classificando la prova come "superata".

Ulteriori considerazioni, rispetto i livelli prestazionali ottenuti, saranno condotte a seguito delle ripetizioni previste nel Method Statement di riferimento. Di fatti, indipendentemente dal gruppo di utilizzo sismico, la normativa antisismica americana in regime statico prevede la ripetizione dei test in condizioni di servizio attraverso le prove di permeabilità all'aria, tenuta all'acqua statica e resistenza al carico del vento al 150% della pressione di progetto.

Nel contesto previsionale del test sismico, da condurre per la fase sperimentale della ricerca, risulta necessario porre l'attenzione sul metodo di prova postulato all'interno della norma UNI EN 13830 Appendice D, il cui *principio di prova* consiste nel sollecitare il provino con 3 cicli di spostamento quasi statici nel piano della facciata. Alla conclusione della prova, i tecnici devono ispezionare visivamente il modello per individuare eventuali indizi di cedimento. Rispetto le prove sopracitate, in questo caso la norma demanda all'organismo notificato di registrare tutte le aree di deformazione "visibile", quale per esempio disinnesto, distorsione metallica, cedimento del sigillante o della vetratura, o deformazione permanente. Se la rottura del vetro si verifica durante la prova di spostamento, il personale dell'organismo notificato deve esaminare attentamente il provino. Se la rottura è stata causata dalla deformazione o dal cedimento del telaio di supporto del vetro, o da qualsiasi interazione tra il vetro e i suoi elementi di supporto, registrare gli esiti e interrompere la prova. Se non è possibile determinare la causa della rottura, sostituire il vetro con i componenti originali e ripetere la prova un'altra volta. Inoltre, gli spostamenti imposti verranno definiti anch'essi dall'ente di certificazione.

Come emerso all'interno del *paragrafo 6.3.1. "Il Method Statement"*, i test sismici con spostamenti "statici", sia nel caso della normativa americana che in quella europea prevedono tre cicli di spostamenti, il cui metodo di prova può essere considerato sovrapponibile. Dai risultati ottenuti dal caso studio 2, con riferimento ai *benchmarking esterni*, si ipotizza che anche il caso sperimentale non presenterà alcun danno e/o rottura degli elementi costitutivi dei Mock-Up.

Nello specifico, nel Mock-Up con montante ad asse unico si prevede un *comportamento più rigido dell'elemento verticale* rispetto al secondo, la cui sezione e i relativi momenti di inerzia, però, dovrebbero essere in grado di accogliere le deformazioni imposte dagli spostamenti in fase elastica del materiale e quindi non portare tali elementi a deformazioni permanenti. Diversamente nel Mock-Up con montante ad asse spezzato, le soluzioni tecnologiche-costruttive dell'elemento verticale permettono un maggiore grado di libertà, grazie all'utilizzo e posizionamento del canotto, conferendogli un *comportamento più flessibile*.

In entrambi i Mock-Up gli elementi di connessione montante-traverso, cavallotti a pulsante e tondi, non dovrebbero essere intesi come elementi critici ed essere in grado di accogliere gli spostamenti indotti durante tale test. Infine, la diminuzione dell'ingresso vetro a 10mm nella parte di testa dei Mock-Up dovrebbe favorire il movimento roto-traslante dell'elemento vetrato, evitando il contatto critico vetro-telaio.

Nelle parti dei Mock-Up in cui l'ingresso vetro è pari a 13 mm, i piccoli spostamenti quasi statici non dovrebbero portare gli elementi vetrati ad incorrere nella fase di fessurazione del vetro, seppur è possibile che l'elemento vetrato entri in contatto con il telaio-facciata.

Sequenza di ripetizioni

Tabella 14. Method Statement dei casi studio di riferimento per la sequenza di ripetizioni

Tipologia di test	Normativa di riferimento	
	Caso Studio 1	Caso studio 2
Permeabilità all'aria	UNI EN 12153:2002	ASTM 283-04 (2012)
Tenuta all'acqua in regime statico	UNI EN 12155:2002	ASTM E 331-00 (2009)

I test precedentemente effettuati vengono ripetuti secondo i principi e le procedure precedentemente descritti.

Per entrambi i *benchmarking di riferimento*, la sequenza di ripetizioni ha confermato le *classi* – nel caso della normativa europea – e i *livelli prestazionali* – nel caso della normativa americana – precedentemente ottenuti.

Da queste osservazioni, si ipotizza che il test sperimentale, della presente ricerca, confermi le seguenti classi di appartenenza:

- *AE660*, per la prova di permeabilità all'aria;
- *RE1660*, per la prova di tenuta all'acqua sotto pressione statica.

Resistenza al carico del vento (150% pressione di progetto)

In questo caso i test vengono ripetuti secondo i principi e le procedure precedente descritti, ma sia i protocolli americani che quelli europei, prevedono che la pressione stabilita per il carico del vento venga *incrementata del 150%* del valore di progetto.

Rispetto ai *benchmarking esterni*, ovvero ai risultati ottenuti dai test condotti presso il banco di prova dell'azienda Ponzio, la prova di resistenza al carico del vento è stata eseguita secondo la normativa UNI EN 12179:2002, il cui valore di pressione al 150% del carico è pari a 3000 Pa.

La normativa europea postula le prestazioni che devono essere raggiunte in condizioni di carico aumentato, (Cfr. § 4 della norma EN 13116:2001):

- in condizioni di carico aumentato positivo e negativo non si deve verificare alcun danno permanente agli elementi del telaio, ai pannelli di tamponamento, alle unità di apertura, alle serrature o agli ancoraggi;
- i pannelli, le bandelle di tenuta e le estremità decorative devono rimanere fissi in modo sicuro e le guarnizioni non devono essere spostate;
- se un riquadro di vetro si dovesse rompere, allora può essere sostituito e la prova proseguita solo se, eseguendo un attento esame, la causa della rottura non è attribuibile ad alcun difetto nella tecnica di trattamento del vetro o del telaio di sostegno.

Dai test condotti, il Mock-Up del caso studio 1 risponde ai requisiti prestazionali imposti dalla normativa EN 13116:2001, classificando il test come "*superato*" e concluso.

Rispetto ai *benchmarking interni*, ovvero ai risultati ottenuti dai test condotti presso la sezione TCLab, la prova di la prova di resistenza al carico del vento è stata eseguita secondo la normativa ASTM E 330-02 (2010), il cui valore di pressione al 150% del carico è pari a 3600 Pa. Nel caso specifico del provino sollecitato, la prova di resistenza al carico del vento è stata strutturata in 2 step:

- il primo ad una pressione pari al 75% del carico del vento pari a 1800 Pa;

- il secondo step al 150% del carico del vento pari a 3600 Pa.

I requisiti prestazionali della prova di resistenza al carico del vento incrementata al 150% del valore di progetto risultano essere di tipo visivo e riguardano danni permanenti e rotture agli elementi del sistema facciata sollecitato.

Nel test specifico, a seguito della prova non condotta, non sono stati rilevati deformazioni permanenti e per questo motivo il test viene classificato come "superato".

Le considerazioni critiche rispetto le due metodologie di prova seguono quelle precedentemente trattate per la prova di resistenza al carico del vento al 100% del carico di progetto. In precedenza, l'ipotesi dei risultati dei test da condurre all'interno della sezione TCLab per il caso sperimentale è stata equiparata ai risultati relativi ai benchmarking esterni per le prove condotte all'interno del banco di prova dell'azienda Ponzio s.r.l.

In questo caso, la variabile rispetto al test sismico potrebbe comportare delle conseguenze rispetto ai valori registrati per le deflessioni frontali. Infatti, i Mock-Up risulteranno maggiormente stressati rispetto al caso del benchmarking esterno e per questo motivo i valori di deflessione potrebbero essere più elevati rispetto al caso studio 1.

Tuttavia, le soluzioni tecnologiche-costruttive adottate per entrambi i Mock-Up dovrebbero risultare in conformità rispetto i requisiti prestazionali postulati all'interno del § 4 della norma EN 13116:2001 e precedentemente definiti.

Crescendo test

Per il test sismico in "crescendo", come emerso all'interno del *paragrafo 6.3.1. "Il Method Statement"*, si fa riferimento alla normativa americana AAMA 501.6-09, il cui *principio di prova* permette di determinare l'ampiezza dello spostamento orizzontale di elementi facciata, $\Delta fallout$, che causerebbe la caduta di pannelli di vetro in condizioni di laboratorio.

Tale metodo di prova, incentrato sul comportamento allo stato limite ultimo di un sistema facciata o di una partizione, è un complemento dell'AAMA 501.4-00 – "*Recommended Static Testing Method for Evaluating Curtain Wall and Storefront Systems Subjected to Seismic and Wind Induced Interstory Drift*" – che invece si concentra sul comportamento allo stato limite di esercizio delle facciate.

Il crescendo test è caratterizzato da una serie concatenata di cicli sinusoidali costituita da intervalli di "rampa" e intervalli di "ampiezza costante" formati da 4 cicli ciascuno.

La normativa impone alcuni requisiti prestazionali di tipo visivo, infatti a conclusione del test i componenti del campione quali i pannelli di tamponamento, fermavetri e copertine non devono sganciarsi e cadere al suolo.

Ogni crescendo test deve essere eseguito in modo ciclico fino al completamento e fino a quando non si verificherà la prima delle seguenti condizioni:

- si verifica la caduta del vetro, come definito nella § 6.3 della norma AAMA 501.6-09;
- l'indice di deriva sull'altezza della lastra di vetro è almeno 10%;
- uno spostamento dinamico di ± 150 mm viene applicato al provino.

Rispetto ai *benchmarking interni*, ovvero ai risultati ottenuti dai test condotti presso la sezione TCLab, la prova in crescendo è stata condotta sollecitando il campione con ampiezza massima di spostamento pari a ± 120 mm, con una frequenza di $0,8 \pm 0,1/-0,0$ Hz per spostamenti fino a ± 75 mm e $0,4 \pm 0,1/-0,0$ Hz per spostamenti superiori a ± 75 mm.

Dal test condotto, i componenti del campione sottoposto a prova quali i pannelli di tamponamento in vetro, hanno subito alcune alterazioni visibili. Di fatti, il contatto critico vetro-telaio ha portato l'elemento vetrato a parziali fessurazioni negli angoli in cui si è verificato il contatto, comportando anche l'uscita parziale dalla sede di parti della guarnizione esterna. Tuttavia, le alterazioni riscontrate non hanno portato alla caduta del vetro e pertanto il test viene classificato come "superato".

Per il *caso sperimentale*, il test in crescendo verrà condotto applicando ai Mock-Up – rispettivamente con asse montate unico e spezzato – uno spostamento dinamico pari a ± 75 mm con una frequenza di $0,8 \pm 0,1/0,0$ Hz.

La scelta di installare entrambi i provini sulla stessa campata del Test Lab, infatti, risiede nell'intenzione di testare in modo simultaneo i due provini, in modo tale da registrare le principali differenze nel comportamento dinamico dei sistemi di facciata sollecitati.

Prima di trattare l'ipotesi dei possibili risultati, risulta necessario riportare le variabili che sono state messe in campo per il miglioramento del comportamento sismico dei sistemi di facciata, ovvero:

- l'utilizzo di due tipologie di cavallotti, quali elementi di connessione trasverso-montante;
- diminuzione dell'ingresso vetro nella parte di testa di entrambi i Mock-Up pari a 10 mm, al fine di evitare il contatto critico tra vetro-telaio;
- la scelta della tipologia di vetro stratificato che consente il miglioramento della risposta del sistema vetrato sottoposto a spostamenti di interpiano.

A fronte di ciò, si ipotizza infatti che per il *caso del Mock-Up con montante ad asse unico* si potrebbero registrare le seguenti condizioni:

- *maggiori deformazioni nell'elemento montante* a causa del comportamento rigido sottoposto a spostamenti che può causare ad alcune fessurazioni nella parte inferiore del Mock-Up dovuto al valore dell'ingresso vetro pari a 13 mm e all'utilizzo del cavallotto a pulsante per la connessione montante-trasverso inferiore. Tali deformazioni potrebbero causare la fuoriuscita dalla sede delle guarnizioni;
- *piccole fessurazioni degli elementi vetrati* nella parte centrale del Mock-Up, causate dal maggiore spostamento in corrispondenza della trave sismica, il cui comportamento viene però migliorato grazie alla presenza dei cavallotti tondi. Gli apribili potrebbero subire alcuni danni. Nello specifico, si prevede che per il caso dell'apribile anta a ribalta, il sistema si comporti in modo migliore rispetto all'apribile a sporgere grazie alle sue dimensioni, tuttavia è possibile che si presentino alcune deformazioni che inficino il sistema di apertura. Diversamente per il secondo apribile, le dimensioni del vetro potrebbero comportare il contatto critico vetro-telaio portando ad alcune fessurazioni negli angoli che hanno subito il contatto;
- nella parte di testa del Mock-Up grazie alla posizione rispetto alla trave sismica e diminuzione dell'ingresso vetro è ipotizzabile che *non si registri alcun tipo di fessurazione*;
- gli elementi di connessione staffa al muro potrebbero subire alcune piccole deformazioni ma di tipo elastico nella parte centrale del Mock-Up in corrispondenza della trave sismica e quindi del massimo spostamento imposto.

Per il *secondo Mock-Up* invece, ad asse spezzato, il comportamento dinamico del sistema sollecitato riguarda le seguenti ipotesi:

- *deformazioni minori nell'elemento montante*, grazie all'utilizzo del canotto asolato che consente all'elemento verticale di compiere piccoli spostamenti registrando un comportamento più flessibile;
- *piccole fessurazioni* nella parte inferiore del Mock-Up dovute alle soluzioni tecnologiche di connessione montante e trasverso, costituite dall'utilizzo del cavallotto a pulsante, causando, come nel Mock-Up con montante ad asse unico, la fuoriuscita dalla sede delle guarnizioni;
- *piccole fessurazioni* degli elementi vetrati nella parte centrale del Mock-Up, causate dal maggiore spostamento in corrispondenza della trave sismica, il cui comportamento viene però migliorato grazie alla presenza dei cavallotti tondi. Gli apribili potrebbero subire alcuni danni. Nello specifico, si prevede che per il caso dell'apribile anta a ribalta, il sistema

si comporti in modo migliore rispetto all'apribile a sporgere grazie alle sue dimensioni, tuttavia è possibile che si presentino alcune deformazioni che inficino il sistema di apertura. Diversamente per il secondo apribile, le dimensioni del vetro potrebbero comportare il contatto critico vetro-telaio portando ad alcune fessurazioni negli angoli che hanno subito il contatto;

- nella parte di testa del Mock-Up grazie alla posizione rispetto alla trave sismica e diminuzione dell'ingresso vetro è ipotizzabile che *non si registri alcun tipo di fessurazione*;
- gli elementi di connessione staffa al muro potrebbero subire alcune piccole deformazioni in campo elastico minori rispetto al primo Mock-Up, in corrispondenza della trave sismica.

A fronte di tali considerazioni ipotizzate per i test sismici che saranno condotti in conformità delle prescrizioni postulate all'interno della normativa AAMA 501.6-09, i risultati dovrebbero rispettare i seguenti limiti ((Cfr § 6.2 della norma AAMA 501.6-09):

- non si sia verificata la caduta dei vetri;
- la deriva non abbia superato il 10% dell'altezza del vetro;
- il test in crescendo sia stato condotto fino allo spostamento stabilito.

Ciò consegue al superamento del test e conclusione del ciclo di prova stabilite per il caso sperimentale della presente ricerca.

Le valutazioni critiche dei risultati ottenuti nella fase sperimentale della ricerca saranno discusse all'interno dell'annex "*Le valutazioni utili per il Design dell'elemento di connessione flessibile di una facciata Stick System*", attraverso la sovrapposizione dei risultati ottenuti dalle attività di testing e simulazione.

Infine, le valutazioni condotte sugli aspetti prestazionali dei sistemi di facciata convenzionali permettono di aprire diversi scenari, tra cui l'indagine della fattibilità della proposta per la sperimentazione dei componenti adattivi/dinamici non strutturali per il miglioramento delle prestazioni sismiche degli involucri edilizi, grazie all'integrazione di materiali intelligenti quali le leghe a memoria di forma con effetti superelastici negli elementi di connessione.



Fig. 15. Telaio apribili del Mock-Up

Note

1. La proposta ha come scopo il miglioramento dei dispositivi di connessione, che può avvenire applicando – alle connessioni con smorzamento per attrito – una piastra di strato sottile con la lega a memoria di forma superelastica, la *lega NiTi*. Sull'implementazione del sistema di connessione avviene, quindi, applicando sulle "ali" delle staffe in acciaio una configurazione di tipo composito costituito da acciaio e lega a memoria di forma. La produzione della piastra con lega a memoria di forma può avvenire servendosi delle recenti innovazioni provenienti dalla quarta rivoluzione industriale attraverso l'Additive Manufacturing. (Cfr. Paragrafo 4.3 "I materiali avanzati per applicazioni estreme")

2. Questa metodologia è basata sull'utilizzo di strumenti quali software di simulazione e sulla conduzione di prove di laboratorio, al fine di delineare in modo preciso e accurato i possibili deficit che insorgono sui sistemi di facciata a seguito degli eventi sismici.

3. In materia di "dispendio economico e di risorse" bisogna considerare le variabili legate al processo di produzione – basato sull'utilizzo di risorse energetiche, materiali ed economiche – dei sistemi da testare, all'intero dei laboratori di prova e di conseguenza il processo di dismissione derivante dalla fase di smontaggio, una volta effettuati i test. Ciò viene letto in un'ottica che riscontra un processo "take-make-dispose" di un'economia che – seppur si sta orientando verso gli obiettivi dell'economia circolare – risulta di fatto ancorata a un processo lineare.

4. L'azienda Ponzio s.r.l. con sede centrale a Pineto (TE) è leader nella progettazione e produzione di sistemi per serramenti e facciate continue in alluminio, ponendo particolare attenzione ai requisiti di controllo qualità in linea con la normativa europea UNI EN ISO 9001:2015. La sezione di *Ricerca & Sviluppo* – impegnata nel miglioramento dei prodotti per raggiungere elevati livelli prestazionali coerenti con gli standard comunitari – rappresenta un importante punto di contatto e collaborazione con la ricerca svolta in ambito accademico. Di fatti, l'azienda Ponzio è attualmente partnership di due ricerche dottorali di tipo industriale. Una rappresentata dalla presente ricerca e quindi in collaborazione con l'Università Mediterranea di Reggio Calabria. La seconda ricerca, sviluppata per il miglioramento della metodologia in materia di Social Life Cycle Assessment (LCA) in collaborazione con l'Università G. D'Annunzio di Chieti-Pescara. Ciò ha portato al dialogo sinergico tra le parti e la possibilità di collaborazione anche tra le università sopra citate.

5. In particolar modo ci si riferisce agli Ingegneri:
- Marco Sansonetti, responsabile ufficio tecnico e tutor aziendale della ricerca, per la strutturazione delle attività di stage svolte presso l'azienda;
- Vincenzo Di Diadoro, responsabile settore facciate e co-Tutor aziendale, per il dimensionamento strutturale e la progettazione del sistema di facciata continua, e per il raggiungimento delle competenze tecniche e di settore per la produzione dei disegni tecniche e distinte di lavorazione;
- Marco Di Giacinto, responsabile del settore sviluppo e ricerca, per lo studio e il confronto critico tra le procedure di prova normative – americane ed europee – per i test da condurre in laboratorio per le condizioni di servizio e sicurezza.

6. Pressore: profilo a pressione applicato ai montanti e ai traversi lungo tutto il perimetro di una lastra di vetro per vincolare e generalmente comprimere la guarnizione della vetrata. Definizione tratta dalla scomposizione tassonomica all'interno del Paragrafo

1.4 "Il Curtain Wall e i sistemi connessi (componenti, elementi e materiali)" della presente tesi.

7. Carter (copertina): profilo esterno di copertura solitamente installato a scatto, applicato sul pressore del montante per fornire una finitura architettonica adeguata. Definizione tratta dalla scomposizione tassonomica all'interno del Paragrafo 1.4 "Il Curtain Wall e i sistemi connessi (componenti, elementi e materiali)" della presente tesi.

8. Cavallotto: elemento di connessione in acciaio, a pulsante, quadro o tondo, installato sull'estremità del traverso per fornire continuità tra i profili dell'intelaiatura, montanti e traversi. Definizione tratta dalla scomposizione tassonomica all'interno del Paragrafo 1.4 "Il Curtain Wall e i sistemi connessi (componenti, elementi e materiali)" della presente tesi.

9. Tale software è basato sulla modellazione agli elementi finiti delle vetrazioni – calcolati analiticamente come "elementi piastra" in linea con la teoria sviluppata in origine da Kirchhoff-Love (1850) – e consente di verificare il comportamento dinamico dei singoli elementi grazie alle funzionalità di settaggio che comprendono la tipologia dei vetri a seconda della tecnica di lavorazione, le caratteristiche dimensionali-materiche dei singoli strati dell'elemento vetrato e la "rifinitura dei bordi" del sistema specchiatura.

10. Corrisponde allo spessore di ogni singola lastra di vetro stratificato di 5 mm e lo strato di PVB – polivinilbutirale – che viene descritto numericamente rispetto la quantità di lastre che vengono impiegate, considerando che lo spessore singolo è di 0,38 mm e in questo caso, poiché vengono impiegate due corrisponde a 0,76 mm. Infine, nelle prescrizioni aziendali viene inserito lo spessore della vetrocamera, ovvero 16 mm.

11. All'interno dell'Allegato 3, si nota che i singoli Mock-Up presentano due file di specchiature apparentemente identiche nelle dimensioni. Di fatti, la differenza risiede nell'aver messo in atto le variabili legate all'ingresso vetro, rispettivamente di 10 e 13 mm.

12. Canotto: elemento di connessione profilato sagomato per fornire continuità tra due profili cavi di un elemento dell'intelaiatura. Definizione tratta dalla scomposizione tassonomica all'interno del Paragrafo 1.4 "Il Curtain Wall e i sistemi connessi (componenti, elementi e materiali)" della presente tesi.

13. I Mock-Up saranno eretti nelle dimensioni e utilizzando i materiali dei sistemi di facciata reali, utilizzando anche gli stessi metodi di fissaggio presenti all'interno dei cataloghi Ponzio.

14. Si rimanda al Paragrafo 4.4 "Confronto tra i software di simulazione per la valutazione delle performance sismiche dei sistemi di facciata continua" per una disamina di confronto più approfondita condotta tra le due tipologie di software.

15. Queste due fasi, come espresso all'interno del Paragrafo 4.4, riguardano il primo – e forse più complesso – step dei software non convenzionali, il modello viene definito attraverso il modulo "pars" geometricamente e vengono assegnati i materiali dei singoli elementi, successivamente si procede verso la creazione del reticolo computazionale al fine di individuare i nodi del modello e sostituire, laddove fossero previsti, i giunti meccanici con il reticolo.

16. L'azienda Altair One sviluppa software "solver" in diversi ambiti, fluidi e dinamici, design industriale,

multifisica, strutturale, simulazione ecc. In quest'ultimo ambito, Altair propone una gamma di solver a seconda delle esigenze dei fruitori, come OptiStruct, HyperWorks, SimLab, SimSolid ecc. La presente ricerca si riserva dell'utilizzo di *SimSolid* grazie al rapporto di partnership.

17. Altair Software and Services SL con sede centrale a Madrid (Spagna) è un'azienda che fa parte del gruppo Altair One.

18. In particolar modo ci si riferisce all'Ing. Marco d'Alessio, sviluppatore dei software solver, il cui supporto ha permesso il raggiungimento delle competenze di base per l'utilizzo dello strumento di simulazione, ma anche un dialogo attivo per l'individuazione dei limiti critici che risiedono nel software.

19. Lo sviluppo del tool metodologico viene inteso come risultato e conseguimento di uno degli obiettivi prefissati in accordo con l'azienda partner Altair Software and Services SL.

20. Si ricorda, per maggiore chiarezza, che la verifica è stata effettuata su due Mock-Up uguali nell'assetto dimensionale ma diversi nell'assetto tecnologico del montante: asse unico e asse spezzato.

21. Considerando le funzionalità dei software parametrici, come emerso nel paragrafo 4.4, si riferisce ai vincoli geometrici, che collegano la posizione reciproca fra gli oggetti, quindi che indicheranno, ad esempio, se due elementi sono paralleli oppure a 45° gradi fra loro.

22. Uno dei vantaggi di utilizzare il software SimSolid risiede nella velocità di calcolo con cui questo strumento processa le attività di analisi, ciò grazie al superamento della fase di meshing precedentemente affrontata.

23. In ingegneria e scienza dei materiali, una curva sforzo-deformazione per un materiale fornisce la relazione tra sollecitazione e deformazione. Si ottiene applicando gradualmente il carico a un provino e misurando la deformazione, da cui è possibile determinare la sollecitazione e la deformazione.

24. Questa tipologia di analisi non rientra direttamente negli obiettivi prefissati per la fase di verifica, tuttavia può essere intesa come uno step utile per verificare lo stato delle connessioni che sono state create.

25. In questo senso, il riferimento alle indagini condotte attraverso lo studio del background scientifico, riportato all'interno del paragrafo 4.1., risulta una variabile imprescindibile per la costruzione delle condizioni più sfavorevoli.

26. La fase di snervamento, nella curva stress-deformazione, viene intesa come il passaggio deformazione elastica e plastica seguita da una fase di incrudimento che porta alla rottura del materiale come l'alluminio.

27. È importante conoscere il punto di rottura di qualsiasi materiale o campione utilizzato per applicazioni specifiche. Per diversi tipi di materiali, un unico modo per trovare il punto di rottura non sarà sufficiente. Ecco perché ci sono cinque teorie del fallimento per differenti tipi di materiale (duttile o fragile) e diverse modalità di rottura (taglio, tensione, deformazione, ecc.) Nel caso dei sistemi di facciata la teoria di fallimento più utilizzata è il criterio di Von Mises o "o teoria della distorsione". Questa teoria prende origine dall'osservazione che i materiali duttili soggetti ad uno

stato tensionale che provoca localmente una variazione di volume, ma non di forma, hanno una resistenza allo snervamento superiore rispetto al valore ottenuto dalle semplici prove di trazione.

28. Il BFL permette lo svolgimento di generali attività di ricerca in linea con le richieste di innovazione tecnologica in architettura e nel settore delle costruzioni si articola in differenti sezioni di lavoro con precise specificità, ovvero le sezioni: Mat&Com (caratterizzazioni materiche), Dimora (rilievo e modellazione), MobilLab (diagnostica ambientale), Noel (costruzioni in acqua ed energie da moto ondoso) e il TCLab, il cui responsabile scientifico è il Professore Martino Milardi.

29. La sezione TCLab, 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" METAcustered, SME-oriented European Open Innovation Test Bed for the BUILDING envelope materials industrial sector using a harmonised and upgraded technical framework and living LABS, che vede come Capofila la francese NOBATEK INEF4.

30. Questa sezione vuole rappresentare un'innovazione concettuale per il Testing Avanzato delle prestazioni in campo edilizio, nell'intenzione di superare il tradizionale metodo di trasferimento delle esperienze costruttive, puntando a realizzare processi innovativi mediante esperienze sperimentali guidate da processi e azioni che hanno come visione la validazione delle nuove performances che sono richieste dalla "città del futuro". Tratto da Trombetta, C., Cavanna, G., Grillo, E., Mandaglio, M., Musarella, C. C., Sansotta, S., & Milardi, M. (2022). Experimentation Processes for Building Envelope Innovation: The Building Future Lab. *Proceeding in: 5th International Conference on Building Energy and Environment, COBEE*. Montreal.

31. Il concetto di "misurazione" è stato più volte menzionato all'interno della presente ricerca con accezioni diverse che convergono verso lo stesso obiettivo: orientare la ricerca verso involucri altamente performanti. In questo caso l'accezione di misurazione è rivolta alle innovazioni in materia di prodotto come sinonimo di strumenti che siano in grado di valutare (misurare) le performance che si intendono asseverare.

32. Attraverso le strumentazioni e attrezzature di base vengono riprodotti i fenomeni ambientali e climatici, restituendo una simulazione che sia quanto più possibile sovrapponibile ai processi reali a cui sono sottoposti gli involucri edilizi.

33. Alcuni strumenti di supporto alle grandi attrezzature:
- Ventilatore UNI (~60 Km/h)
- Ventilatore AAMA / ASTM (~>190 Km/h)
- Ventilatore pressione (+ e -) 6000 pa
- Griglia Mobile Sprinkler per le prove di tenuta all'acqua
- Camera Ibrida con anello di guardia (e termoflussimetri) per le valutazioni dinamiche dei flussi termici
- Termocamera
- Accessoristica e Sensoristica per le valutazioni di tipo Fluidodinamico.

34. La scelta di adottare protocolli secondo procedure di prova basate sugli standard americani è giustificata dalla richiesta che giunge dai produttori dell'area europea che sempre più operano all'estero (Stati Uniti, ma anche Estremo e Medio Oriente), dove le norme ASTM e gli standard AAMA rappresentano i criteri di prova e certificazione più frequentemente utilizzati.

35. Il sistema di tamponamento costituisce un aspetto flessibile del Test Lab, in cui, a seconda delle richieste provenienti dai vari clienti, i processi di montaggio-smontaggio di tali pannelli consentono l'apertura del "foro" in cui saranno alloggiati i Mock-Up.

36. Questo requisito deriva da *Earthquake Safety Design of Windows*, pubblicato dalla Sheet Glass Association of Japan (NEHRP, 2000). Un'equazione simile si trova in Bouwkamp e Meehan (1960), che permette di valutare la deriva del piano necessaria a causare il contatto vetro-telaio in un determinato telaio rettangolare.

37. Il software SimSolid non consente di fatto di simulare le condizioni di servizio che sono state identificate all'interno del Method Statement.

38. Si fa riferimento alle attività condotte per un'azienda internazionale presso la sezione TCLab rispetto al sisma secondo la norma statunitense AAMA 501.6-01 "Recommended Dynamic Test Method for Determining the Seismic Drift Causing Glass Fallout from a Wall System". Sulla stessa facciata continua Stick System, che misurava 9000 x 6000 m, si è effettuato l'intero ciclo di permeabilità all'acqua e all'aria in regime statico e dinamico, la resistenza al carico del vento e quello agli urti.

39. La categoria E "eccezionale" si ottiene quando la permeabilità all'aria in tutte le fasi di pressione corrisponde ad una classe prestazionale maggiore di A₄, +10%. Tratto da UNI EN 12152:2003. Facciate continue Permeabilità all'aria Requisiti prestazionali e classificazione.

Riferimenti bibliografici

- Aiello, C., Caterino, N., Maddaloni, G., Bonati, A., Franco, A., & Occhiuzzi, A. (2018). Experimental and numerical investigation of cyclic response of a glass curtain wall for seismic performance assessment. *Construction and Building Materials*, 187, 596-609.
- Aiello, C., Caterino, N., Bonati, A., & Occhiuzzi, A. (2019). *The role of details for seismic performance of a full scale glass façade*.
- American Architectural Manufacturers Association. AAMA 501.1-05, (2017). Standard Test Method for Exterior Windows, Curtain Walls and Doors for Water Penetration Using Dynamic Pressur. AAMA.
- American Architectural Manufacturers Association. AAMA 501.4, (2018). Recommended Static Test Method for Evaluating Curtain Wall and Storefront Systems Subjected to Seismic and Wind Induced Interstory Drifts. American Architectural Manufacturers Association. Schaumburg, IL, USA, 30.
- American Architectural Manufacturers Association. AAMA 501.6, (2018). Recommended Dynamic Test Method for Determining the Seismic Drift Causing Glass Fallout from a Wall System. American Architectural Manufacturers Association. Schaumburg, IL, USA.
- American Society for Testing and Materials International. ASTM E 331-00, (2009). Test Method for Water Penetration of Exterior Windows, Skylights, Doors, and Curtain Walls, by Uniform Static Air Pressure Difference. ASTM.
- American Society for Testing and Materials International. ASTM E 330-02, (2010). Test Method for Structural Performance of Exterior Windows, Doors, Skylights, and Curtain Walls, and Doors by Uniform Static Air Pressure Difference. ASTM.
- American Society for Testing and Materials International. ASTM E 283-04, (2012). Test Method for Determining Rate of Air Leakage Through Exterior Windows, Curtain Walls, and Doors under Specified Pressure Differences Across the Specimen. ASTM.
- Bedon, C., & Amadio, C. (2018). Numerical assessment of vibration control systems for multi-hazard design and mitigation of glass curtain walls. *Journal of Building Engineering*, 15, 1-13.
- Bedon, C., Honfi, D., Machalická, K. V., Eliášová, M., Vokáč, M., Kozłowski, M., ... & Portal, N. W. (2019). Structural characterisation of adaptive facades in Europe-Part II: Validity of conventional experimental testing methods and key issues. *Journal of Building Engineering*, 25, 100797.
- Behr, R. A., Belarbi, A., & Culp, J. H. (1995). Dynamic racking tests of curtain wall glass elements with in-plane and out-of-plane motions. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 24(1), 1-14.
- Behr, R. A., & Belarbi, A. (1996). Seismic test methods for architectural glazing systems. *Earthquake Spectra*, 12(1), 129-143.
- Behr, R. A. (1998). Seismic performance of architectural glass in mid-rise curtain wall. *Journal of Architectural Engineering*, 4(3), 94-98.
- Behr, M. (2008). Simplex space-time meshes in finite element simulations. *International journal for numerical methods in fluids*, 57(9), 1421-1434.
- Behr, R. A. (Ed.). (2009). *Architectural glass to resist seismic and extreme climatic events*. Elsevier.
- Bouwkamp, J. G., & Meehan, J. F. (1960). Drift limitations imposed by glass. *Proceedings of the Second World Conference on Earthquake Engineering*. Tokyo, Japan.
- Cardarelli, S. (2021). *Analisi comparativa delle procedure di calcolo per il dimensionamento statico di vetrocamere. Definizione di un metodo analitico per la valutazione del load sharing di composizioni vetrate isolanti*.
- Casagrande, L., Bonati, A., Occhiuzzi, A., Caterino, N., & Auricchio, F. (2019). Numerical investigation on the seismic dissipation of glazed curtain wall equipped on high-rise buildings. *Engineering Structures*, 179, 225-245.
- Caterino, N., Del Zoppo, M., Maddaloni, G., Bonati, A., Cavanna, G., & Occhiuzzi, A. (2017). Seismic assessment and finite element modelling of glazed curtain walls. *Structural Engineering and Mechanics*, 61(1), 77-90.
- FEMA 273, NEHRP. (1997). Guidelines for The Seismic Rehabilitation of Buildings. Federal Emergency Management Agency, FEMA. Washington, D.C.
- FEMA 450. (2003). Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures. Federal Emergency Management Agency, FEMA. Washington, D.C.
- FEMA E-74 (2011). Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage – A Practical Guide. Federal Emergency Management Agency, FEMA. Washington, D.C.
- Galli, U. (2012). *Seismic behaviour of curtain wall facades: a comparison between experimental mock up test and finite element method analysis*.

- Gerasimova, E., Galyamichev, A., & Dogru, S. (2020). Stress-strain state of insulated glass unit in structural glazing systems. *Magazine of Civil Engineering*, 6 (98), 9808.
- Huang, B., Chen, S., Lu, W., & Mosalam, K. M. (2017). Seismic demand and experimental evaluation of the non-structural building curtain wall: A review. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 100, 16-33.
- Lee, H., Oh, M., Seo, J., & Kim, W. (2021). Seismic and energy performance evaluation of large-scale curtain walls subjected to displacement control fasteners. *Applied Sciences*, 11(15), 6725.
- 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. *AGATHON| International Journal of Architecture, Art and Design*, 7, 26-33.
- Lucarelli, M. T., Milardi, M., Trombetta, C., Mandaglio, M., Musarella, C. C., Sansotta, S., & Grillo, E. (2020b). Controllo prestazionale del rapporto edificio/contesto. Esperienze di testing avanzato. In: Losasso, M., Lucarelli, M. T., Rigillo, M., & Valente, R. (2020). *Adattarsi al clima che cambia. Innovare la conoscenza per il progetto ambientale*, pp. 145-150. Rimini: Maggioli Editore. ISBN: 9788891643186.
- Memari, A. M., Behr, R. A., & Kremer, P. (2000). Toward development of a predictive model for drift limits in architectural glass under seismic loadings. In *Proceedings*.
- Memari, A. M., Behr, R. A., & Kremer, P. A. (2003). Seismic behavior of curtain walls containing insulating glass units. *Journal of architectural engineering*, 9(2), 70-85.
- Memari, A. M., Behr, R. A., & Kremer, P. A. (2004). Dynamic racking crescendo tests on architectural glass fitted with anchored pet film. *Journal of architectural engineering*, 10(1), 5-14.
- Memari, A. M., Shirazi, A., & Kremer, P. A. (2007). Static finite element analysis of architectural glass curtain walls under in-plane loads and corresponding full-scale test. *Structural Engineering and Mechanics*, 25(4), 365-382.
- Memari, A. M., Shirazi, A., Kremer, P. A., & Behr, R. A. (2011). Development of finite-element modeling approach for lateral load analysis of dry-glazed curtain walls. *Journal of architectural engineering*, 17(1), 24-33.
- Memari, A. M., Simmons, N., & Solnosky, R. L. (2021). Derivation of Kinematic Equations Based on Full-Scale Racking Tests for Seismic Performance Evaluation of Unitized Four-Sided Structural Sealant Glazing Curtain Wall Systems. *Buildings*, 11(12), 593.
- Milardi, M. (2020). Test, Simulazioni, Protocolli, Attività on site e in Laboratorio. In: Losasso, M., Lucarelli, M. T., Rigillo, M., & Valente, R. (2020). *Adattarsi al clima che cambia. Innovare la conoscenza per il progetto ambientale*, pp. 145-150. Rimini: Maggioli Editore. ISBN: 9788891643186.
- 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.
- Nawrotek, M. (2022). *Analysis of glazing of a historic public building taking into account the linear flexibility of glass pane supports and thin plate theory aspects* (Doctoral dissertation, Instytut Inżynierii Budowlanej).
- O'Brien, W. C., Memari, A. M., & Eeri, M. (2015). Prediction of seismic cracking capacity of glazing systems. *Earthquake and Structures*, 8(1), 101-132.
- Ogata, S., Kobayashi, I., & Fukuchi, Y. (1998). Consensus Making with Virtual Model for Construction Project. In the *Eighth International Conference on Artificial Reality and Tele-Existence*, 1217-1226.
- Pantelides, C. P., Truman, K. Z., Behr, R. A., & Belarbi, A. (1996). Development of a loading history for seismic testing of architectural glass in a shop-front wall system. *Engineering Structures*, 18(12), 917-935.
- Rizzo, F., Franco, A., Bonati, A., Maddaloni, G., Caterino, N., & Occhiuzzi, A. (2021, February). Predictive analyses for aerodynamic investigation of curtain walls. *Structures* 29, 1059-1077. Elsevier.
- Sucuoglu, H., & Vallabhan, C. G. (1997). Behaviour of window glass panels during earthquakes. *Engineering structures*, 19(8), 685-694.
- Serafinavicius, T., Kvedaras, A. K., & Sauciuenas, G. (2013). Bending behavior of structural glass laminated with different interlayers. *Mechanics of composite materials*, 49(4), 437-446.
- Trombetta, C., & Milardi, M. (2015). BUILDING FUTURE Lab.: a great infrastructure for testing. *Energy procedia*, 78, 657-662.
- Trombetta, C., Cavanna, G., Grillo, E., Mandaglio, M., Musarella, C. C., Sansotta, S., & Milardi, M. (2022). Experimentation Processes for Building Envelope Innovation: The Building Future Lab. *Proceeding in: 5th International Conference on Building Energy and Environment, COBEE*. Montreal.
- Truman, K. Z., Pantelides, C., Behr, R., & Belarbi, A. (1996). Comparison of linear and nonlinear seismic drift histories for midrise steel frames. *Engineering structures*, 18(8), 577-588.
- UNI EN 12153:2002: Curtain Walling – Air Permeability – Test Method. CEN.

UNI EN 12155:2002: Curtain Walling – Watertightness – Laboratory Test Under Static Pressure. CEN.

UNI EN 12179:2002: Curtain Walling – Resistance to Wind Load. CEN.

UNI EN 13050:2011: Curtain Walling – Watertightness – Laboratory Test under Dynamic Condition of Air Pressure and Water Spray. CEN.

UNI EN 13830:2015: Facciate continue – Norma di prodotto.

Allegati

Allegato 1: Verifiche strutturali per il dimensionamento dei montanti

Allegato 2: Abaco degli elementi del Project Mock-Up (PMU)

Allegato 3: Prospetto dei due Project Mock-Up (PMU)

Allegato 4: Disegni tecnici e distinte di lavorazione dei profili estrusi

Allegato 5: Assetto delle connessioni del Mock-Up1 su SimSolid

Allegato 6: Tool metodologico di supporto per lo sviluppo delle analisi su software SimSolid

Allegato 7: Post-processing. Analisi lineare condotta su Mock-Up1 con spostamento di 25mm

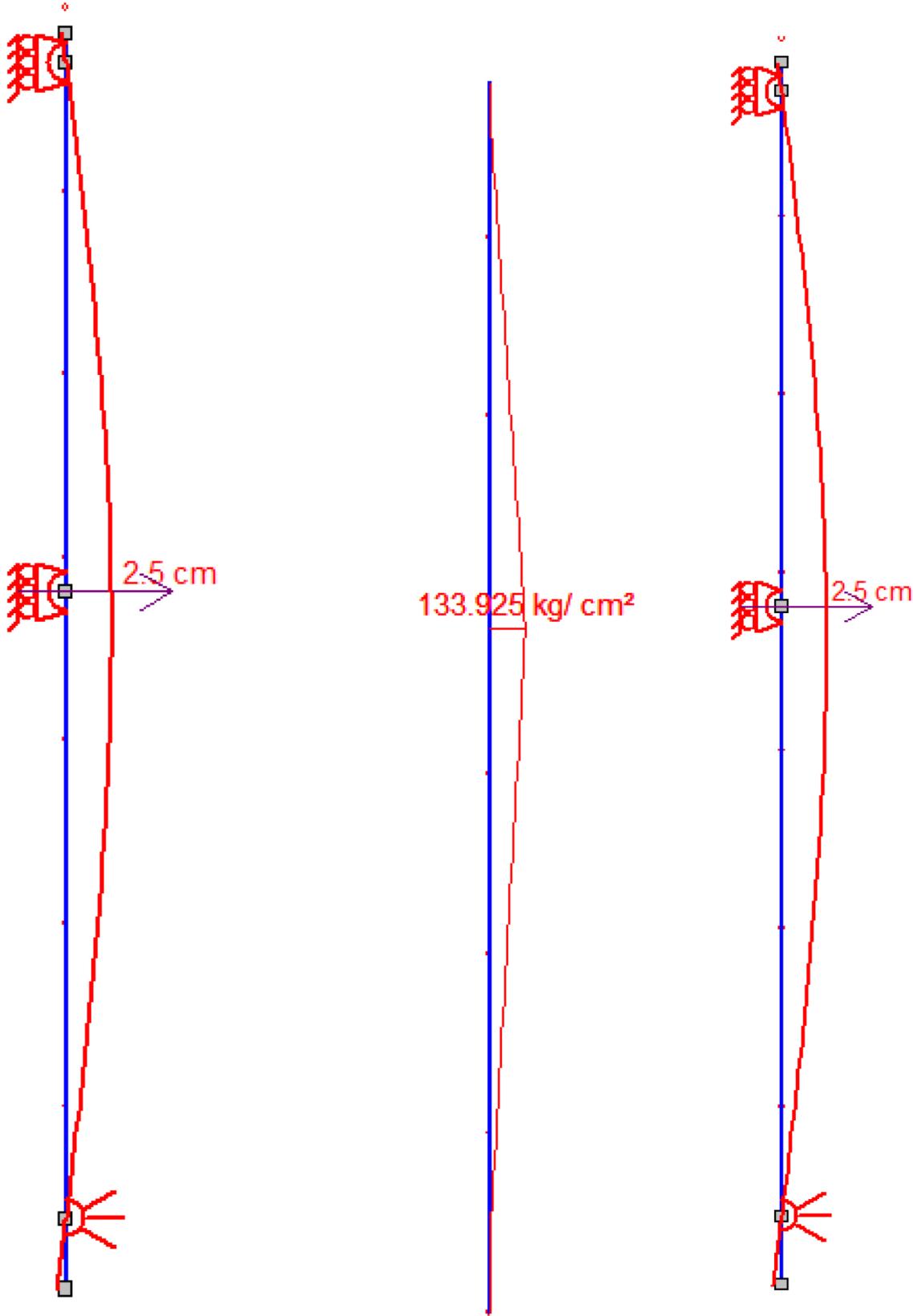
Allegato 8: Configurazione completa del Mock-Up1 con sistema di travi del Test Lab

Allegato 9: Definizione dei vincoli del Digital Mock-Up e relativo spostamento di 75mm

Allegato 10: Post-processing. Analisi lineare condotta su Mock-Up1 con spostamento di 75mm

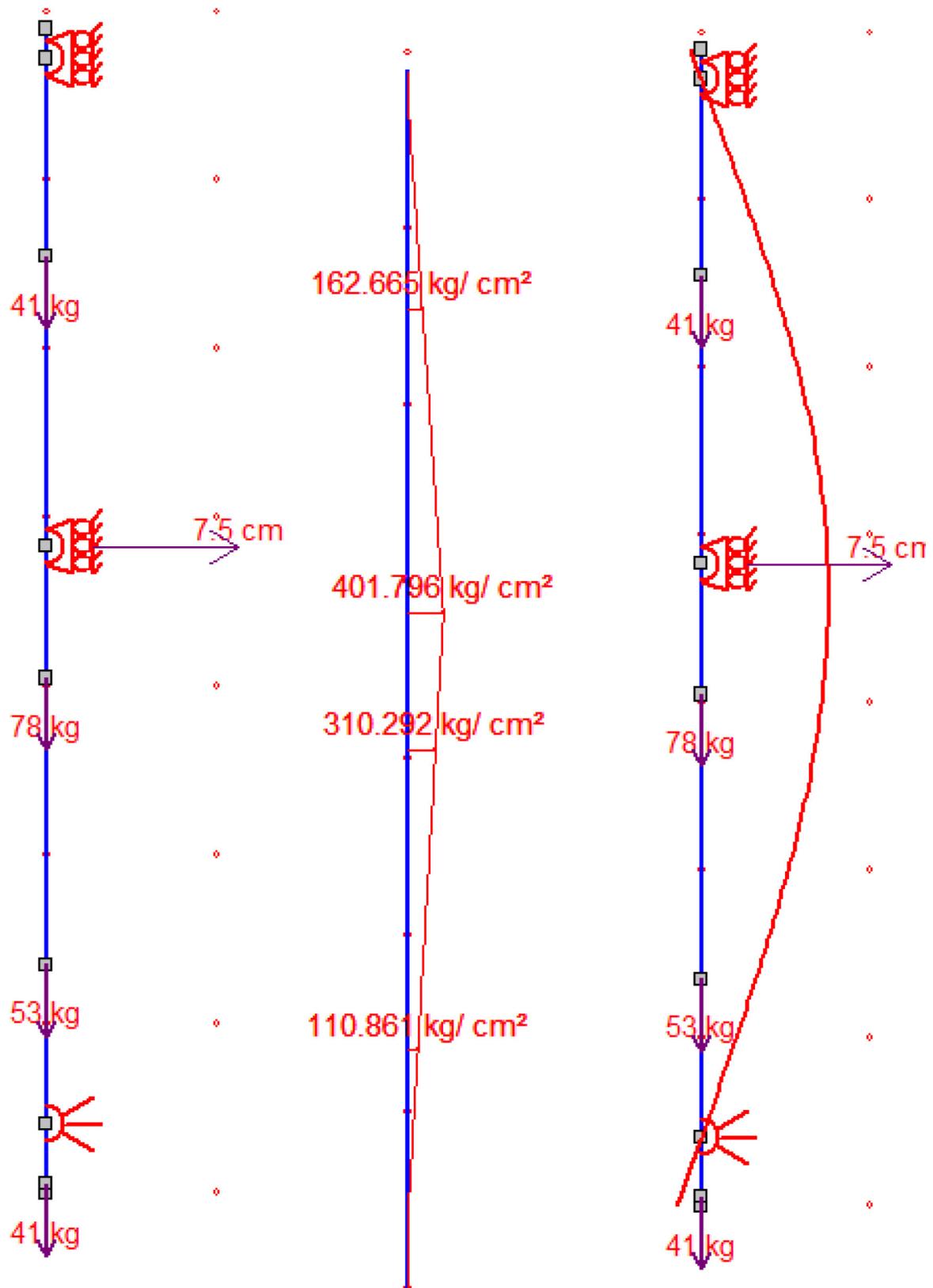
Allegato 11: Method Statement dei due Project Mock-Up (PMU)

Spostamento 25mm



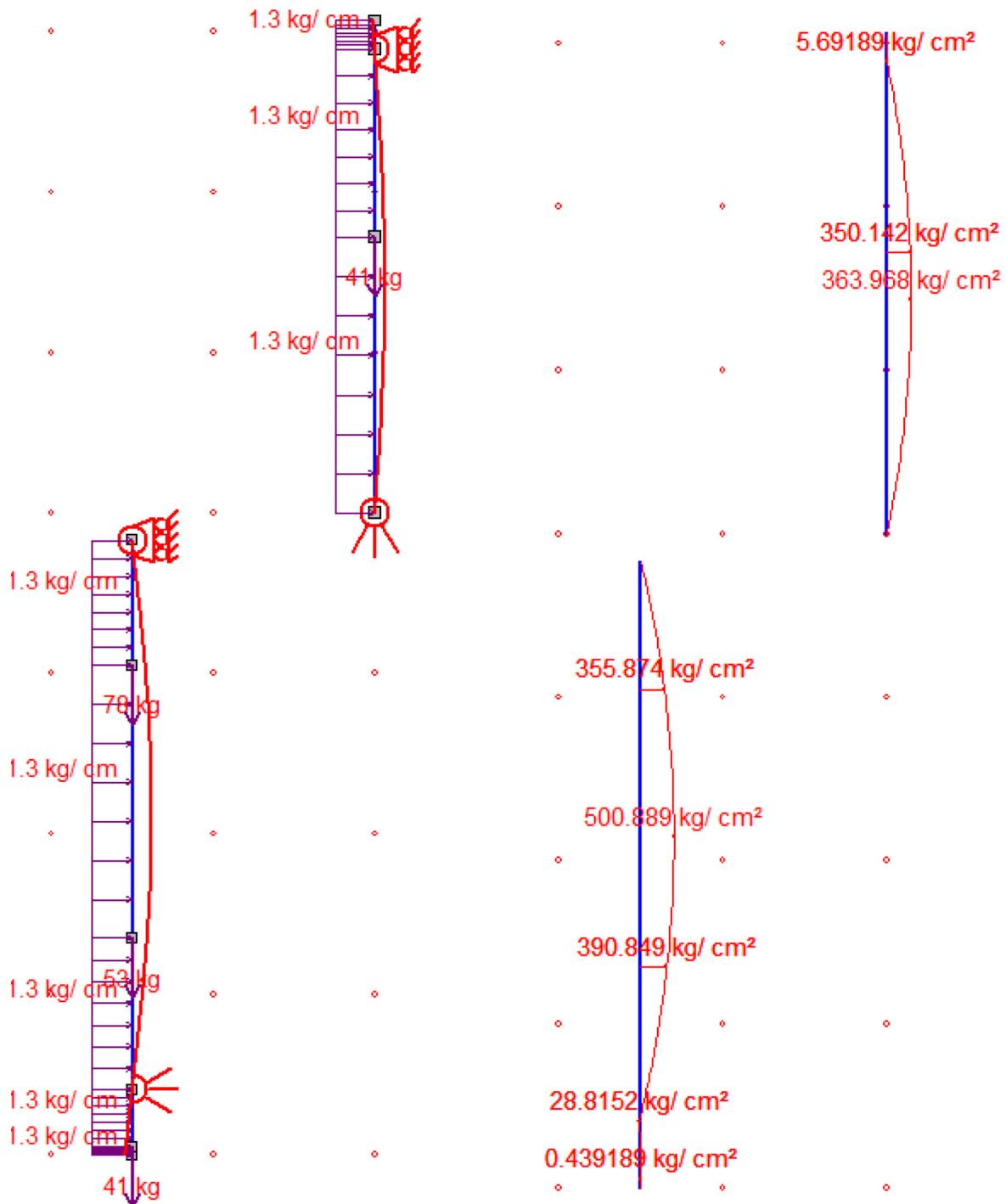
Verifiche condotte dall'Ing. Vincenzo Di Diadoro, azienda Ponzio s.r.l.

Spostamento 75mm



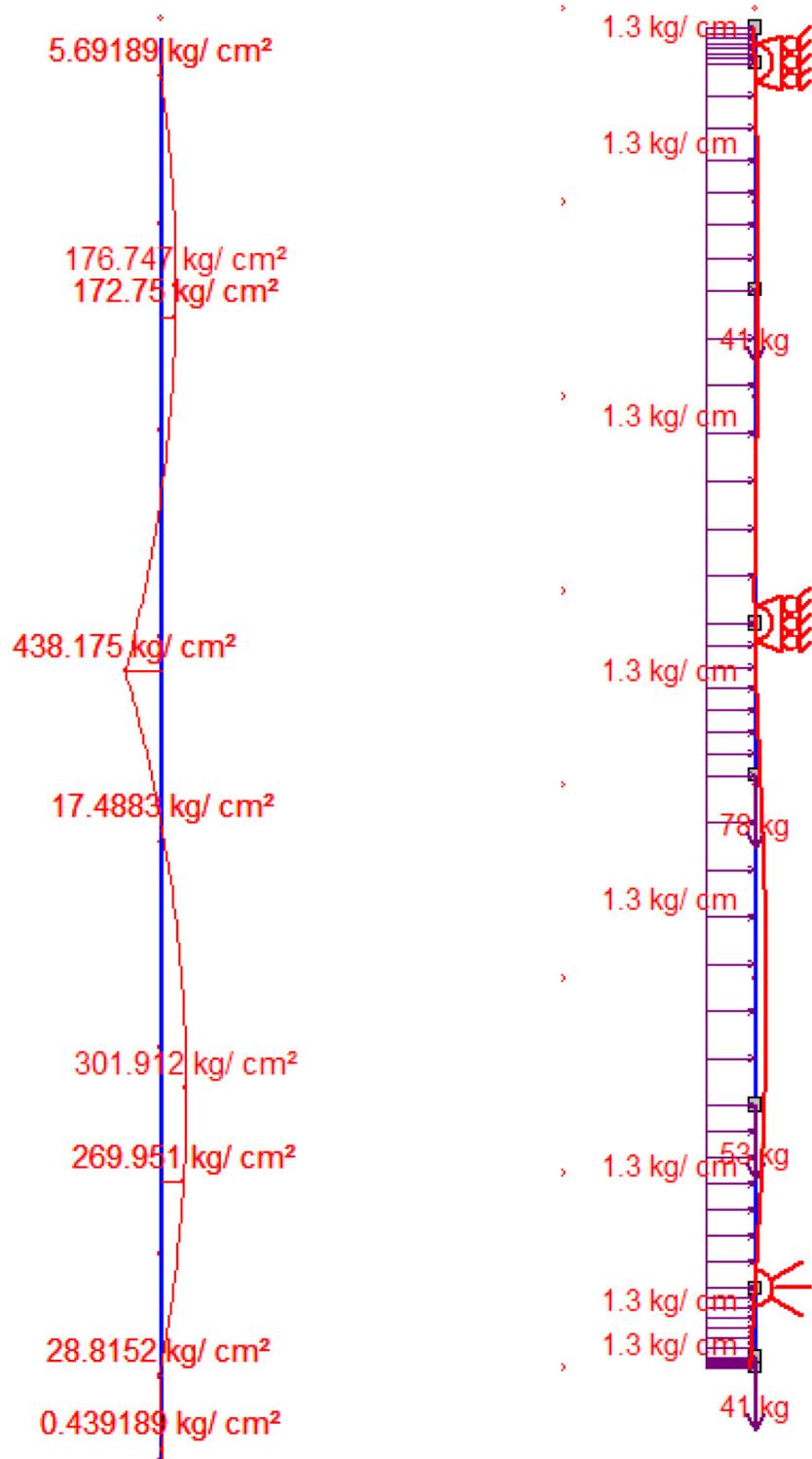
Verifiche condotte dall'Ing. Vincenzo Di Diadoro, azienda Ponzio s.r.l.

Montante 1



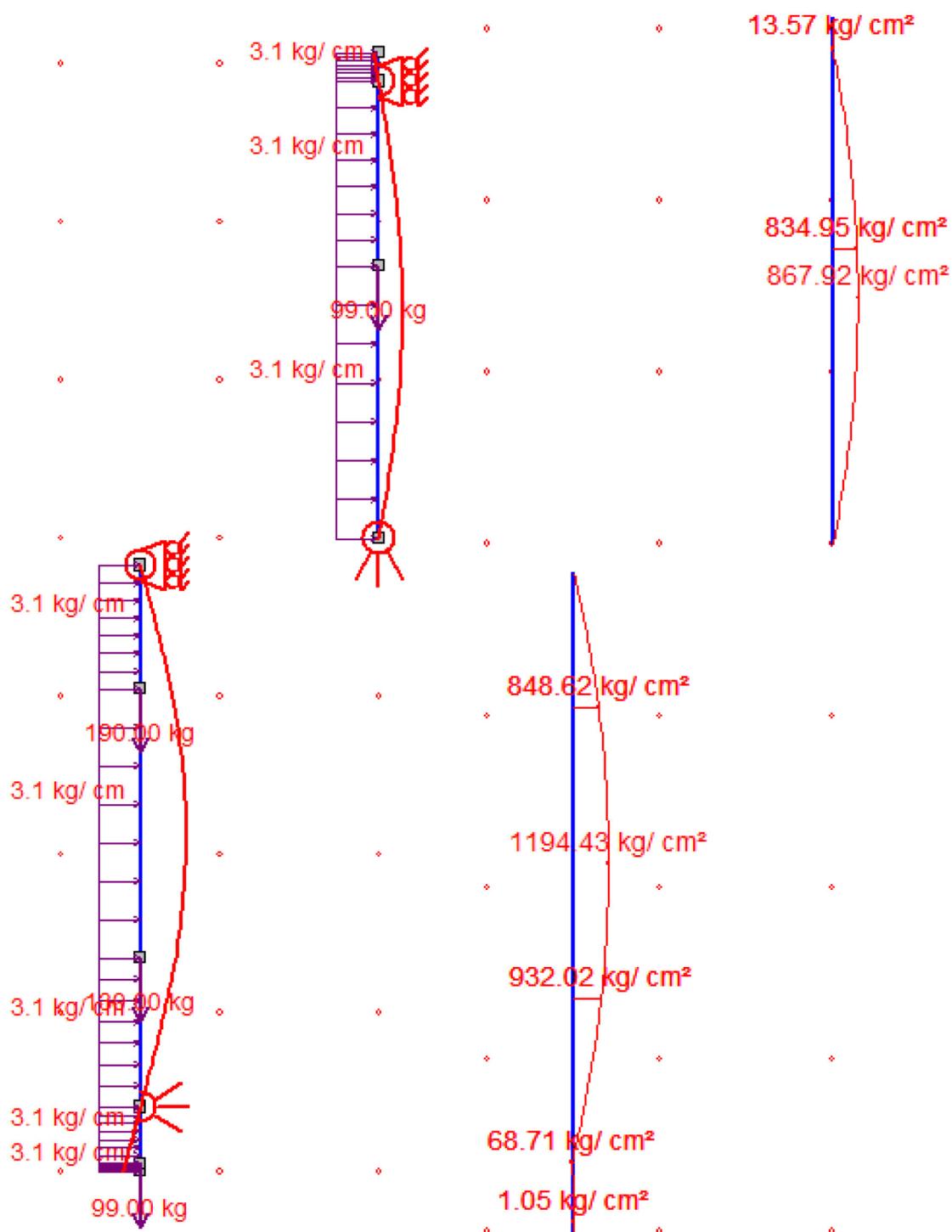
Verifiche condotte dall'Ing. Vincenzo Di Diadoro, azienda Ponzio s.r.l.

Montante 1



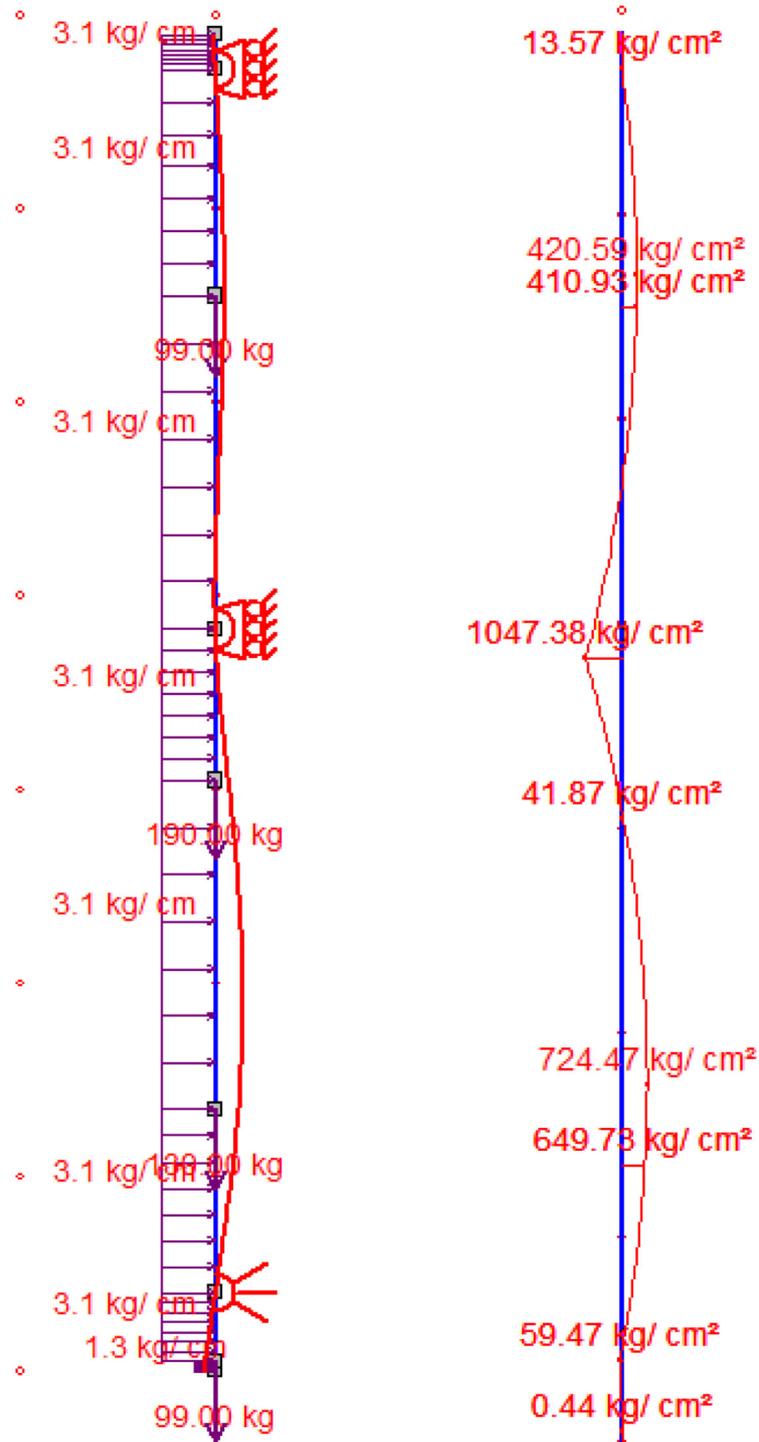
Verifiche condotte dall'Ing. Vincenzo Di Diadoro, azienda Ponzio s.r.l.

Montante 2



Verifiche condotte dall'Ing. Vincenzo Di Diadoro, azienda Ponzio s.r.l.

Montante 2



Verifiche condotte dall'Ing. Vincenzo Di Diadoro, azienda Ponzio s.r.l.

ANALISI MATERIALI FACCIATA CONTINUA		
PROFILI ALLUMINIO		
DISEGNO	QUANTITA' / UNITA' (NECESSARIO)	DESCRIZIONE
	18 x 7 m (123,9 m)	MONTANTE DA 125 MM
	14 x 7 m (88,8 m)	TRAVERSO DA 130 MM
	31 x 7 m (210,6 m)	PRESSORE
	14 x 7 m (87,0 m)	CARTER DA 15MM SQUADRATO
	18 x 7 m (123,9 m)	CARTER DA 20MM SQUADRATO

PROFILI ALLUMINIO TAGLIO TERMICO		
DISEGNO	QUANTITA' / UNITA' (NECESSARIO)	DESCRIZIONE
	6 x 6,5 m (34,2 m)	PROF. JOLLY PER ABBINAMENTO

ANALISI MATERIALI FACCIATA CONTINUA		
ACCESSORI		
DISEGNO	QUANTITA' / UNITA' (NECESSARIO)	DESCRIZIONE
	1 Conf. @ 50 pz. (24)	CAVALLOTTO IN ALLUMINIO PRESSOFUSO
	2 Conf. @ 5 pz. (9)	CAN.IN ALL.X MONT.250.007-250
	5 Conf. @ 20 pz. (96)	CAVALLOTTO IN ALL.PREF.X TRAV.250.008
	9 Conf. @ 10 pz. (90)	STAFFA ANCOR.A SOLAIO X MONTANTI
	61 pz. * 3,5 m (61)	DISTANZIALE TERMICO MM 32
	120 pz. (120)	TAPPO TENUTA TRAVERSO
	2 Conf. @ 20 pz. (27)	BECCUCCIO X DREN.ACQUA MONTAN.
	120 pz. (120)	TAPPO TENUTA X PRESSORI
	3 Conf. @ 100 pz. (240)	VITE X MONTAGGIO TRAV 4,2X17 AFO INOX
	6 Conf. @ 20 pz. (108)	BOCCOLA CON RONDELLA ZIGR.E TEFL.STAFFE MN
	1 Conf. @ 100 pz. (96)	VITI AUTOF.INOX 4,8X16MM X FIXSUPP VETRO
	4 Conf. @ 100 pz. (384)	VITI 4,8X20 TCBX25 INOX
	11 Conf. @ 100 pz. (1.008)	VITI 4,8X50 TCBX25 INOX
	1 Conf. @ 50 pz. (12)	SUPP.IN ALL. X VETRO 28-30-32 MM (H=7MM)
	1 Conf. @ 50 pz. (48)	SUP.IN ALL.X VETRO 34-36-38 MM (H7MM)
	1 Conf. @ 50 pz. (12)	TASSELLI PVC H=1MM V.STR.E V. INT AP.SP.
	2 Conf. @ 50 pz. (96)	TASSELLO VETRO PVC 100X40X3
	1 Conf. @ 50 pz. (48)	SUP.IN ALL.X VET.PESANTE 34-36-38
	3 Conf. @ 50 pz. (108)	BULLONE ANCORAGGIO MONTANTI
	4 Conf. @ 120 m (440,51)	GUARNIZIONE PRESSORE MM 4
	3 Conf. @ 80 m (205,67)	GUARNIZIONE MONTANTE MM 10
	2 Conf. @ 100 m (144,13)	GUARNIZIONE TRAVERSO MM 4

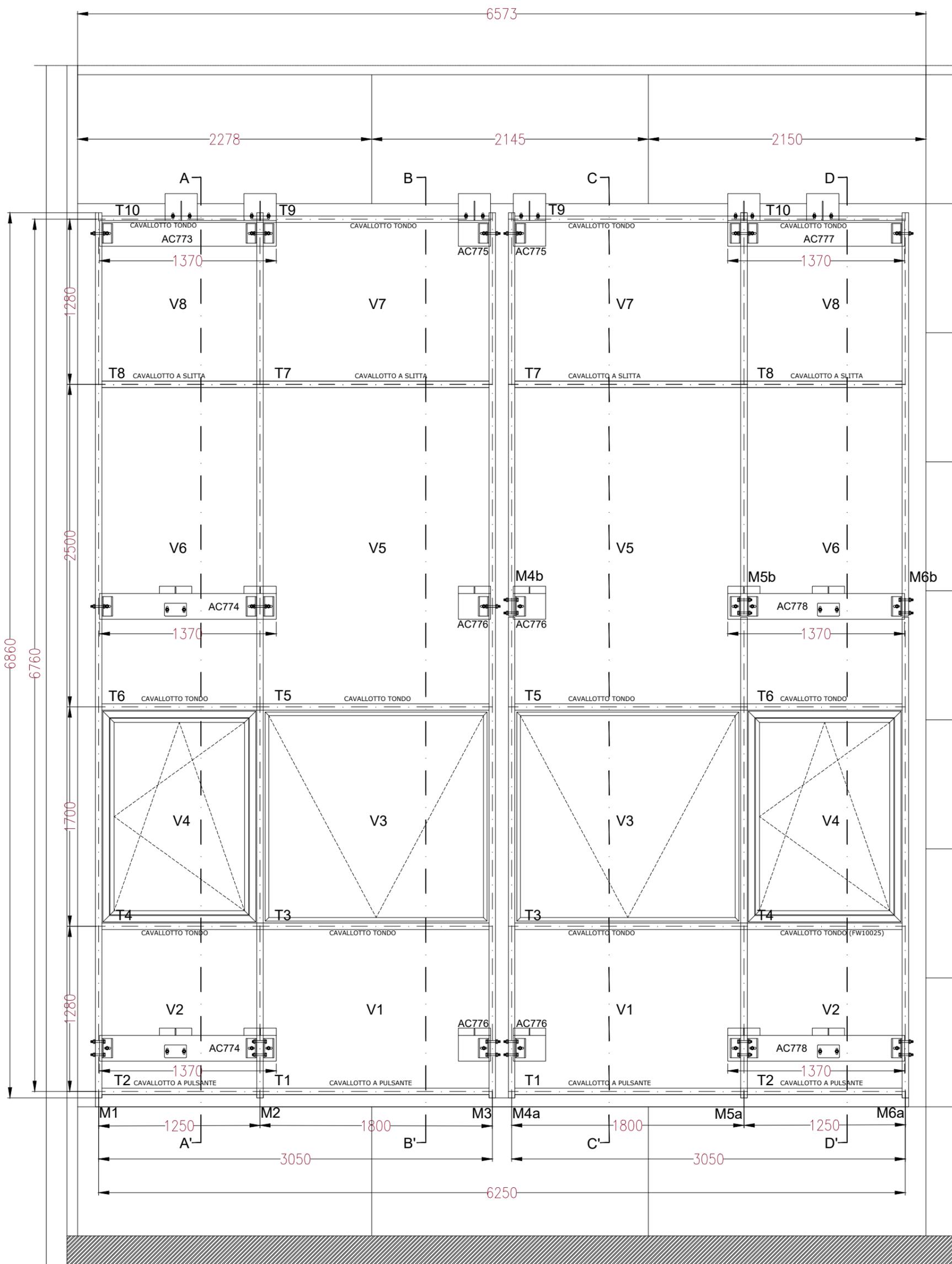
ANALISI MATERIALI SPORGERE		
PROFILI ALLUMINIO		
DISEGNO	QUANTITA' / UNITA' (NECESSARIO)	DESCRIZIONE
	11 x 7 m (75,2 m)	RIDUTTORE VETRO DA 12 MM
	8 x 6,5 m (40,2 m)	SUPPORTO VETRO 10
	5 x 6,5 m (29,5 m)	FERM.RETTANG.DOPPIO SCATTO16MM

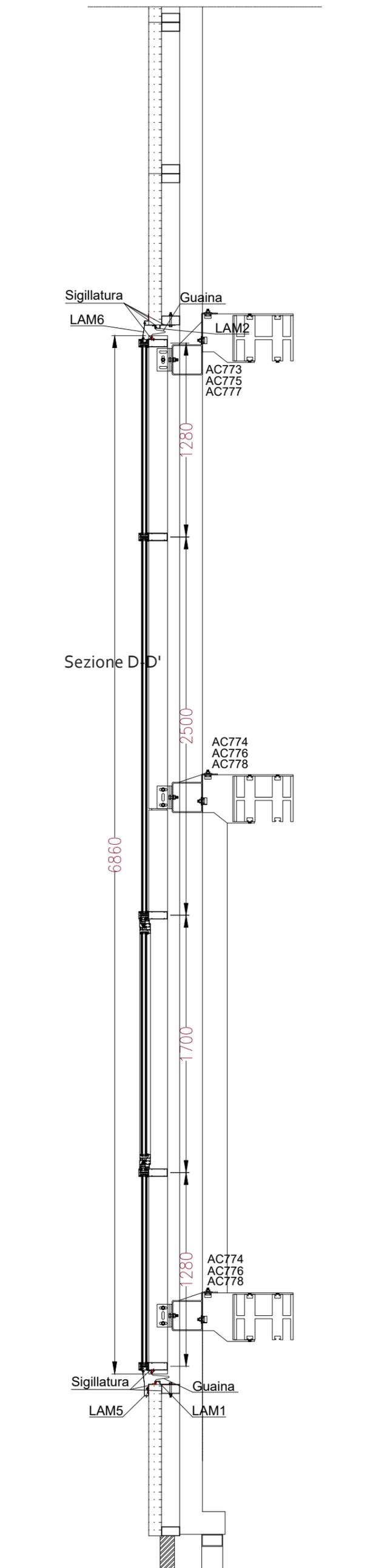
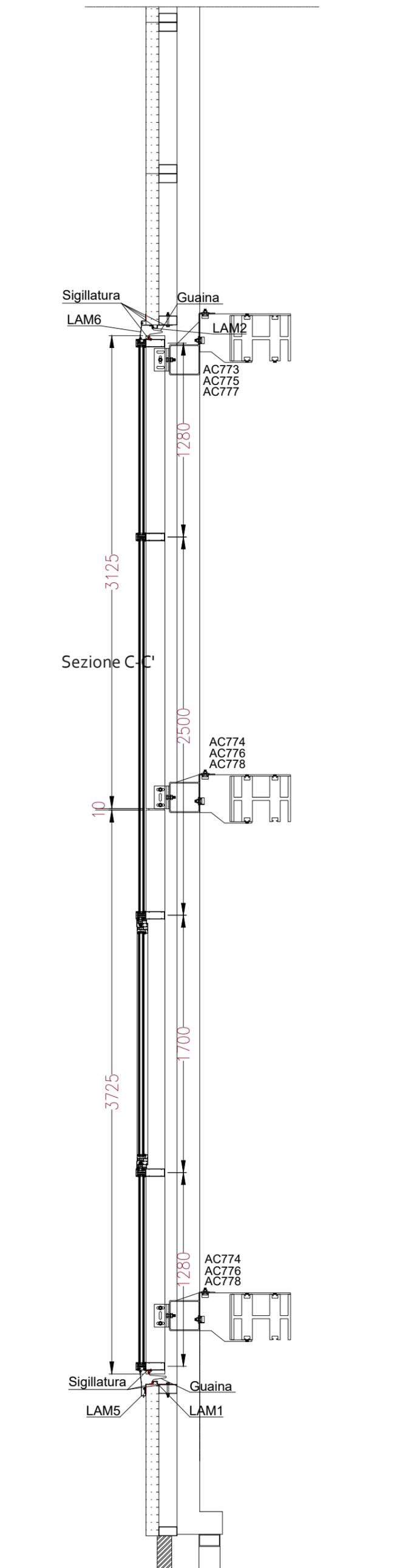
ANALISI MATERIALI SPORGERE		
PROFILI ALLUMINIO TAGLIO TERMICO		
DISEGNO	QUANTITA' / UNITA' (NECESSARIO)	DESCRIZIONE
	8 x 6,5 m (41,6 m)	TELAIO A SPORGERE X MONTANTE
	8 x 6,5 m (40,1 m)	ANTA SPORGERE PER P6 MONT.TRAV
	6 x 6,5 m (33,3 m)	TELAIO A "L"
	6 x 6,5 m (32,2 m)	ANTA "Z" PIANA

ANALISI MATERIALI SPORGERE

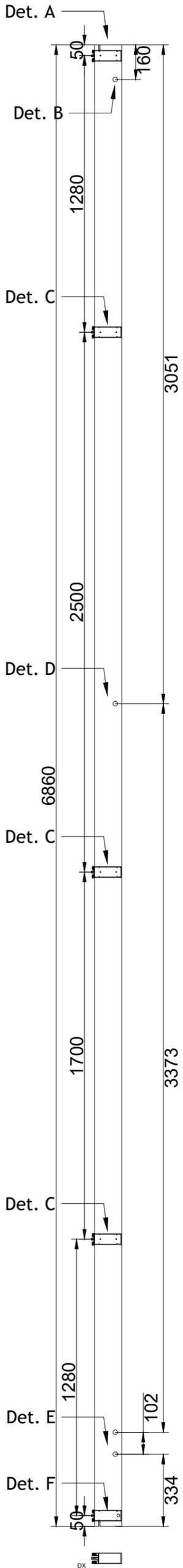
ACCESSORI

DISEGNO	QUANTITA' / UNITA' (NECESSARIO)	DESCRIZIONE
	6 pz. (6)	KIT VITI MONT.ACC.ANTE SPORGERE
	6 pz. (6)	KIT ANGOLI VULC.XSPORG.SEMISTR.FW40013-14-19
	6 pz. (6)	CP BRACCI INOX L683 P.180X SPORG
	6 pz. (6)	COPPIA REGOLATORI BRACCI IN ALTEZZA
	1 Conf. @ 20 pz. (6)	KIT INNESTO CRE.SA873/2X SPORGERE
	1 Conf. @ 10 pz. (6)	KIT CHIUSURA 6 PUNTI XSPORGERE
	1 Conf. @ 50 pz. * 2,2 m (14)	ASTINA COM.PREFORATA 2,2M XSPO
	1 Conf. @ 10 pz. (6)	CREMONESE X A/R LOUISE GREZZO
	96 pz. (96)	VITE 5X14 XSQ.WA10010/WA10011/NT6002
	96 pz. (96)	GRANO 4MM INOX XSQ WH10008/09/NT6001/5
	96 pz. (96)	SPINA X SQ.WH10008/WA10009/NT6001/NT6005
	48 pz. (48)	SQUAD.INT.23X14 CIAN./SPIN./AVVITARE
	24 pz. (24)	SQUAD.A TIRAGGIO X ANTE LINEA PIANA
	24 pz. (24)	SQUADR.ALL.ALETTE EST.WS 65TT.
	96 pz. (96)	SQUAD.EST.6,4X12,4 CIAN/SPIN/AVVITARE
	1 Conf. @ 50 pz. (24)	ANGOLO X GUARN.GA WH40011
	24 pz. (24)	TASSELLO PVC X APPOGGIO VETRI
	48 pz. (48)	SQUADR.IN PRESS.FUSO 23X14 FIL
	24 pz. (24)	SQUADR.ESTERNA ALLINEAM.ALETTE
	1 Conf. @ 60 m (40,79)	GUARNIZIONE MONTANTE MM 12
	1 Conf. @ 80 m (35,84)	GUARNIZIONE TRAVERSO MM 6
	1 Conf. @ 60 m (38,91)	GUARNIZIONE TRAVERSO MM 8

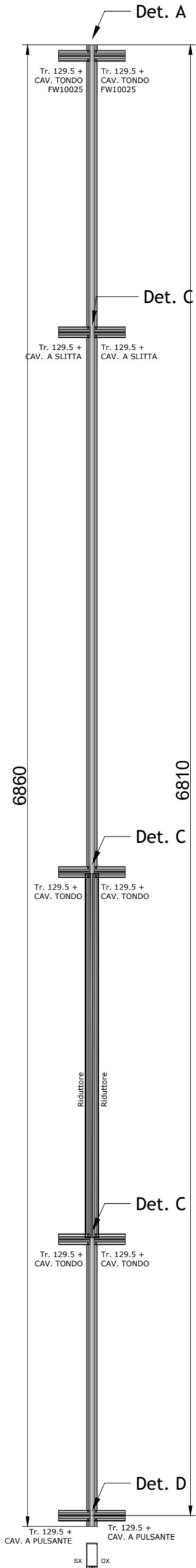




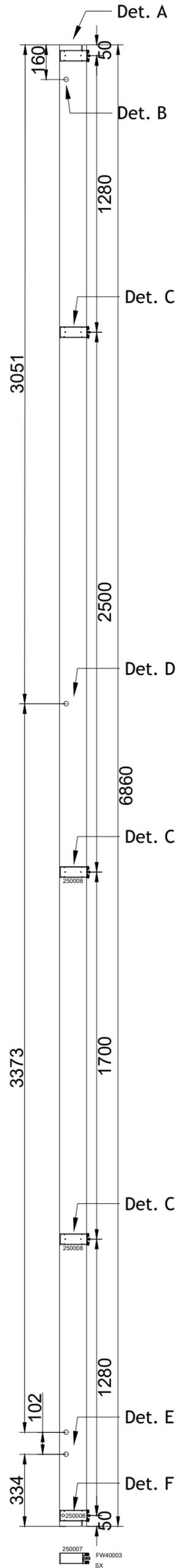
Vista da DX



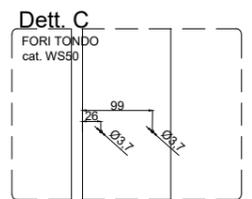
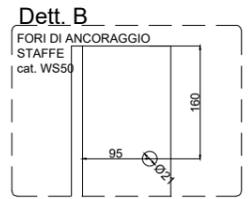
Vista frontale



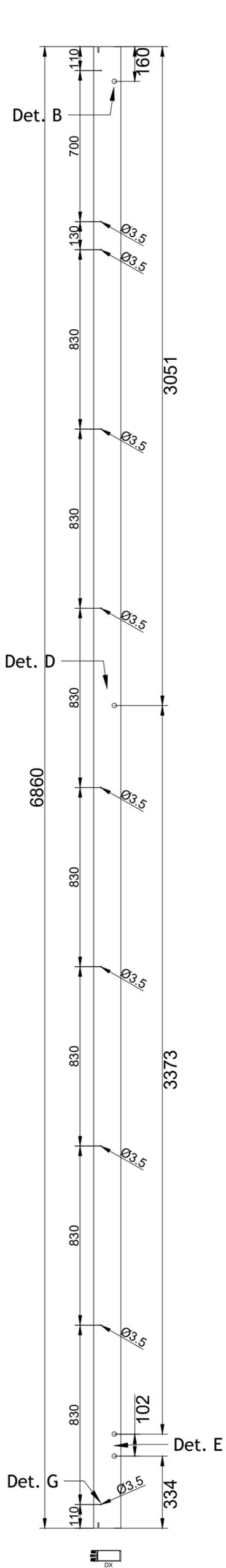
Vista da SX



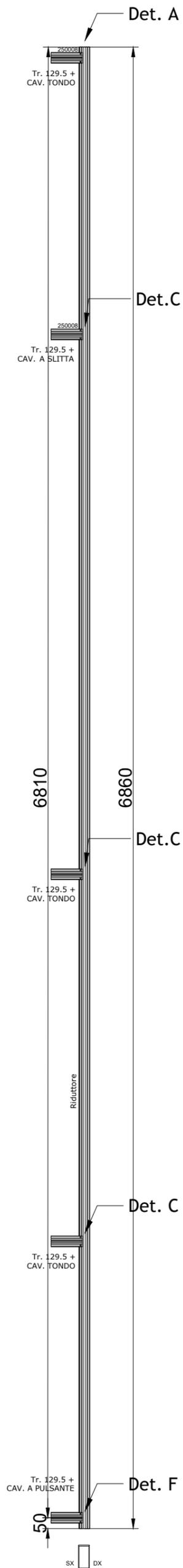
Vista dall'esterno



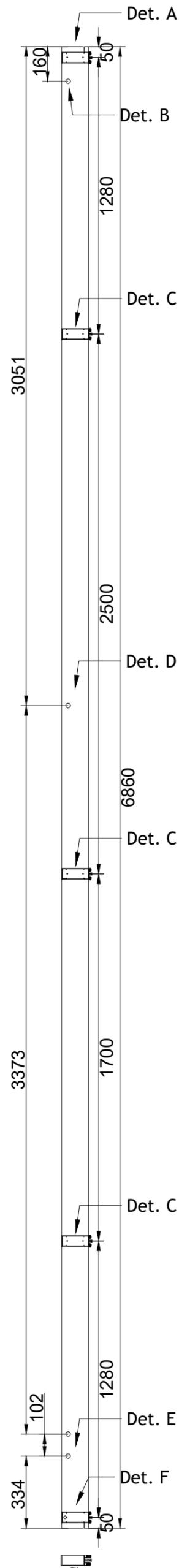
Vista da DX



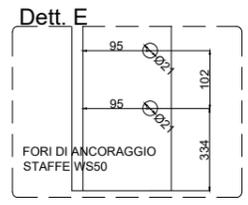
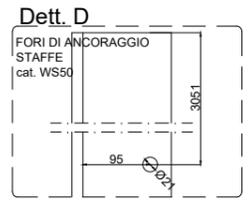
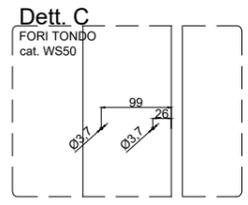
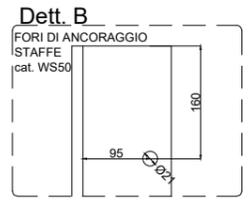
Vista frontale



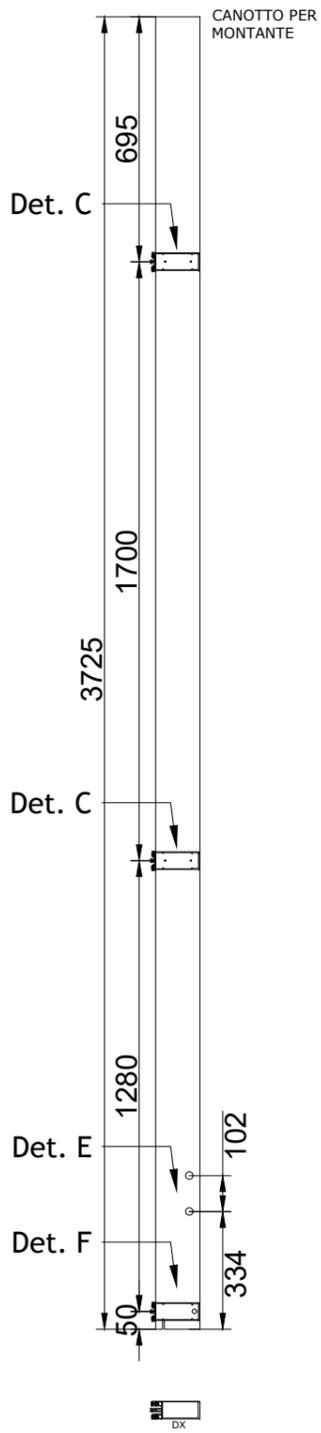
Vista da SX



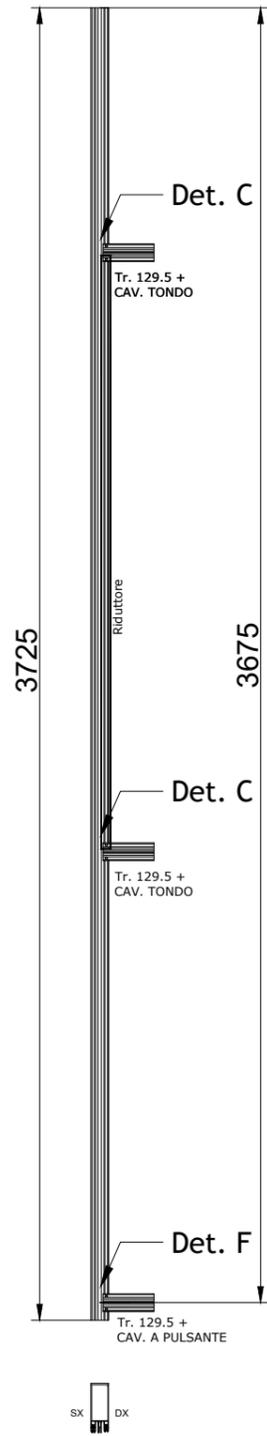
Vista dall'esterno



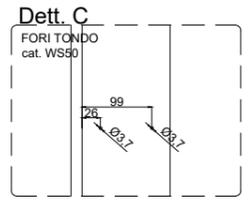
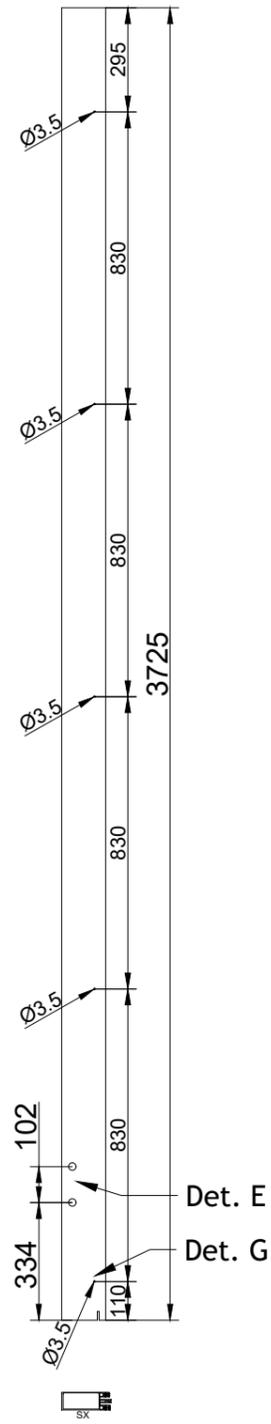
Vista da DX



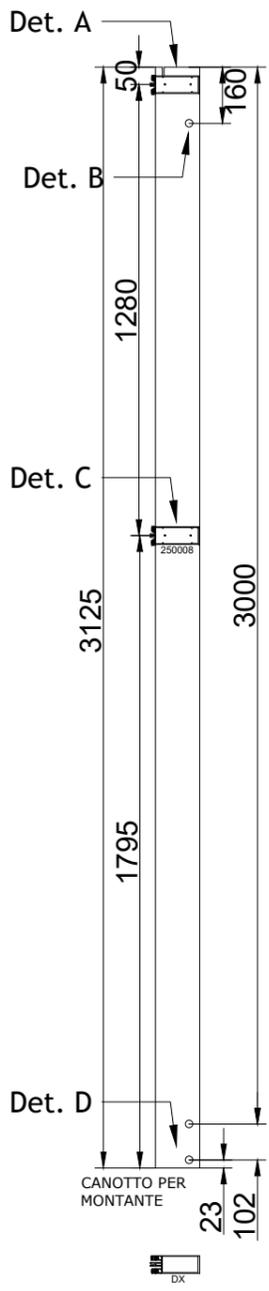
Vista frontale



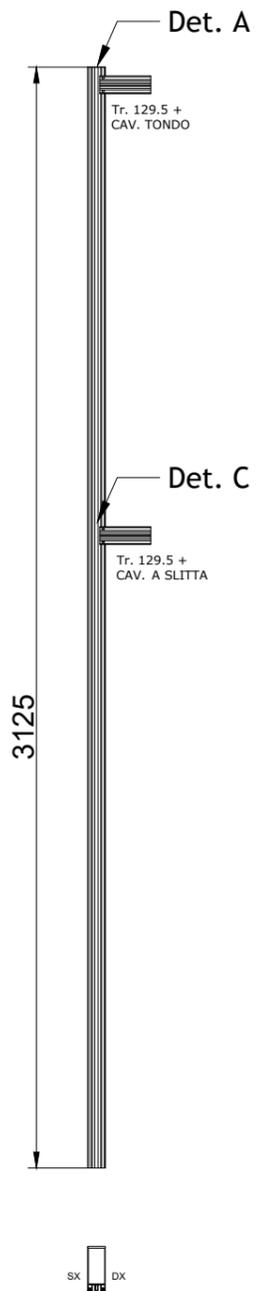
Vista da SX



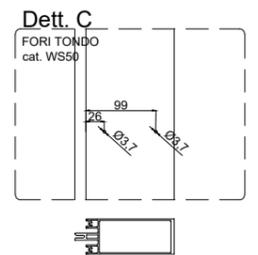
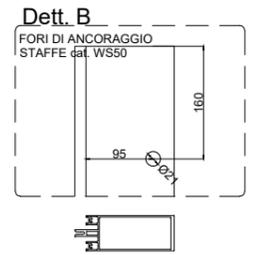
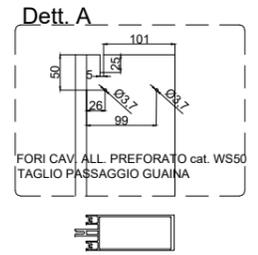
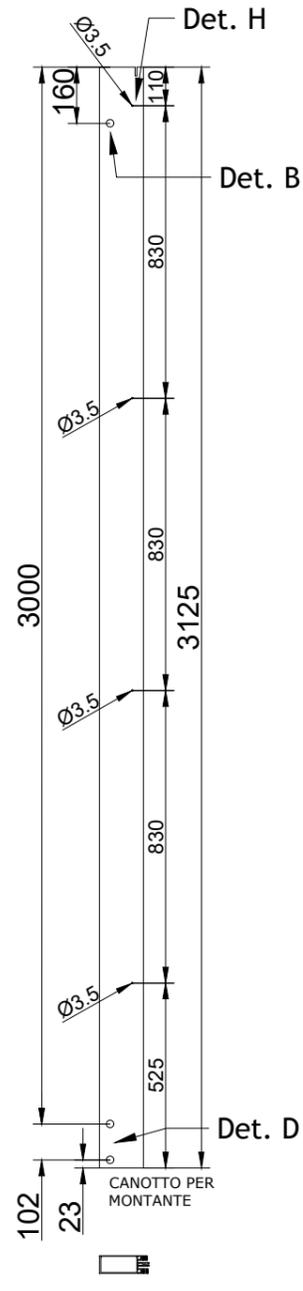
Vista da DX



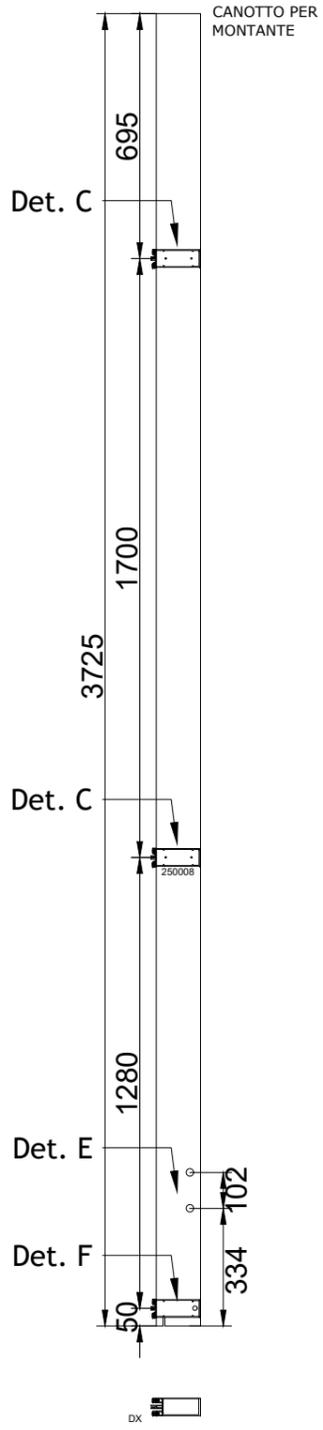
Vista frontale



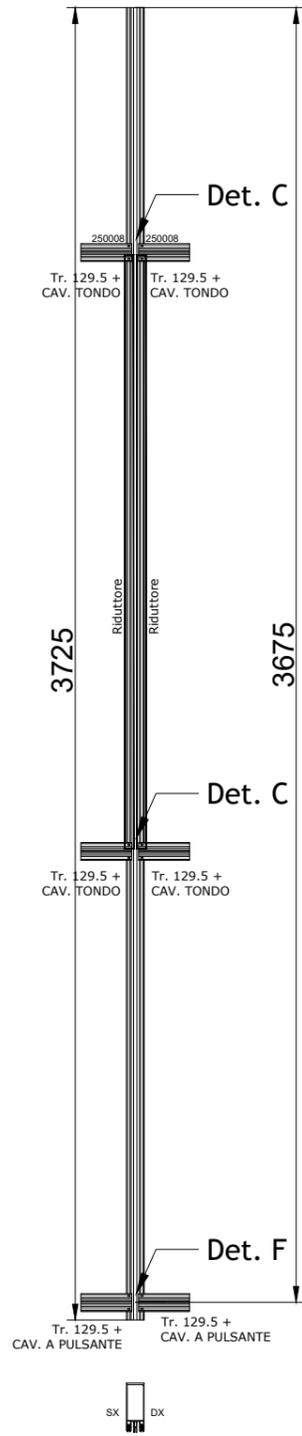
Vista da SX



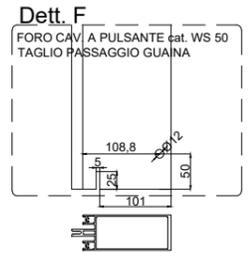
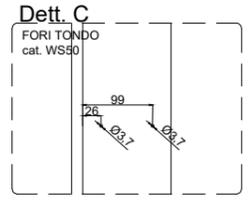
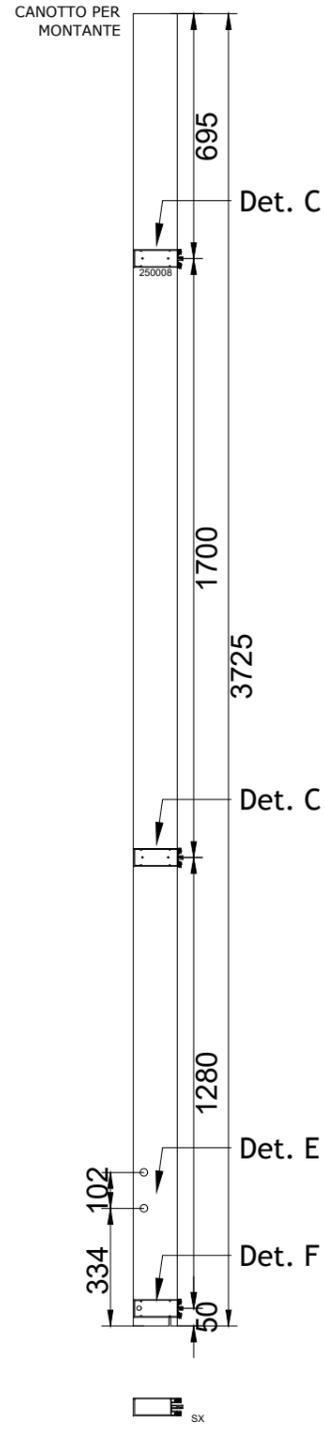
Vista da DX



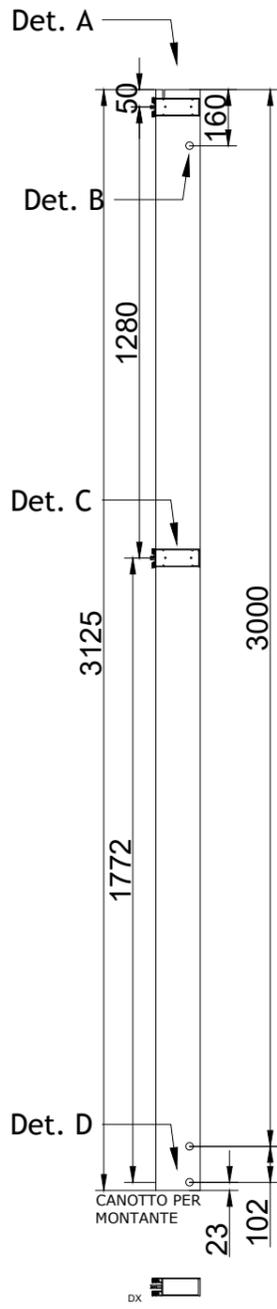
Vista frontale



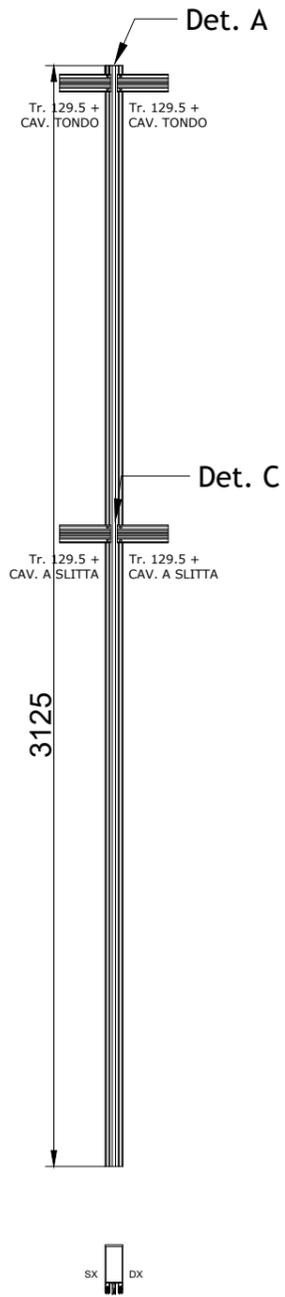
Vista da SX



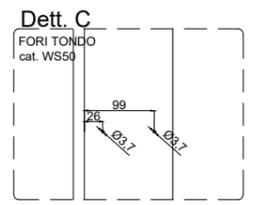
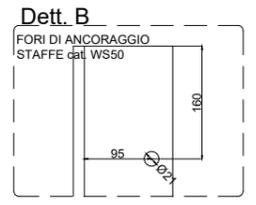
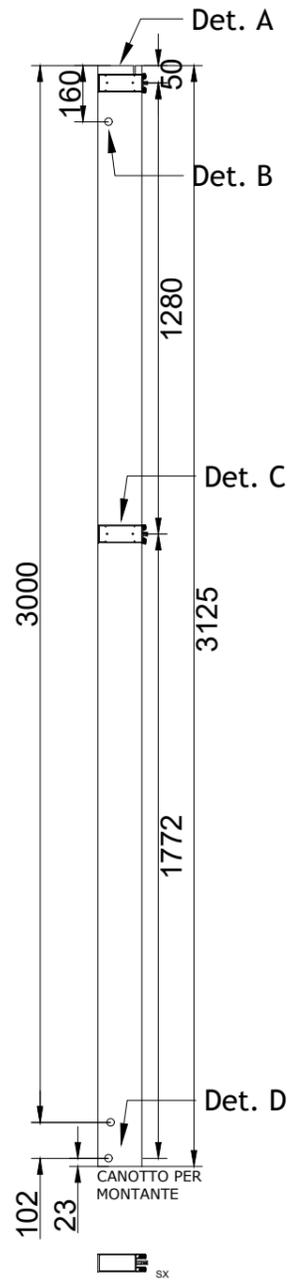
Vista da DX



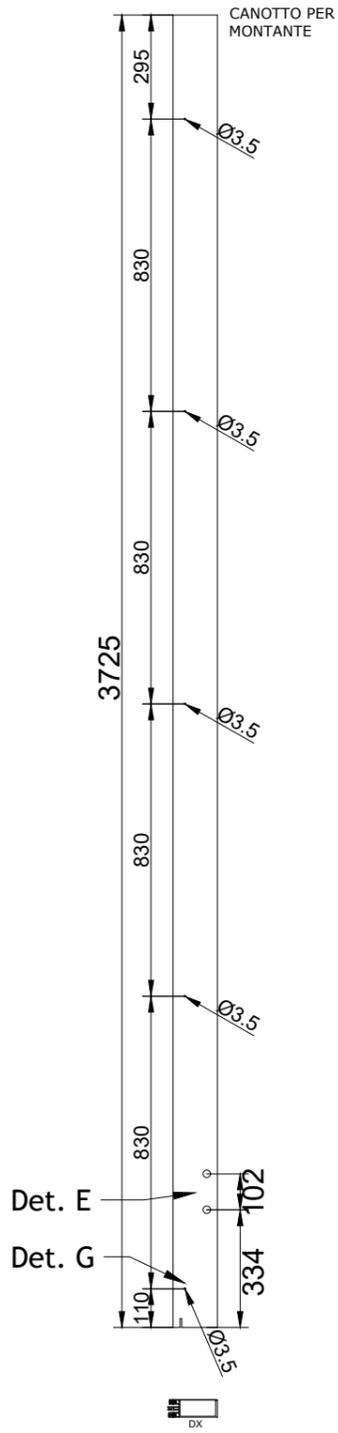
Vista frontale



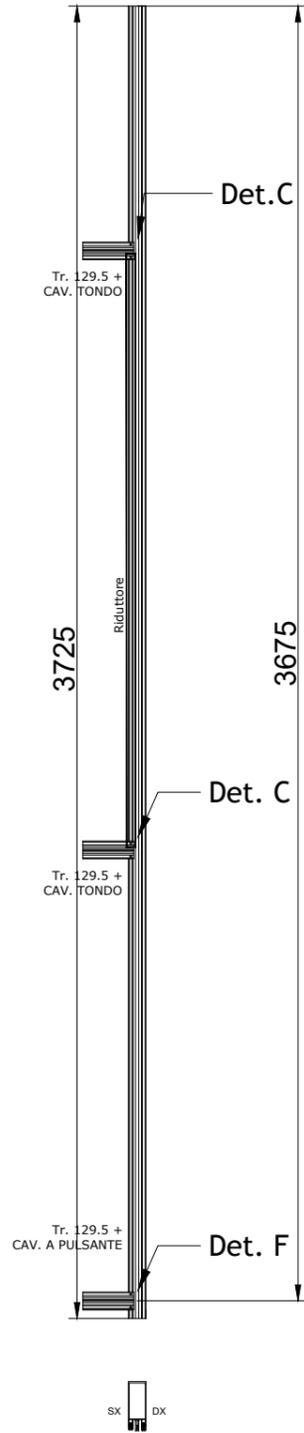
Vista da SX



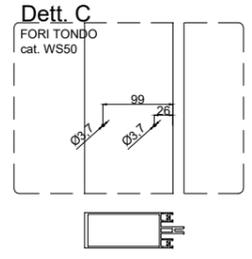
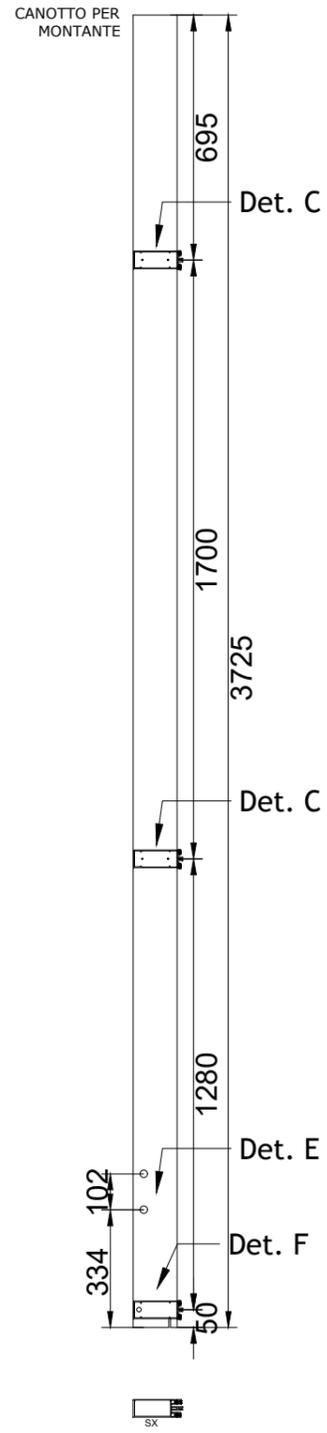
Vista da DX



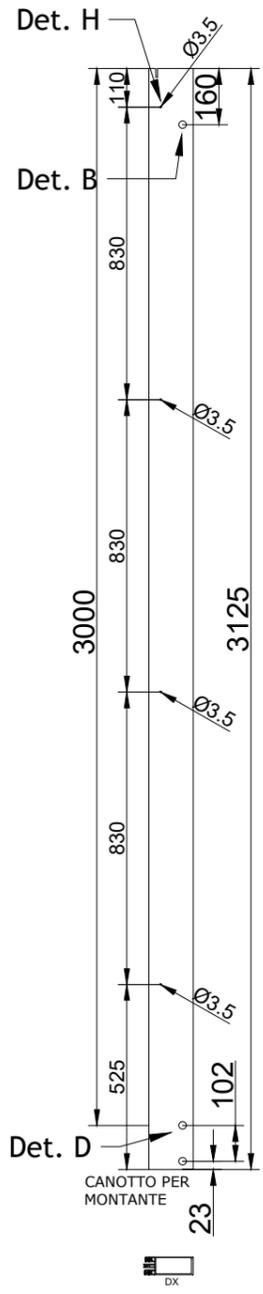
Vista frontale



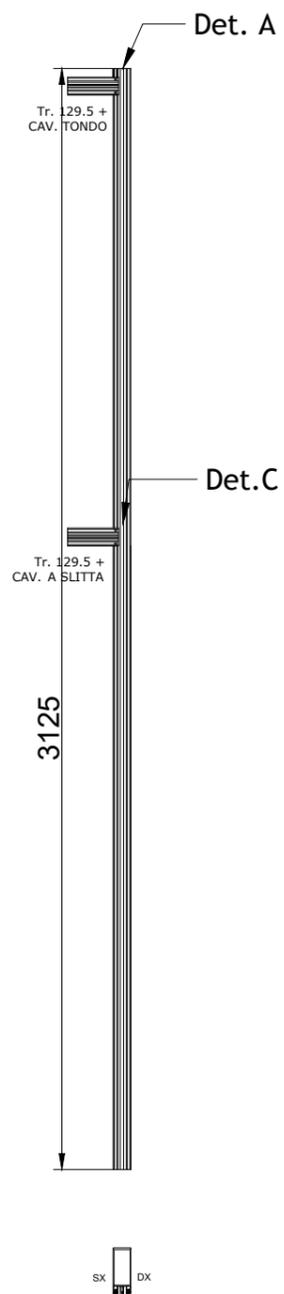
Vista da SX



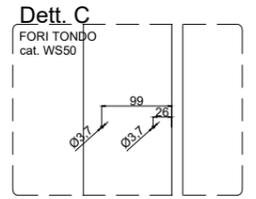
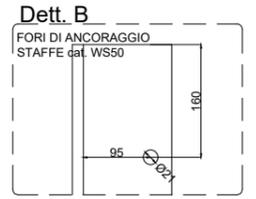
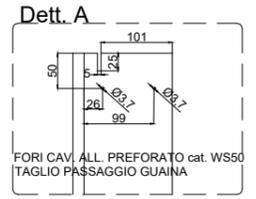
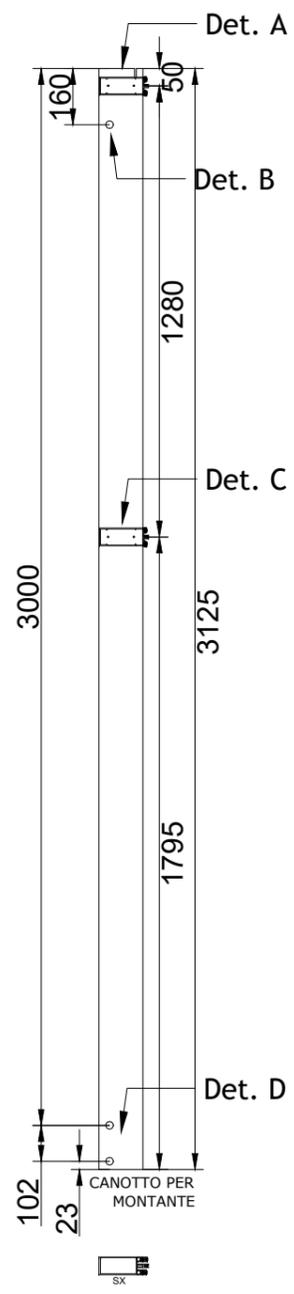
Vista da DX



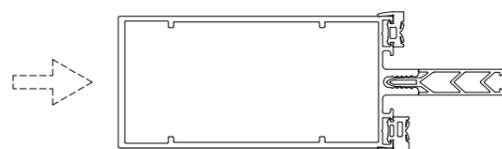
Vista frontale



Vista da SX

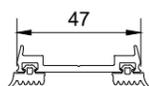
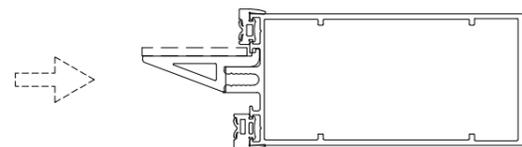


TIPO	N°PZ.	INT. MONT.	L. TAGLIO IM - 20mm	PRESSORE IM - 55mm	CARTER IM - 51mm	SUPP. FW90038+FW90024 IM/10 min.100mm	DISTANZIALE FW40032
T1	6	1800	1780	1745	1749	180	SI
T2	6	1250	1230	1195	1199	125	SI



Inserire guarnizioni per tutta la lunghezza del traverso.

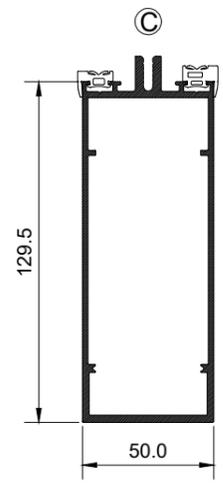
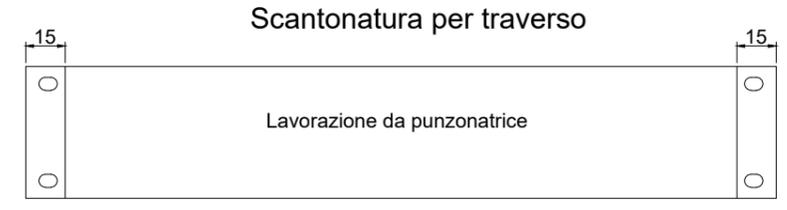
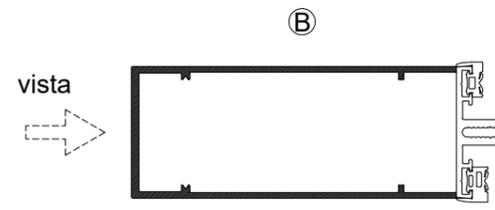
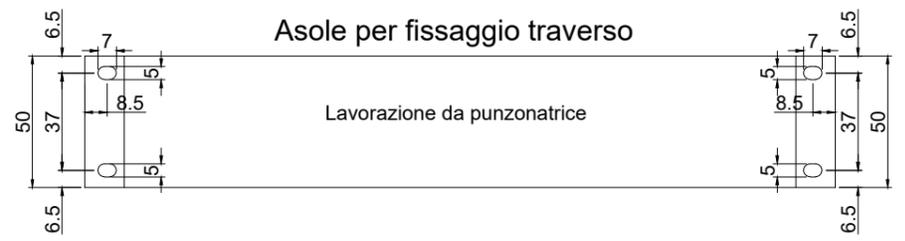
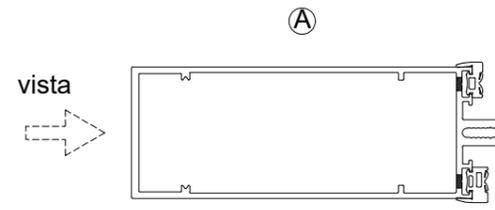
Inserire distanziale per tutta la lunghezza, interrompere solo in corrispondenza dei supporti vetro.



Inserire guarnizioni per tutta la lunghezza del pressore

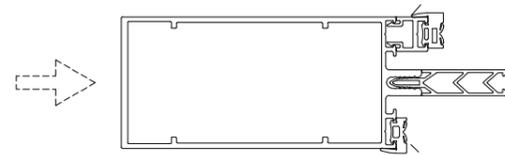
Nei traversi T1 e T2 devono essere inseriti i cavallotti a pulsante

Traversi



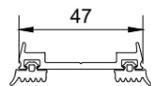
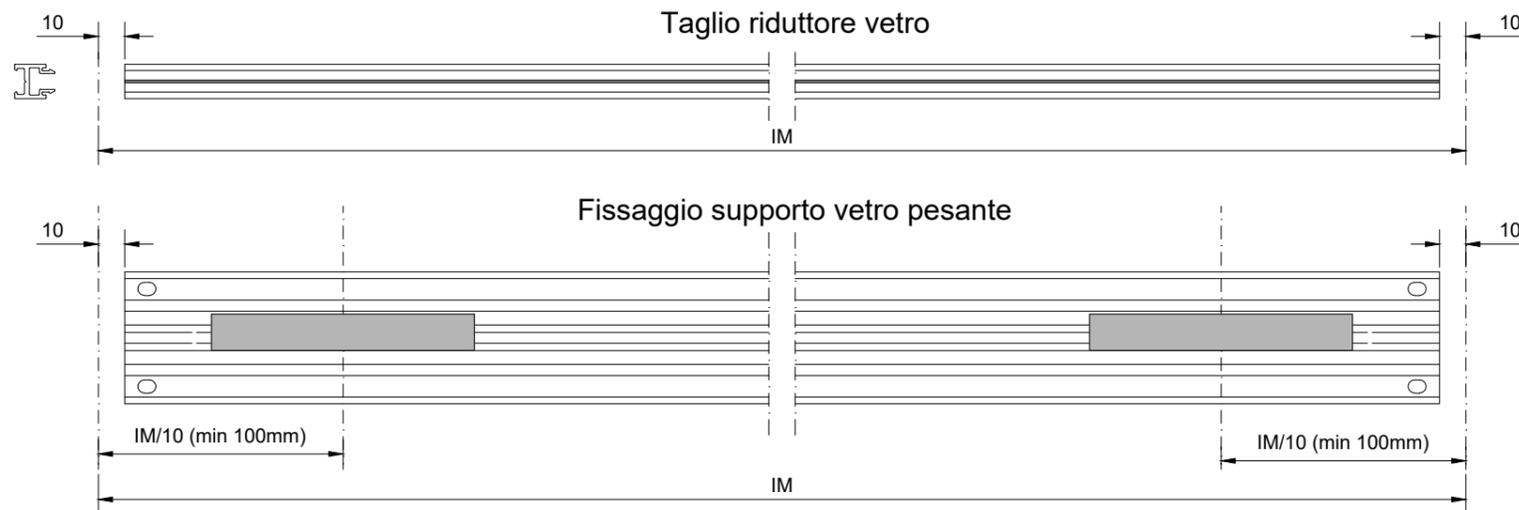
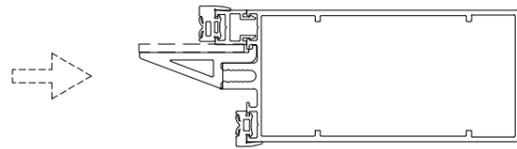
TIPO	N°PZ.	INT. MONT.	L. TAGLIO IM - 20
T1	6	1800	1780
T2	6	1250	1230
T9	6	1800	1780
T10	6	1250	1230

TIPO	N°PZ.	INT. MONT.	L. TAGLIO IM - 20mm	PRESSORE IM - 55mm	CARTER IM - 51mm	SUPP. FW90038+FW90024 IM/10 min.100mm	DISTANZIALE FW40032	RIDUTTORE 250071
T3	6	1800	1780	1745	1749	180	SI	1780
T4	6	1250	1230	1195	1199	125	SI	1230



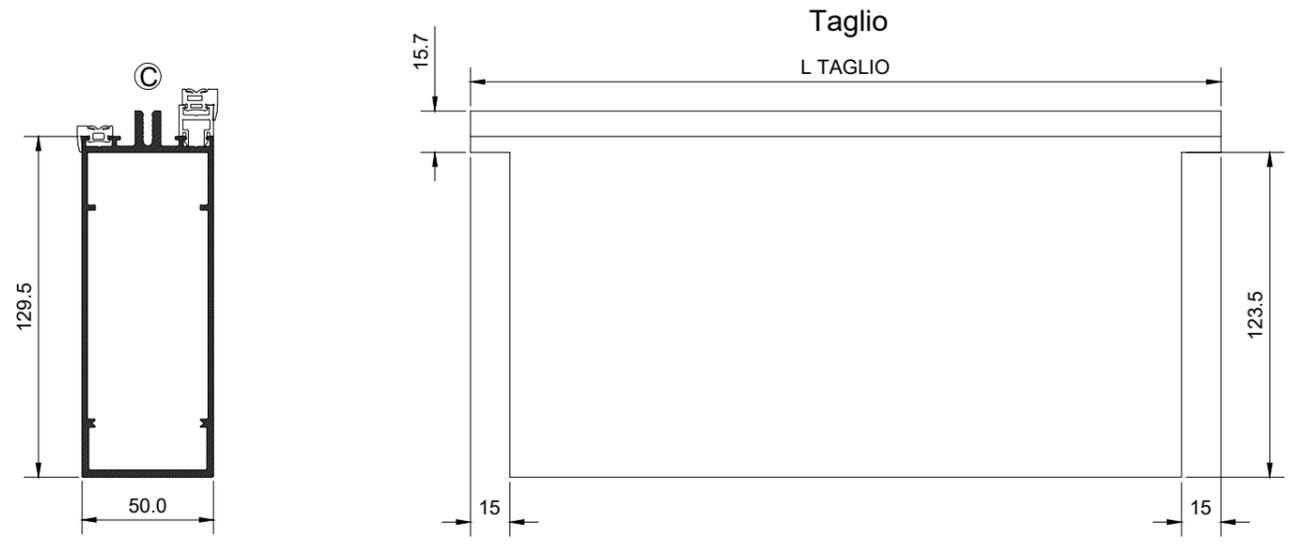
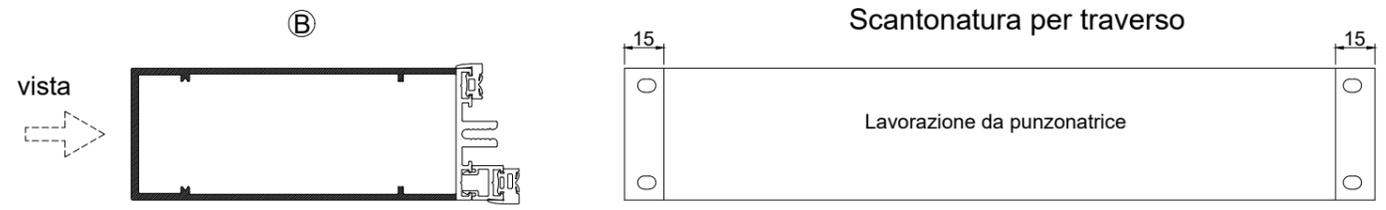
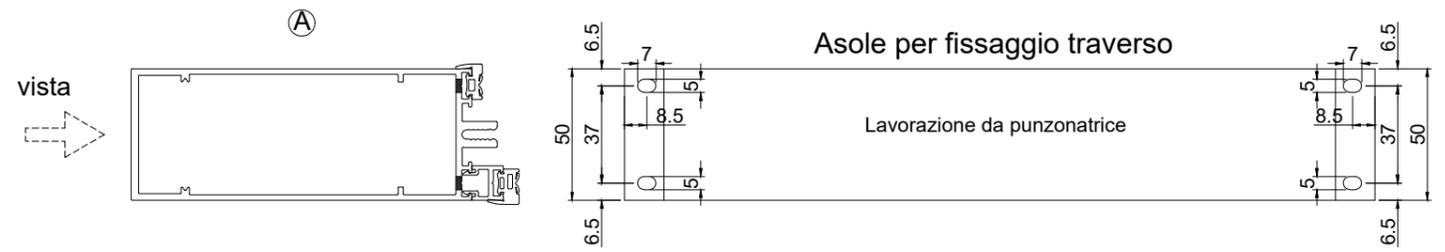
Inserire guarnizioni per tutta la lunghezza del traverso.

Inserire distanziale per tutta la lunghezza, interrompere solo in corrispondenza dei supporti vetro.



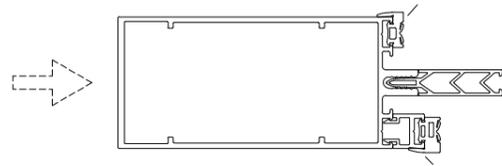
Inserire guarnizioni per tutta la lunghezza del pressore

Traversi



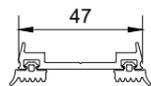
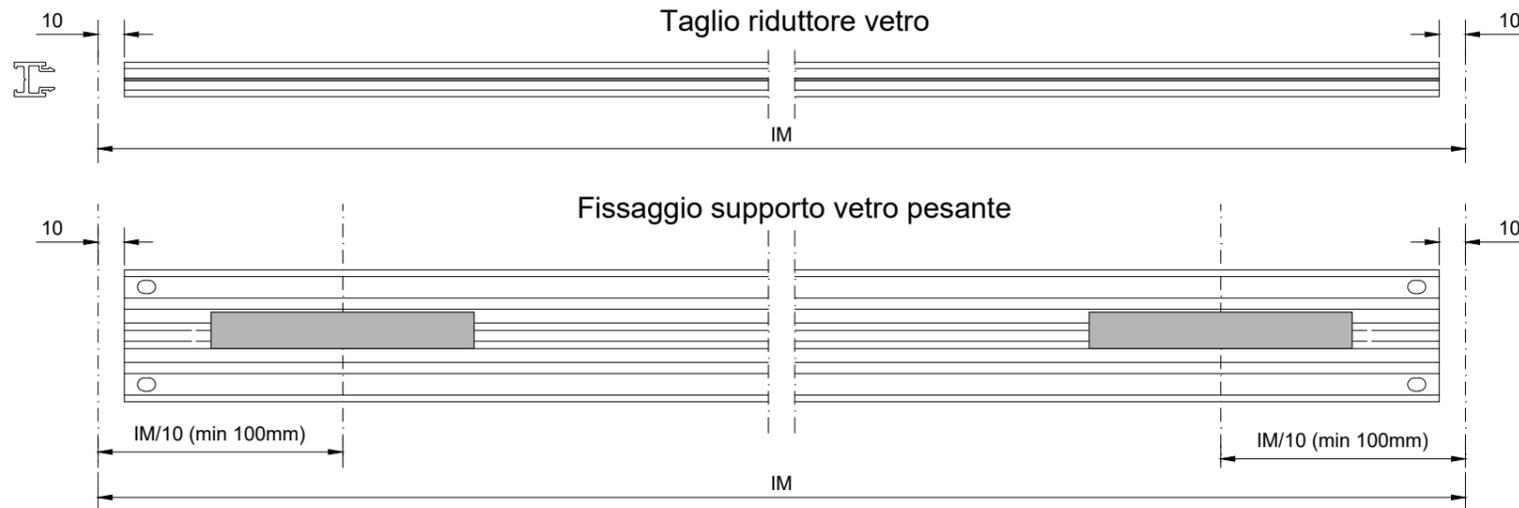
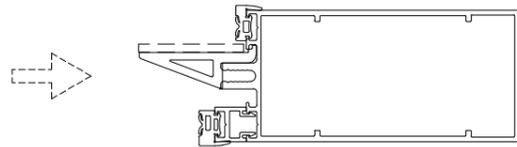
TIPO	N°PZ.	INT. MONT.	L. TAGLIO IM - 20
T3	6	1800	1780
T4	6	1250	1230
T5	6	1800	1780
T6	6	1250	1230

TIPO	N°PZ.	INT. MONT.	L. TAGLIO IM - 20mm	PRESSORE IM - 55mm	CARTER IM - 51mm	SUPP. FW90038+FW90024 IM/10 min.100mm	DISTANZIALE FW40032	RIDUTTORE 250071
T5	6	1800	1780	1745	1749	180	SI	1780
T6	6	1250	1230	1195	1199	125	SI	1230



Inserire guarnizioni per tutta la lunghezza del traverso.

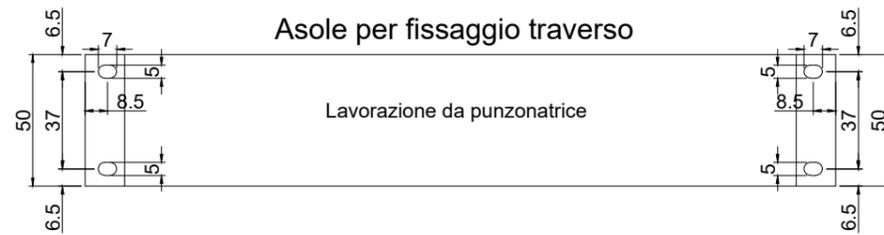
Inserire distanziale per tutta la lunghezza, interrompere solo in corrispondenza dei supporti vetro.



Inserire guarnizioni per tutta la lunghezza del pressore

Traversi

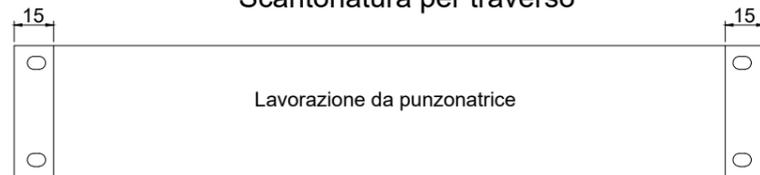
vista



Asole per fissaggio trasverso

Lavorazione da punzonatrice

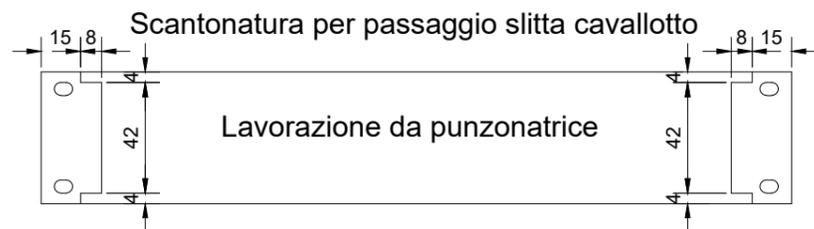
vista



Scantonatura per trasverso

Lavorazione da punzonatrice

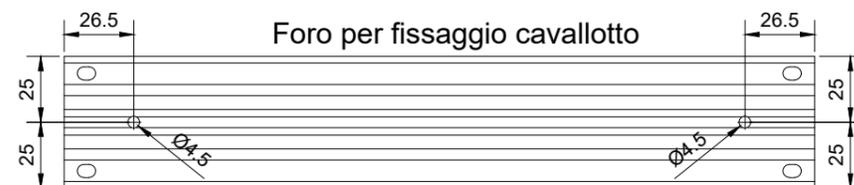
Vista



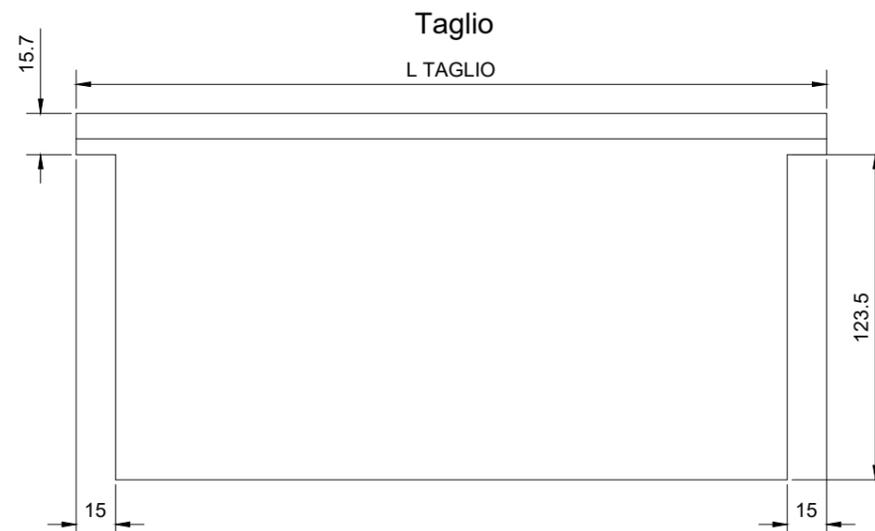
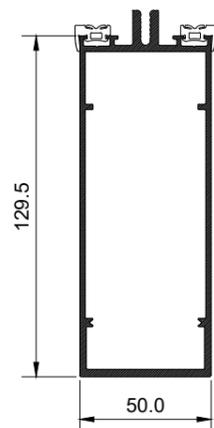
Scantonatura per passaggio slitta cavalletto

Lavorazione da punzonatrice

Vista

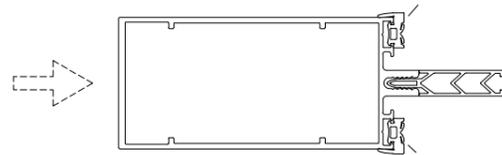


Foro per fissaggio cavalletto



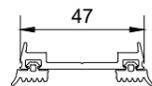
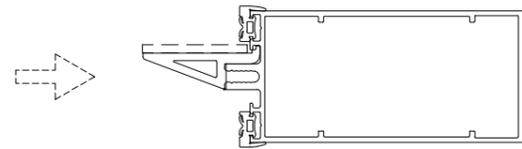
TIPO	N°PZ.	INT. MONT.	L. TAGLIO IM - 20
T7	6	1800	1780
T8	6	1250	1230

TIPO	N°PZ.	INT. MONT.	L. TAGLIO IM - 20mm	PRESSORE IM - 55mm	CARTER IM - 51mm	SUPP. FW90038+FW90024 IM/10 min.100mm	DISTANZIALE FW40032
T7	6	1800	1780	1745	1749	180	SI
T8	6	1250	1230	1195	1199	125	SI



Inserire guarnizioni per tutta la lunghezza del traverso.

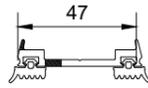
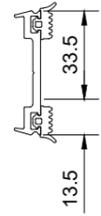
Inserire distanziale per tutta la lunghezza, interrompere solo in corrispondenza dei supporti vetro.



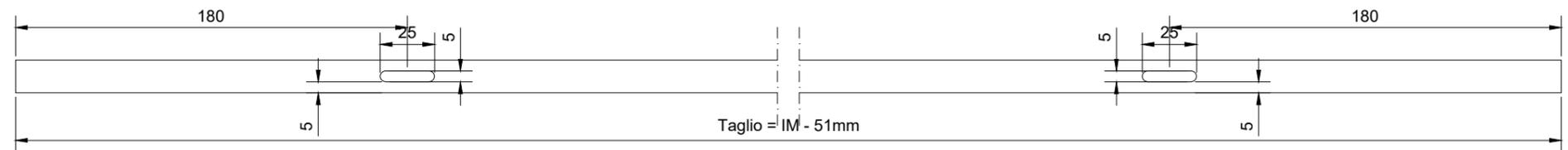
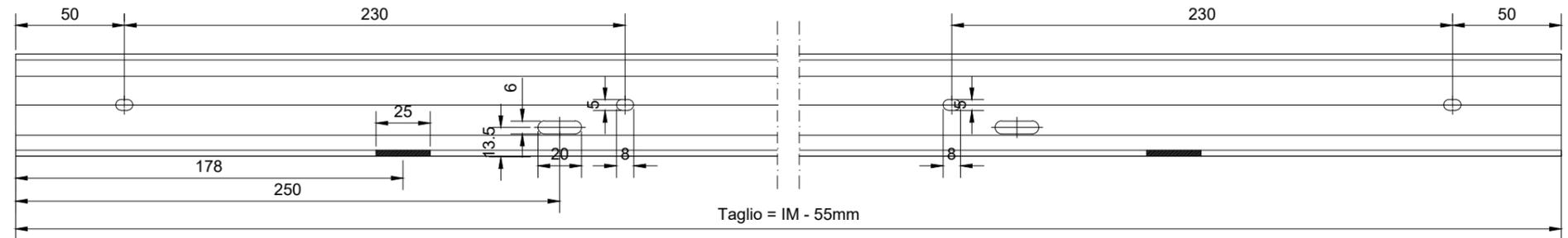
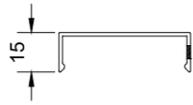
Inserire guarnizioni per tutta la lunghezza del pressore

TIPO	N°PZ.	INT. MONT.	L. TAGLIO IM - 20mm	PRESSORE IM - 55mm	CARTER IM - 51mm	SUPP. FW90038+FW90024 IM/10 min.100mm	DISTANZIALE FW40032
T9	6	1800	1780	1745	1749	NO	SI
T10	6	1250	1230	1195	1199	NO	SI

ASOLE FISSAGGIO
+
ASOLE e SCASSO
PER DRENAGGIO
cat. WS50

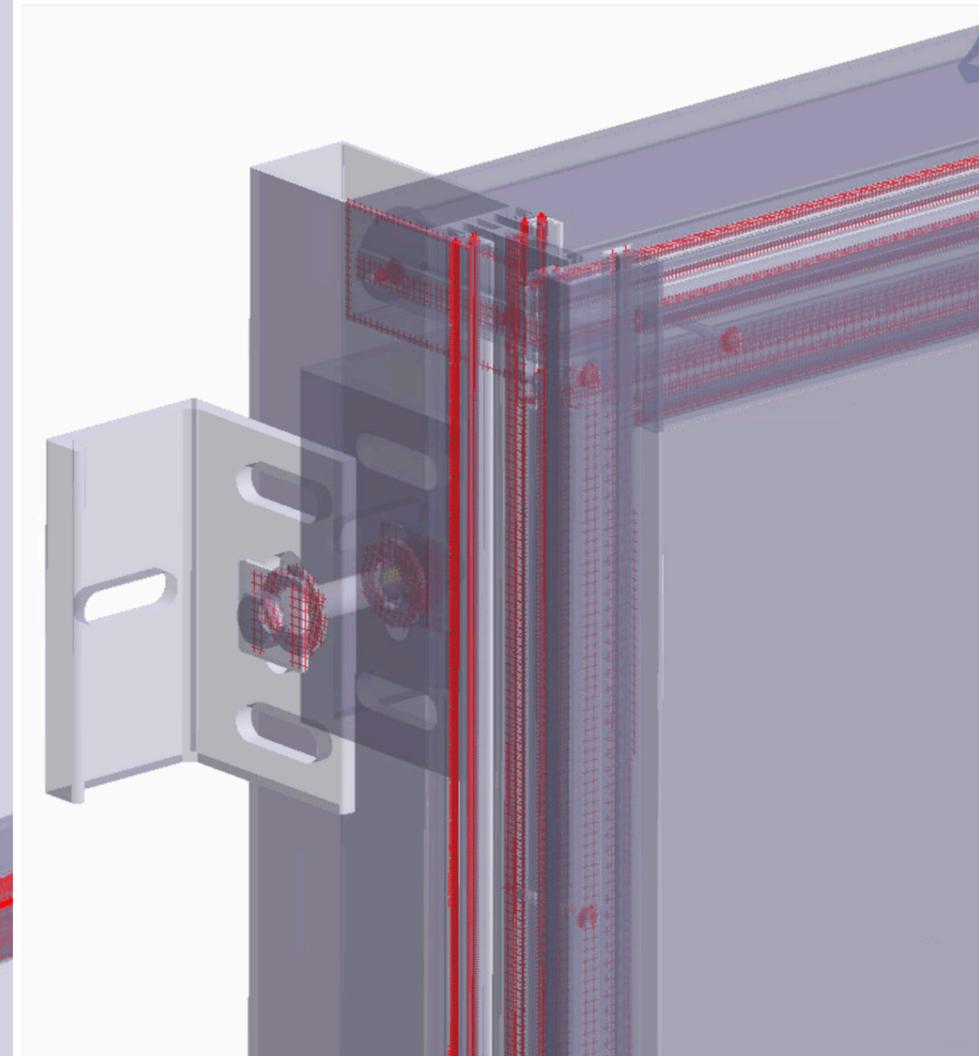
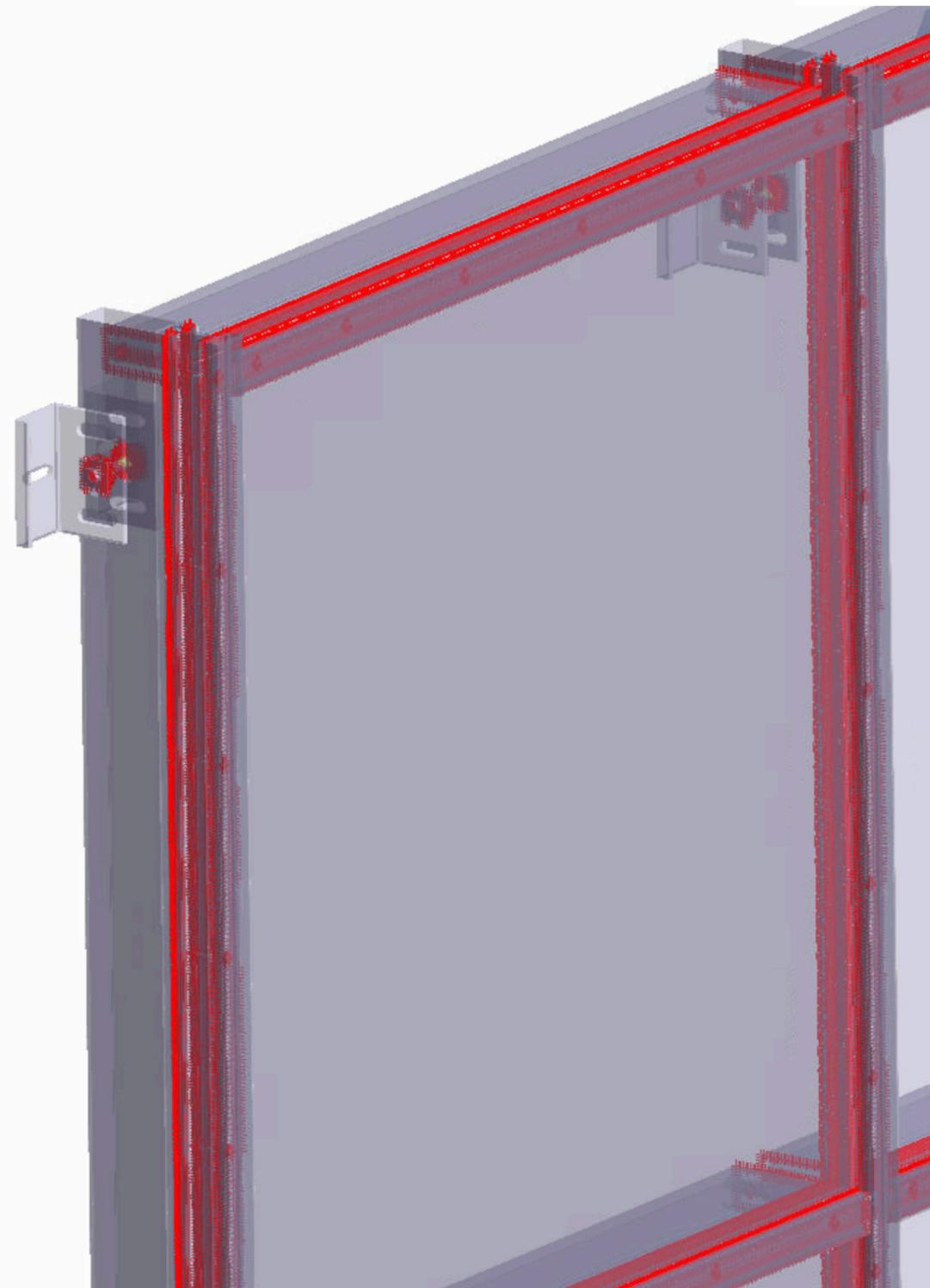
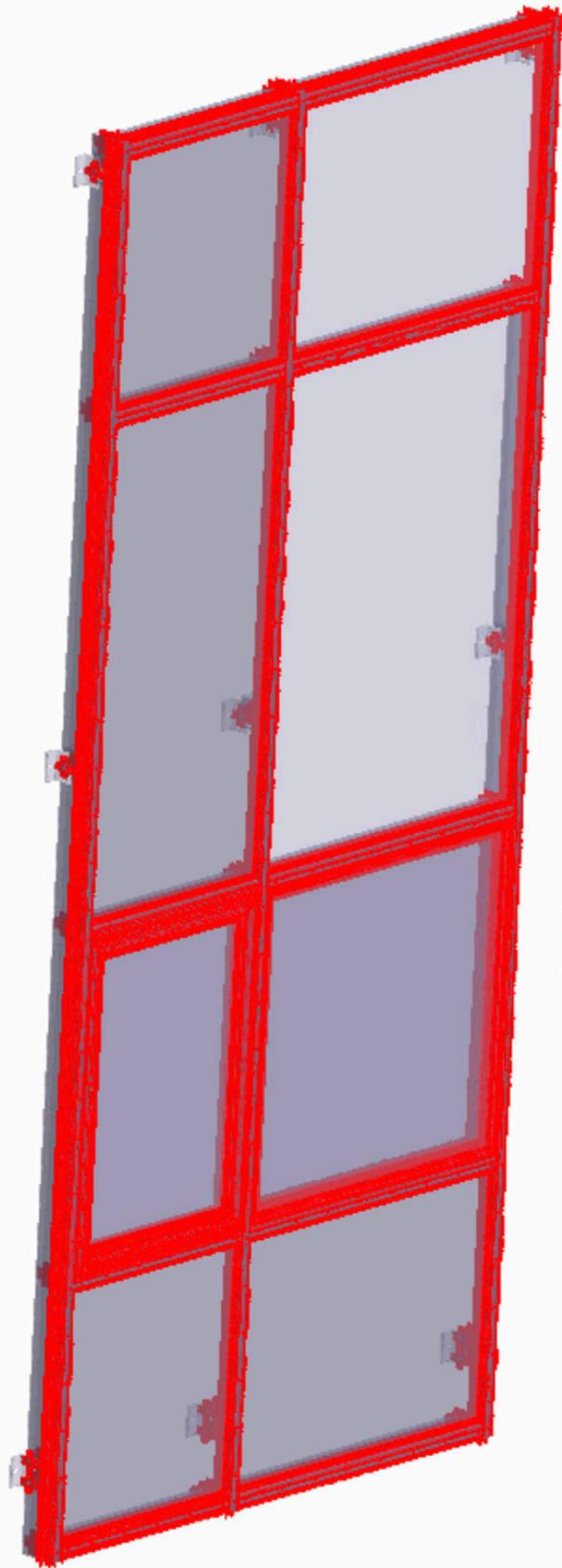


ASOLA
DRENAGGIO
cat. WS50



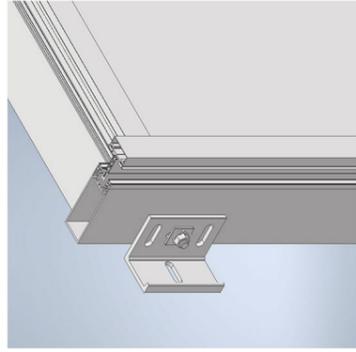
TIPO	N°PZ.	INT. MONT.	PRESSORE IM - 55
P1	30	1800	1745
P2	30	1250	1195

TIPO	N°PZ.	INT. MONT.	CARTER IM - 51
C1	30	1800	1749
C2	30	1250	1199



Allegato 7. Tool metodologico di supporto per lo sviluppo delle analisi su software SimSolid

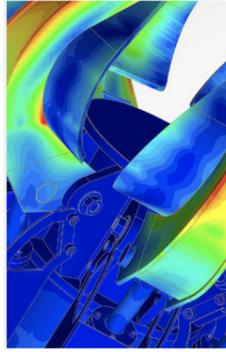
Step metodologici della prima fase di verifica



STEP 1

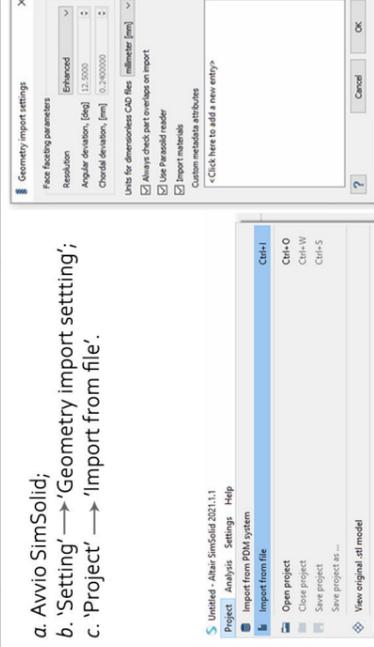
Modellazione dei Digital Mock-Up su 3D parametrico;

- a. Suddivisione in layer per i singoli elementi dei profili e semplificazione geometrica delle guarnizioni;
- b. Estrusione con funzionalità 'parte' dei singoli elementi e componenti con vincoli dimensionali per il singolo profilo;
- c. Lavorazione del singolo profilo - in accordo con le distinte di lavorazione - attraverso i parametri geometrici;
- N. B. Le operazioni a, b, c devono essere ripetute in file distinti per tutti i singoli profili;
- d. Assemblaggio con funzionalità 'assieme' dei profili (estrusi e lavorati) attraverso i vincoli geometrici per il corretto posizionamento dei componenti;
- N. B. L'operazione d deve essere ripetuta per vincolare tutti gli elementi e componenti del modello digitale;
- e. Esportazione del modello in formato 'parasolid'.



STEP 2

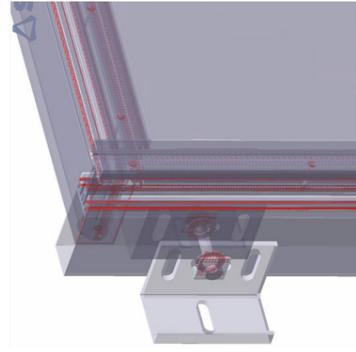
Importazione del 3D su software SimSolid;



- a. Avvio SimSolid;
- b. 'Setting' → 'Geometry import setting';
- c. 'Project' → 'Import from file'.

⚠ Il software si presenta solo in lingua inglese.

⚠ Il software non presenta il comando 'Annulla operazione' (Ctrl+Z).



STEP 3

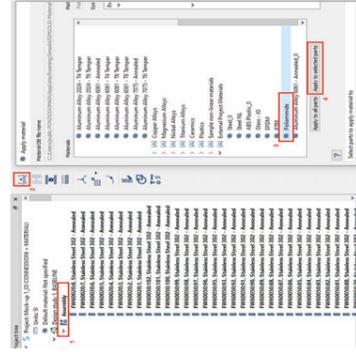
Creazione delle connessioni tra i vari elementi del sistema;

N. B. Appena importato il modello, SimSolid avvia automaticamente il tool 'Automatic connection'.

- a. Avvio del comando 'Automatic connection' oppure 'Project tree' → 'Connection' → 'Workbench toolbar' → 'Automatic connection'.

⚠ Le dimensioni ridotte degli elementi di facciata soprattutto le guarnizioni, riscontrano l'inadeguatezza del software di creare le connessioni necessarie per lo sviluppo delle analisi.

⚠ Il comando 'Find and show disconnected group of parts' in 'Workbench toolbar' verifica se ci sono parti del modello disconnesse.



STEP 4

Assegnazione dei materiali ai singoli elementi;

- a. Selezione degli elementi che devono avere lo stesso materiale;
- b. 'Project tree' → 'Assembly';
- c. 'Workbench toolbar' → 'Apply material';
- d. Selezione dal database il materiale da applicare e applicarlo alle parti selezionate, 'Apply to selected parts'.
- N. B. Le operazioni a, b, c, d vanno ripetute per tutti gli elementi del modello.

⚠ Il database dei materiali può essere implementato da 'Setting' → 'Material Database' → 'Edit current' → 'External Project Material' → 'Add Material', inserendo manualmente i valori numerici delle proprietà meccaniche termiche e di fatica.



STEP 5

Sviluppo dell'analisi modale;

- a. 'Analysis' → 'Modal';
- b. Impostare il numero di modi per processare l'analisi 'Ok';
- c. 'Workbench toolbar' → 'Immovable';
- d. Selezionare le facce o superfici o vertici degli elementi da vincolare come incastrati;
- e. 'Workbench toolbar' → 'Solve'.
- N. B. Se i risultati non riportano un comportamento reale si devono modificare le connessioni riprendendo le operazioni dello step 3.



STEP 6

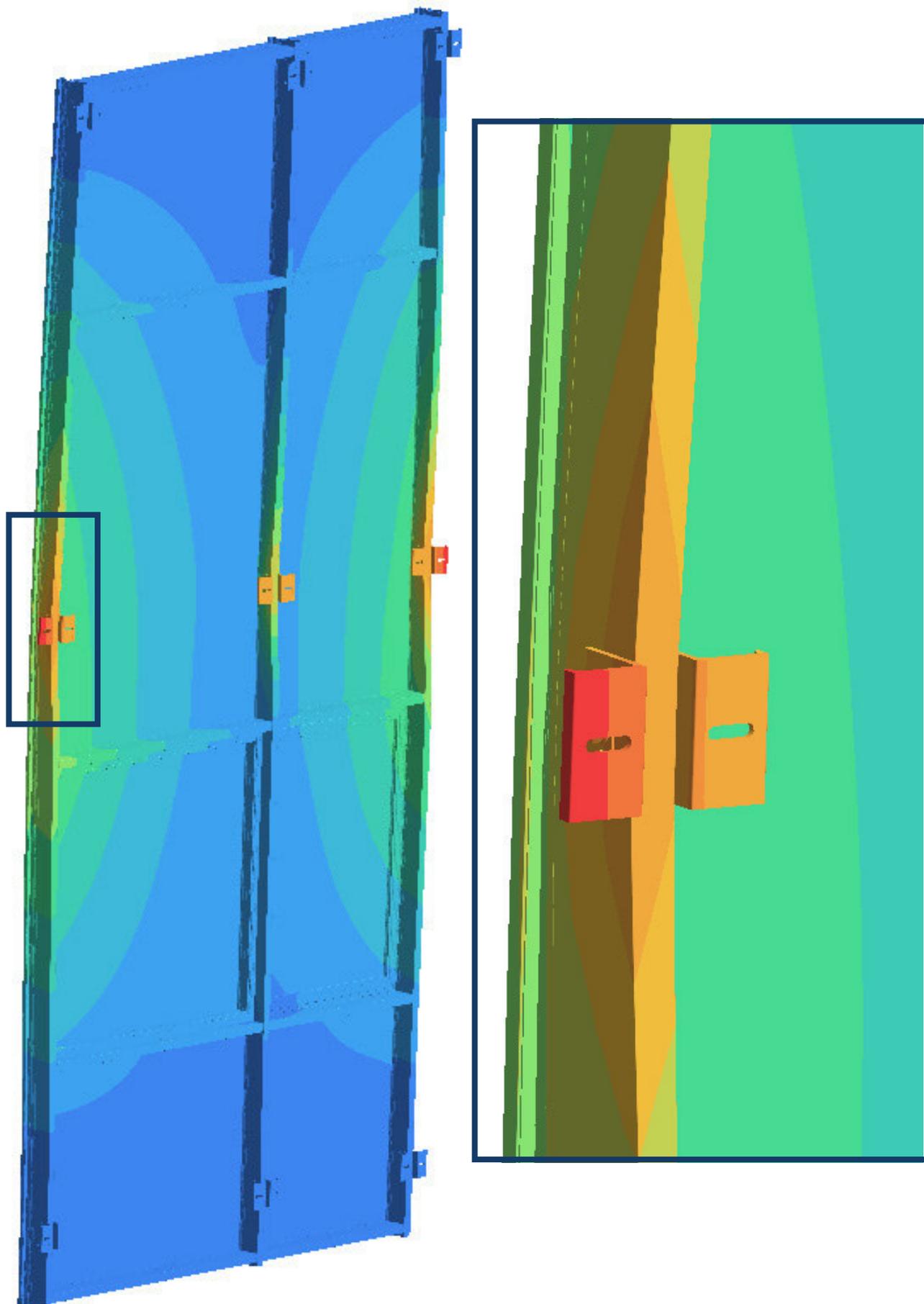
Sviluppo dell'analisi lineare.

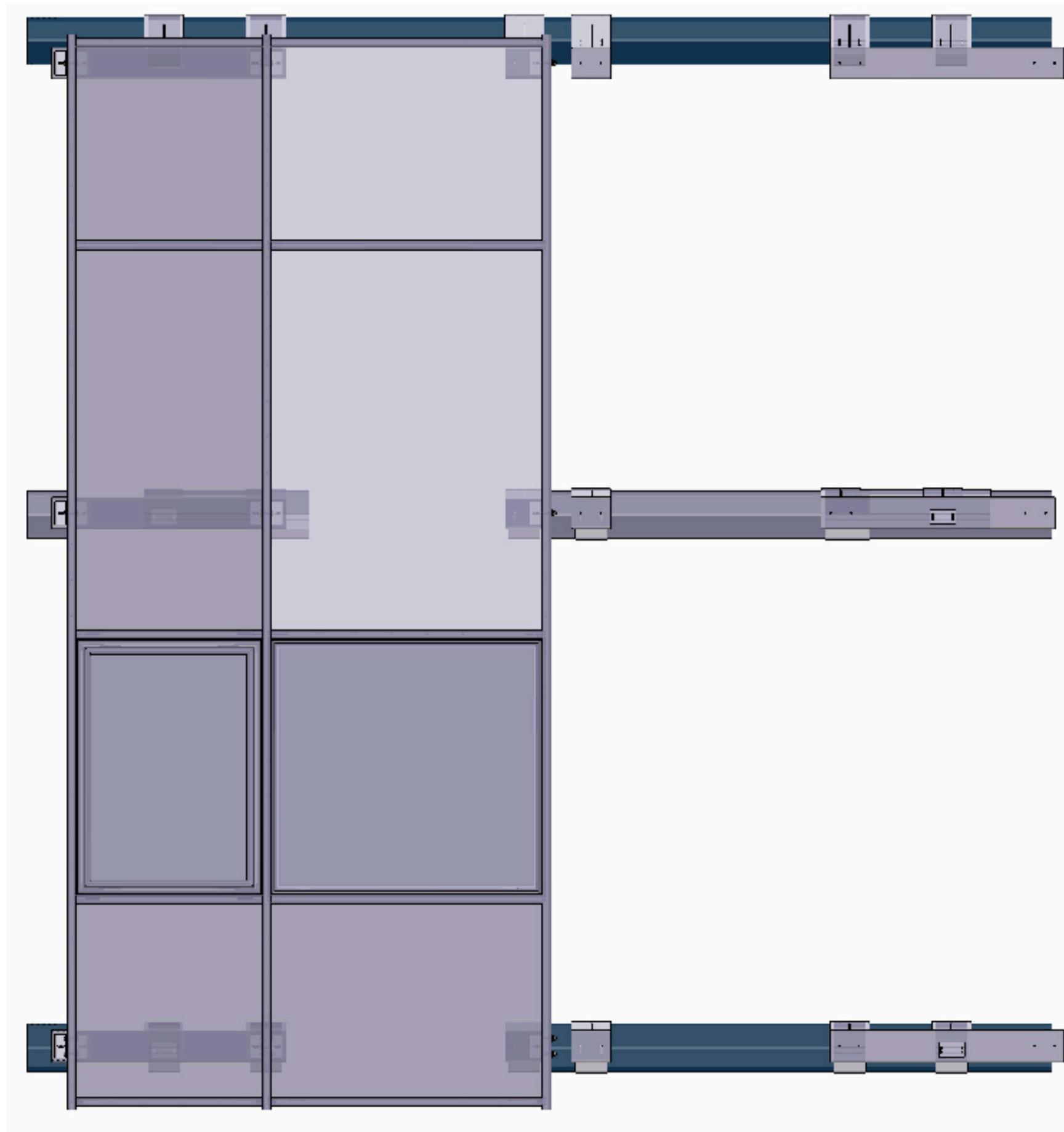
- a. 'Analysis' → 'Structural' → 'Structural linear';
- b. 'Workbench toolbar' → 'Immovable';
- c. Selezionare le facce o superfici o vertici degli elementi da vincolare come incastrati;
- d. 'Workbench toolbar' → 'Force/Displacement' → 'Force/Displacement';
- e. Selezionare le facce o superfici o vertici degli elementi in cui si impone lo spostamento o la forza;
- f. Selezionare l'asse o gli assi in cui si vuole imporre la forza (N) o lo spostamento (mm) e scegliere 'Ok'.

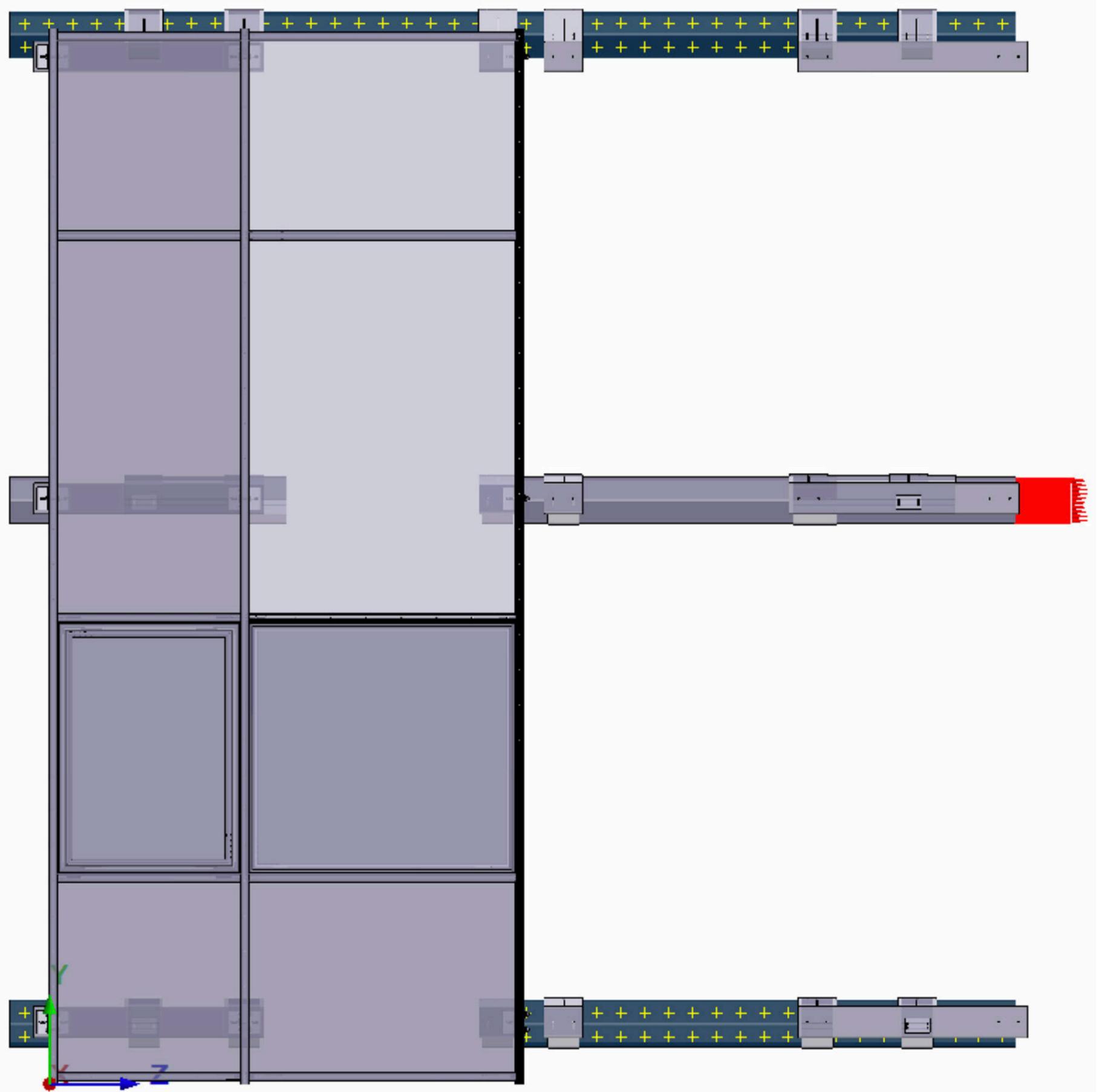
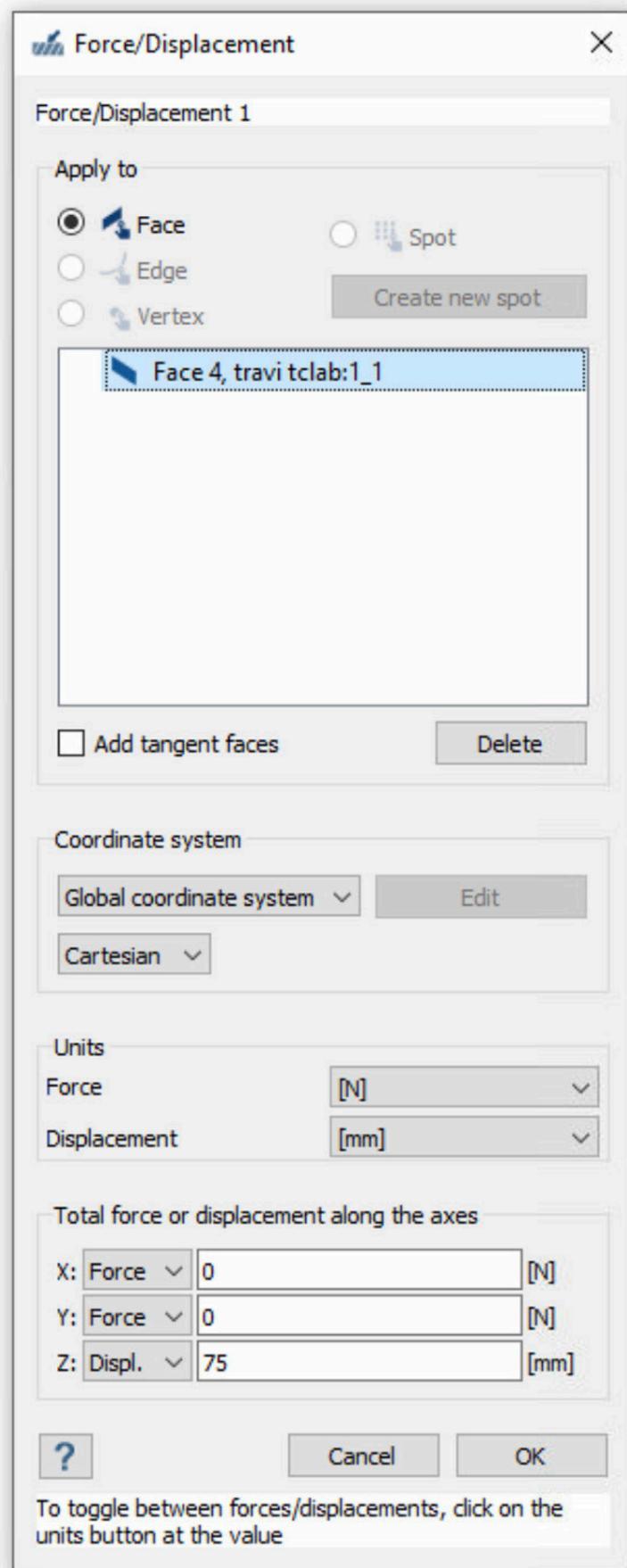
⚠ L'analisi lineare non può essere processata in contemporanea in due direzioni, ma solo in una direzione per volta.

Possibili limiti Alert

⚠ I vincoli geometrici devono essere settati individuando un profilo 'master' e vincolandolo al piano di lavoro nelle tre dimensioni. I vincoli tra elementi vanno impostati selezionando prima la superficie del profilo secondario e, poi la superficie del profilo 'master'.







Connection 385, ...
 Connection 386, ...
 Connection 387, ...

Pick Info

Response info Linearized stress

Response: Von Mises Stress

Coordinate system: Global coordinate system, Cartesian

Pick point Choose datum point set
 Pick face Pick load

Points: Point 1, Point 2

Point 2
 Coordinates:
 X = 6.3408e+02 [mm]
 Y = 2.9988e+03 [mm]
 Z = 3.0125e+03 [mm]

Displacements, [mm]:
 Displacement magnitude = 5.1124e+01
 Displacement X = -3.1488e+01
 Displacement Y = -5.0180e+00
 Displacement Z = 3.9958e+01

Stresses, [MPa]:
 Von Mises stress = 4.8750e+02
 Signed Von Mises stress = -4.8750e+02
 Principal stress 1 = 1.6280e+02
 Principal stress 2 = -1.5393e+02
 Principal stress 3 = -3.9643e+02
 Max shear stress = 2.7962e+02
 Stress X = 1.5245e+02
 Stress Y = -1.5598e+02
 Stress Z = -3.8403e+02
 Stress XY = -8.8450e+00
 Stress YZ = -1.1238e+01
 Stress XZ = -4.9502e+01

Strains:
 Equivalent strain = 6.2644e-03
 Principal strain 1 = 4.9916e-03
 Principal strain 2 = -1.1136e-03
 Principal strain 3 = -5.7878e-03
 Strain X = 4.7921e-03
 Strain Y = -1.1530e-03
 Strain Z = -5.5489e-03
 Strain XY = -1.7049e-04
 Strain YZ = -2.1661e-04
 Strain XZ = -9.5418e-04

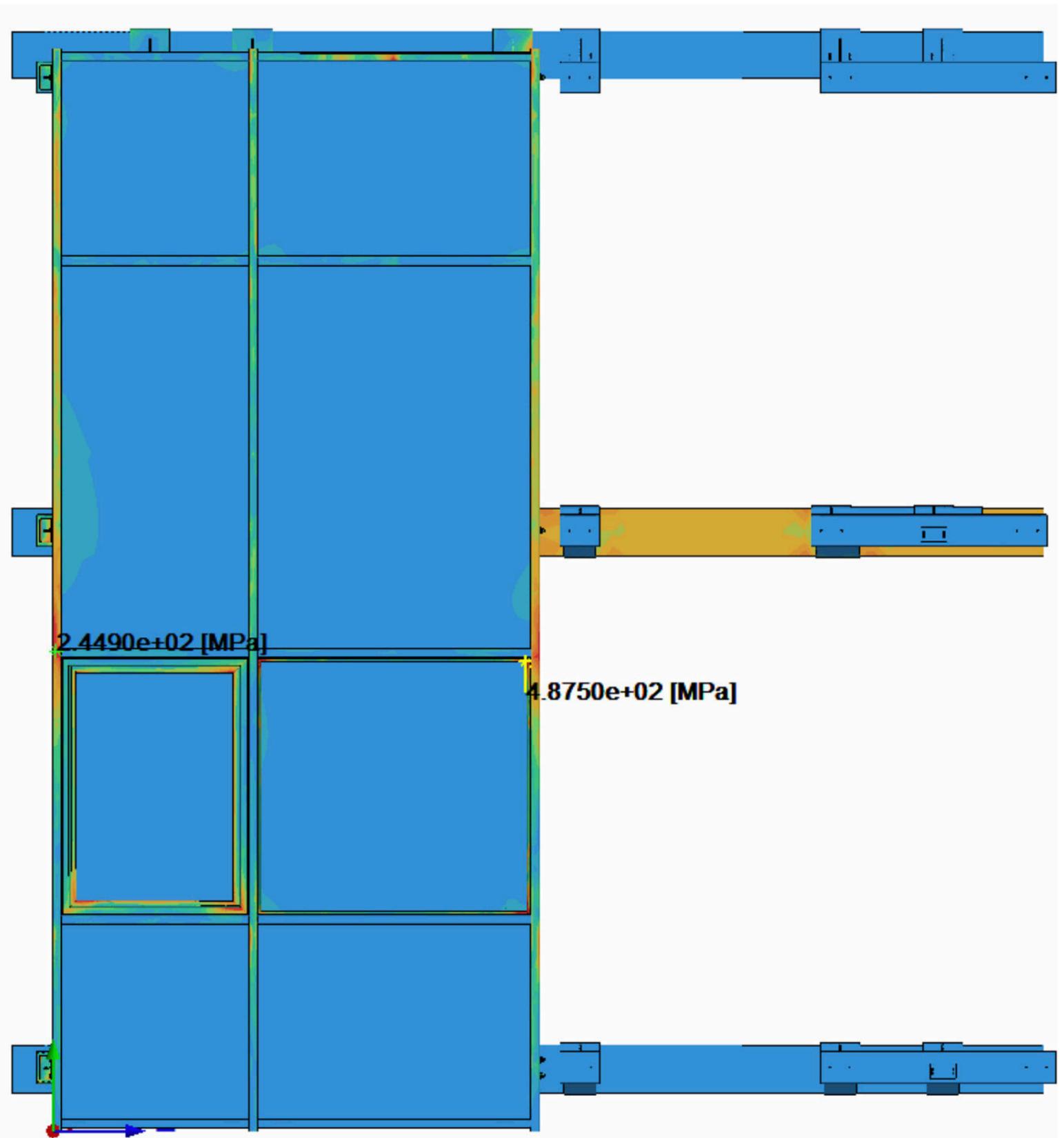
Strain energy density = 1.7516e+06 [N/m^2]

Delete Save to CSV

Measure rotation of a segment between points
 Evaluate average
 Hide labels

? Close

Pick a point



Design study 1 | Structural 1



OGGETTO: Method Statement. Facciata Continua WS50 PG

Committente	Ponzio s.r.l.
Nome del campione	Facciata a montanti e traversi WS50 PG
Laboratorio di Prova	TCLab
Data	16/11/2021

Informazioni per la classificazione di prova

Permeabilità all'aria	Classe \pm AE660
Tenuta all'acqua	RE1650
Resistenza al carico del vento	Progetto \pm 2000 Aumentato \pm 3000





Sommario

1. Premessa	3
2. Campioni di prova	3
3. Apparecchiatura di prova	4
4. Sequenza di prova	4
5. Specifiche delle prove	4
5.1. Prova di Permeabilità all'aria.....	4
5.2. Prova di Tenuta all'acqua sotto pressione statica	5
5.3. Prova di Resistenza al carico del vento – funzionalità (100% del carico di progetto)	5
5.4. Test sismico statico.....	5
5.5. Ripetizioni.....	6
5.6. Prova di Resistenza al carico del vento – sicurezza (150% del carico di progetto).....	6
5.7. Crescendo Test.....	6





1. Premessa

La presente proposta descrive le procedure e le metodologie per la sperimentazione legata alla Ricerca di Dottorato Industriale condotta all'interno del Corso di Dottorato in Architettura, XXXV Ciclo, per il sistema di facciata continua a montanti e traversi WS50 PG, dell'azienda Ponzio s.r.l.

Le prove saranno condotte su due modelli in scala (Mock-Up) forniti ed eretti da Ponzio s.r.l. utilizzando materiali e metodi coerenti con le facciate reali. I Mock-Up, installati su una simulazione di struttura solaio, saranno eretti con la facciata esterna rivolta verso l'esterno e la facciata interna rivolta verso la struttura.

Non sarà condotta alcuna prova in assenza dei rappresentanti dei Mock-up.

Norme di riferimento

Permeabilità all'aria	UNI EN 12153:2002
Tenuta all'acqua sotto pressione statica	UNI EN 12155:2002
Prova di Resistenza al carico del vento – funzionalità 100%	UNI EN 12179:2002
Test sismico statico	UNI EN 13830:2015
Ripetizioni – permeabilità all'aria – tenuta all'acqua statica	UNI EN 12153:2002 UNI EN 12155:2002
Prova di Resistenza al carico del vento – sicurezza 150%	UNI EN 12179:2002
Crescendo Test	AAMA 501.6-01

2. Campioni di prova

I Mock-Up saranno eretti nelle dimensioni e utilizzando i materiali dei sistemi di facciata reali, come concordato tra le parti. Come previsto all'interno del Project Mock-up, saranno utilizzati anche gli stessi metodi di fissaggio presenti all'interno dei cataloghi Ponzio.

Le dimensioni dei Mock-Up saranno rispettivamente 3.050 x 6.900 mm cadauno per una dimensione totale di 6.250 x 6.900 mm, con la presenza di quattro apribili, di cui due a sporgere (1800 x 1700 mm) e due ante a ribalta (1250 x 1700 mm).



Ponzio s.r.l. - Via dei Fabbri, snc - Z.I. Soerne - 64025 Pineto (TE) Italy - Tel. +39 085 94641 r.a. - Fax. +39 085 9461325
 Reg. Imp. TE 00061490678 - Cap. Soc. € 1.560.000 int. vers. - C.F. e P.Iva 00061490678 - R.E.A. TE 49514 - N. Mecc. TE 002577
 P.E.C. : amministrazione@pec.ponziosud.it - www.ponzioaluminium.com - info@ponzioaluminium.com
 Soc. sogg. a Dir. e Coord. di Pnsr S.r.l. - Via Messina, 7 - 65122 Pescara (PE) Italy Cap. Soc. € 5.000.000,00 I.v. - C.F. e P.Iva 02118090683 - R.E.A. PE 154941 - P.E.C.: pnsrsrl@pec.it



3. Apparecchiatura di prova

L'apparecchiatura che dovrà essere impiegata per eseguire le prove, in conformità ai requisiti normativi di riferimento è composta da:

- a) Camera con apertura nella quale posizionare il campione di prova (6.573 x 7.000 mm), dotata degli adeguati supporti strutturali rappresentativi a cui fissare il campione in conformità alle condizioni d'uso nelle opere;
- b) Struttura rigida in acciaio sulla quale vincolare il campione di prova;
- c) Impianto aria in grado di fornire una differenza di pressione massima positiva o
- d) negativa;
- e) Mezzo di misurazione del flusso d'aria nella camera con accuratezza di $\pm 5\%$ al fine di consentire la valutazione della quantità di permeabilità all'aria attraverso il provino con accuratezza del 10% della permeabilità all'aria ammessa attraverso il provino;
- f) Mezzo temporaneo di sigillatura dei giunti del provino;
- g) Impianto di spruzzatura acqua in grado di erogare acqua con portata di $2,0 \text{ l/m}^2 \cdot \text{min.}$ in modo da formare una pellicola continua e costante sulla superficie esterna del provino;
- h) strumento che permette di controllare la quantità d'acqua proiettata con accuratezza del 10%;
- i) trasduttori di spostamento per la misurazione delle deformazioni;
- j) Attuatori oleodinamici per gli spostamenti nel piano e fuori dal piano della facciata;
- k) un sistema di gestione, controllo degli impianti e acquisizione di tutti i parametri di prova.

4. Sequenza di prova

Permeabilità all'aria

Tenuta all'acqua sotto pressione statica

Prova di Resistenza al carico del vento- funzionalità 100%

Test sismico statico

Ripetizioni

- permeabilità all'aria
- tenuta all'acqua statica

Prova di Resistenza al carico del vento – sicurezza 150%

Crescendo Test

5. Specifiche delle prove

5.1. Prova di Permeabilità all'aria

Riferimento normativo: UNI EN 12153:2002

Procedimento di prova: la prova è articolata secondo 4Step:

- sigillatura dei giunti apribili presenti mediante nastro adesivo al fine di impedirne ogni flusso d'aria, la prova consiste nell'applicazione di 3 pulsazioni di pressione d'aria positiva con durata in salita non inferiore a 1 secondo, delle quali ognuna dovrà essere mantenuta per almeno 3 secondi con valore superiore del 10% alla pressione massima di prova P_{max} (660 Pa).



Ponzio s.r.l. - Via dei Fabbri, snc - Z.I. Scerne - 64025 Pineto (TE) Italy - Tel. +39 085 94641 r.a. - Fax. +39 085 9461
Reg. Imp. TE 00061490678 - Cap. Soc. € 1.560.000 int. vers. - C.F. e P.Iva 00061490678 - R.E.A. TE 49514 - N. Mecc. TE 002
P. E. C. : amministrazione@pec.ponziosud.it - www.ponzioaluminium.com - info@ponzioaluminium.com
Soc. sogg. a Dir. e Coord. di Pincer S.r.l. - Via Messina, 7 - 65122 Pescara (PE) Italy Cap. Soc. € 5.000.000,00 I.v. - C.F. e P.Iva 02118090683 - R.E.A. PE 154941 - P.E.C.: pincersti@



- Quindi si riporta a zero la pressione e si procede con pressioni positive gradualmente crescenti ad intervalli ognuno di durata pari ad almeno 10 secondi, con incrementi di 50 Pa fino a 300 Pa e di seguito con incrementi di 150 Pa fino a Pmax (660 Pa), rilevando al contempo i valori di flusso d'aria in corrispondenza di ogni pressione di prova (Qfc). In questo caso come indicato nella norma EN 12153 il campione sarà temporaneamente sigillato. Verrà utilizzato un telo di polietilene;
- la sequenza di prova precedentemente descritta è stata rispettata ai fini della rilevazione dei flussi d'aria in corrispondenza delle analoghe pressioni negative;
- rimozione della sigillatura a tenuta d'aria sui giunti apribili del campione e la parte mobile aprendola e chiudendola 5 volte e bloccandola in posizione chiusa. Misurazione dei valori di flusso d'aria in corrispondenza delle stesse pressioni di prova (Qtc);
- la sequenza di prova precedentemente descritta è stata rispettata ai fini della rilevazione dei flussi d'aria in corrispondenza delle analoghe pressioni negative.

5.2. Prova di Tenuta all'acqua sotto pressione statica

Riferimento normativo: UNI EN 12155:2002

Procedimento di prova: l'erogazione d'acqua, impostata al valore di 2 l/m²m rispetto all'area calcolata della facciata continua, viene eseguita prima in assenza di pressione per 15 minuti e quindi con incrementi di 50 Pa fino a 300 Pa e da 300 Pa con incrementi di 150 Pa, di durata pari a 5 min. per ogni intervallo, fino al raggiungimento della pressione massima di prova Pmax (1650 Pa). Contemporaneamente il campione è stato ispezionato in modo costante relativamente a presenza, durata e localizzazione delle eventuali infiltrazioni d'acqua per tutto il periodo di spruzzatura.

5.3. Prova di Resistenza al carico del vento – funzionalità (100% del carico di progetto)

Riferimento normativo: UNI EN 12179:2002

Procedimento di prova: Sottoporre a prova la resistenza al carico da vento con pressione di prova positiva, quindi fare seguire la prova con pressione di prova negativa. Applicare tre impulsi di pressione d'aria al 50% del carico da vento di progetto o di 500 Pa, a seconda di quale è maggiore. Il periodo breve per l'aumento della pressione non deve essere minore di 1 s. Mantenere ogni impulso per almeno 3 s. Azzerare tutti i dispositivi di misurazione o regolarli alle loro letture iniziali, quindi registrare queste ultime. Annotare ogni cambiamento nella condizione del provino. Sottoporre l'unità di facciata continua alle pressioni di prova in 4 fasi, per un periodo minimo di (15 ± 5) s per ogni fase fino al carico da vento di progetto, ovvero 25%, 50%, 75% e 100% del carico da vento di progetto.

Per il procedimento in pressione negativa seguire il metodo che viene applicato in pressione positiva

5.4. Test sismico statico

Riferimento normativo: UNI EN 13830:2015

Procedimento di prova: La prova consiste nel sollecitare il campione con N. 3 cicli di spostamento quasi statici nel piano della facciata (un ciclo è definito come uno spostamento completo in una direzione, indietro al punto di origine, spostamento completo nella direzione opposta, e di nuovo al punto di origine). Lo spostamento di progetto deve essere valutato dall'organismo notificato secondo i movimenti interpiano previsti del provino sottoposto a prova. Per i modelli multipiano, lo spostamento tra i livelli può variare a causa delle differenti altezze di piano. Lo spostamento deve essere misurato sull'elemento del pavimento mobile, non sul provino.



Ponzio s.r.l. - Via dei Fabbrì, snc - Z.I. Scerne - 64025 Pineto (TE) Italy - Tel. +39 085 94641 r.a. - Fax. +39 085 9461325
Reg. Imp. TE 00061490678 - Cap. Soc. € 1.560.000 int. vers. - C.F. e P.Iva 00061490678 - R.E.A. TE 49514 - N. Mecc. TE 002577
P.E.C. : amministrazione@pec.ponziosud.it - www.ponzioaluminium.com - info@ponzioaluminium.com
Soc. sogg. a Dir. e Coord. di Panser S.r.l. - Via Messina, 7 - 65122 Pescara (PE) Italy Cap. Soc. € 5.000.000,00 I.v. - C.F. e P.Iva 02118090683 - R.E.A. PE 154941 - P.E.C.: panserst@pec.it



5.5. Ripetizioni

- a) permeabilità all'aria
- b) tenuta all'acqua statica

Tutti i test precedentemente effettuati vengono ripetuti secondo i principi e le procedure precedentemente descritti

5.6. Prova di Resistenza al carico del vento – sicurezza (150% del carico di progetto)

Riferimento normativo: UNI EN 12179:2002

Procedimento di prova: Prova con pressione positiva. Quando richiesto, applicare una pressione di prova positiva pari al 150% del carico da vento di progetto come specificato nel prEN 13116:1997 per un periodo minimo di (15 ± 5) s.

Annotare ogni cambiamento nella condizione del provino. Aprire e chiudere tutte le finestre apribili 5 volte, serrandole infine nella posizione chiusa.

5.7. Crescendo Test

Riferimento normativo: AAMA 501.6

Procedimento di prova: Come indicato nell'AAMA 501.6-01, i "crescendo test" devono essere condotti su campioni rappresentativi per determinare lo spostamento dinamico nel piano che provoca la caduta di pannelli in vetro. Un "crescendo test" è caratterizzato da una serie concatenata di cicli sinusoidali costituiti da intervalli di "rampa" e intervalli di "ampiezza costante" formati da 4 cicli ciascuno. L'incremento di spostamento tra gli intervalli di ampiezza costante è di 6 mm. Le prove sono eseguite a una frequenza di $0,8 \pm 0,1/-0,0$ Hz per spostamenti fino a ± 75 mm e $0,4 \pm 0,1/-0,0$ Hz per spostamenti superiori a ± 75 mm.



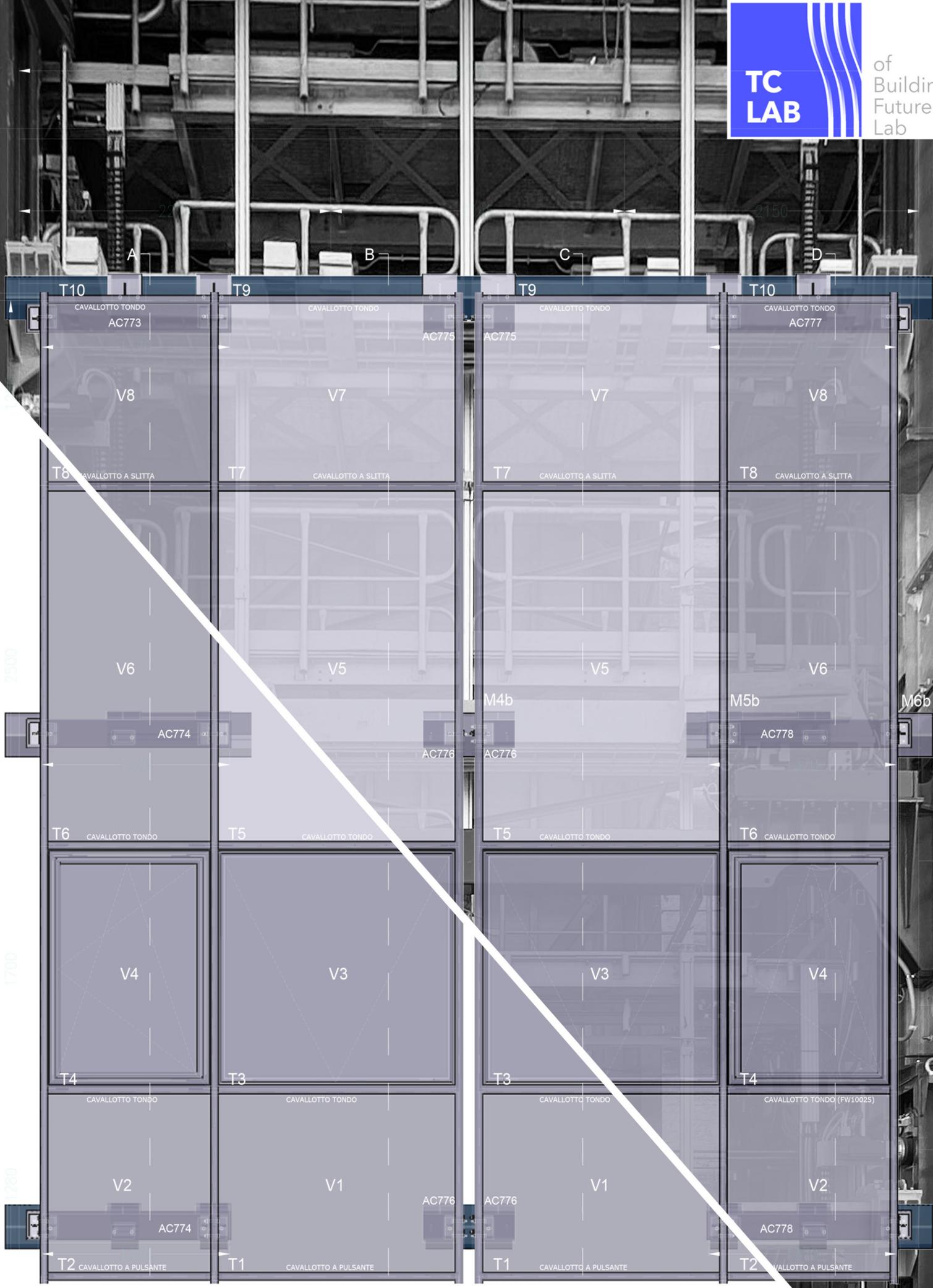
La sperimentazione Le valutazioni finalizzate al Design dell'elemento di connessione flessibile di una facciata Stick System

Abstract

Having evaluated the performance of the curtain wall type "Ponzio WS50 PG Curtain Wall" and the current connection systems used for the given system through the "simulation" and "testing" steps, the research aims to verify the validity of the results obtained through their superimposition. This step is strategic because, on the one hand, it allows us to identify the critical limits related to the ability of unconventional simulation software to read and analyze all the elements that constitute digital models. Among the final outputs of the research, the improvement of the software's functionality may allow it to be defined as a "reliable" tool and consequently construct a replicable design methodology for the various types of curtain wall systems, in which time and costs could be halved. On the other hand, it allows identifying the deficits of the experimental case study stressed seismic loads to outline the design proposal of the flexible connection element as a valid seismic mitigation strategy. The proposal's feasibility is investigated by evaluating the integration of intelligent materials, such as shape memory alloys with superelastic effects, into conventional connection elements, identifying themselves as non-structural adaptive components to improve the seismic performance of building envelopes. According to these considerations, the research emphasizes the strong industrial character, in which process innovation is closely interconnected with product innovation, identifying TRL 3, "Validation of the experimental concept", as the concluding phase of the doctoral thesis.

Highlights

- Identification of the current deficits of the SimSolid simulation software found through the process of comparing the results obtained from the simulation and testing activities;
- Upgrading some functions of the SimSolid software for the validation of the performance verification tool;
- Identification of the actual seismic performance of the "PONZIO WS50 PG" curtain wall system;
- Critical evaluation of the design of the flexible connection component as a seismic mitigation strategy;
- Identification of the innovation processes achieved during the doctoral research through the indicators of Technology Readiness Levels, TRL.



Confronto dei risultati ottenuti tramite step di simulazione e testing

La fase sperimentale della ricerca inerente le attività di verifica – avviate nel corso del precedente capitolo, attraverso la valutazione prestazionale della tipologia di facciata continua a montanti e traversi "Ponzo WS50 PG Curtain Wall" e gli attuali sistemi di connessione impiegati per il dato sistema, tramite gli step di "simulazione" e "testing" – persegue al fine di condurre la ricerca verso i *risultati specifici*.

Alla luce di ciò, il focus presente *Annex* è finalizzato a verificare la congruenza dei dati ottenuti dagli strumenti di verifica impiegati, attraverso alcune considerazioni critiche ad essi annessi. Tali metodi, infatti, sono stati affrontati singolarmente (Cfr. Capitolo 6). e i risultati non hanno subito il processo di valutazione per la validazione di tali strumentazioni.

Ai fini di questo passaggio, si ripropongono sinteticamente i risultati ottenuti dalla fase di simulazione e testing. Successivamente, attraverso un processo di sovrapposizione, la ricerca ha un duplice scopo:

- *individuare i limiti critici legati alla capacità del software di simulazione impiegato di leggere e analizzare tutti gli elementi che costituiscono i modelli digitali*. Tra gli output finali della ricerca, infatti, il miglioramento delle funzionalità del software può permettere di definire lo stesso come tool "affidabile" e di conseguenza costruire una metodologia progettuale replicabile per le varie tipologie dei sistemi di facciata continua, in cui tempi e costi potrebbero essere dimezzati. Ciò in un'ottica rivolta verso l'innovazione del processo di progettazione, basato su un approccio di tipo *fail-safe* favorendo così il carattere predittivo dei metodi di verifica impiegati nella fase sperimentale;

- *verificare quali siano i deficit più assimilabili al comportamento reale del sistema di facciata continua* – attualmente prodotto nel mercato italiano e sollecitato alle azioni sismiche –, al fine di delineare la proposta progettuale dell'elemento di connessione flessibile intendendosi come valida *strategia di mitigazione sismica*. In questo scenario, si raggiunge l'*obiettivo specifico* della presente ricerca, che risiede nel rendere l'intero sistema facciata come un dispositivo di smorzamento, in grado ovvero di trasmettere in maniera filtrata e graduale i carichi che vengono imposti durante gli eventi sismici, evitando così di sovraccaricare la struttura primaria di supporto.

I risultati ottenuti tramite step di simulazione

Per la fase di simulazione, i *Digital Mock-Up* – costituiti da due sistemi di facciata continua per la tipologia "WS50 PG" uguali nelle caratteristiche dimensionali e tipologiche ma differenti nell'assetto tecnologico del montante¹ – sono stati sottoposti ad *analisi lineare strutturale* imponendo uno spostamento pari a ± 75 mm, ovvero, pari al massimo spostamento di piano, *deriva di interpiano*, postulato all'interno del protocollo normativo americano AAMA 501.6-09 e adottato in fase di testing (Cfr. Allegato 11).

Considerando l'utilizzo di un software non convenzionale quale SimSolid, nel corso dell'attività di ricerca è emersa la necessità di redigere un *tool metodologico* (Cfr. Allegato 6) per meglio espletare e diffondere, nelle fasi successive della ricerca, l'utilizzo del software di simulazione computazionale di tipo *meshless*².

Come emerso nel Paragrafo 4.4 – "*Confronto tra i software di simulazione per la valutazione delle performance sismiche dei sistemi di facciata continua*", la metodologia di analisi agli elementi finiti, FEA – attraverso software di simulazione – per i sistemi di facciata continua è un approccio relativamente recente, sviluppato originariamente per verificare il comportamento dinamico delle strutture degli edifici. Per questo motivo, i maggiori limiti di tali strumenti di analisi risiedono nell'inadeguatezza degli stessi di "leggere" tutti gli elementi/materiali che costituiscono i sistemi di facciata e di conseguenza essere in grado di analizzarli in modo coerente rispetto le valutazioni che risultano dalle "*antagoniste*" attività di testing.

Fig. 1. Posizionamento virtuale dei Digital Mock-Up all'interno della Sezione TCLab

In questo senso, durante l'attività di simulazione, grande attenzione è stata posta sul modulo "connection", in cui – date le dimensioni millimetriche di alcuni elementi del sistema facciata, come ad esempio le guarnizioni in EPDM – sono stati i vari componenti del sistema "WS50 PG", semplificandoli geometricamente e identificando i valori numerici di "gap" e "penetration" utili per la creazione di tali connessioni. Attraverso l'utilizzo del "tool metodologico" – inteso anche come strumento di supporto per ricercatori e professionisti che si affacciano nel campo dei processi di simulazione computazionale (Cfr. Allegato 6) –, lo step "connection" – dispendioso in termini di tempo – potrebbe notevolmente ridursi. Riportando la trattazione ai risultati ottenuti tramite la fase di simulazione, la ricerca è perseguita verso lo sviluppo delle *analisi lineari strutturali* imponendo il massimo spostamento pari a ± 75 mm nella parte centrale del modello digitale corrispondente alla trave sismica del Test Lab della sezione TCLab³. In questa fase il Digital Mock-Up, con montante ad asse unico, ha presentato uno *stress allo snervamento* elevato, portando gli elementi quali montanti e traversi a valori di picco che superano 100 volte il valore di snervamento dell'alluminio (Cfr. Allegato 10). A tale scopo è stata sviluppata all'interno del Paragrafo 6.2.2 – "*Le analisi agli elementi finiti condotte sui Digital Mock-Up e la discussione dei risultati ottenuti*" una tabella contenente le principali vulnerabilità della facciata continua convenzionale ottenute dopo aver *processato* l'analisi strutturale lineare e di seguito riproposta, al fine di riportare in modo puntuale e sintetico i deficit riscontrati a seguito delle analisi condotte.

Tabella 1. Tipologie di vulnerabilità insorte attraverso l'analisi lineare sul Mock-Up attraverso SimSolid

Componente	Tipologia di vulnerabilità
Apribile a sporgere	- Snervamento del telaio del vetro, con valori di stress pari a 440 MPa.
Anta ribalta	- Snervamento del telaio e conseguente espulsione del vetro, con valori di stress pari a 297 MPa.
Giunti meccanici	- Distorsione dei giunti meccanici installati sull'intera altezza dei montanti con valori di stress pari a 300 MPa; - Distorsione dei giunti meccanici installati sui traversi nelle regioni esterne, con valori di stress pari a 529 MPa.
Guarnizioni in EPDM	- Deformazione dell'elemento con conseguente perdita di funzione della pressione di attrito tra gli elementi in alluminio e le superfici vetrate.
Montanti	- Distorsione del montante in direzione del massimo spostamento imposto con valori di snervamento pari a 400 MPa; - Distacco tra montante e traverso e conseguente espulsione del vetro dal telaio.
Traversi	- Sforzo di compressione nelle regioni esterne del traverso a causa del contatto rigido tra montanti e traversi che porta ad un distacco degli stessi.
Vetri	- Valori di stress che identificano la fase di fessurazione e conseguente rottura della superficie vetrata, i cui valori di stress sono pari a 155 MPa.

Dalle vulnerabilità, riscontrate nel processo di analisi lineare strutturale, emerge come i profili quali montanti e traversi presentano un eccessivo livello di stress (Cfr. Allegato 10) in corrispondenza delle regioni in cui questi elementi si innestano tra di essi e della zona centrale in cui viene imposto il massimo spostamento corrispondente alla trave sismica. Da ciò ne deriva che gli spostamenti imposti *causino il contatto critico vetro-telaio*, comportando non solo la possibile fessurazione dei sistemi vetrati nelle regioni dei bordi, ma possano causare la *rottura e conseguente espulsione del vetro dal telaio-facciata*, identificandosi come *flyng-debris*.

In riferimento all'eccessiva rigidità dei componenti in alluminio sottoposti agli spostamenti sismici, si evidenzia l'*inadeguatezza* da parte del software di simulare il comportamento reale del sistema facciata. I valori di stress, infatti, risultano essere fortemente in contrasto con le analisi strutturali (Cfr. Allegato 1) condotte dagli ingegneri dell'ufficio tecnico dell'azienda partner *Ponzio s.r.l.* sui singoli elementi del sistema "*WS50 PG*".

I risultati ottenuti tramite step di testing

La redazione del report tecnico-scientifico di prova – basato sulla comparazione di alcuni benchmarking interni ed esterni⁴ rispetto la sezione TCLab del Building Future Lab – consente di formulare il *comportamento reale* dei Physical Mock-Up. In questo senso, l'attività di testing viene intesa come uno *step fondamentale e strategico*, poiché conduce la sperimentazione verso risultati affidabili e di conseguenza viene inteso come *strumento di calibrazione* per il settaggio di alcune funzionalità del software posto in esame.

Le attività di verifica inerenti le procedure di testing riguardano la valutazione del comportamento dei Physical Mock-Up sia in *condizioni di servizio* che in *condizioni di sicurezza*. In linea con la tematica di ricerca, sono qui riproposti i risultati ipotizzati all'interno del report tecnico (Cfr. Paragrafo 6.4.2) *relativi alle verifiche sismiche*, ovvero i risultati derivanti dal test sismico statico – UNI EN 13830 Appendice D – e dal Crescendo Test – AAMA 501.06-09.

Nel primo caso, il test viene condotto – imponendo simultaneamente sui modelli fisici – tre cicli di spostamenti *quasi statici* pari a ± 50 mm. In questo caso, la procedura di prova non fa riferimento ai valori temporali che devono essere rispettati in fase di test, questo dovrà essere condotto "*abbastanza lentamente*" da evitare qualsiasi accelerazione o decelerazione. Grazie alla comparazione con i benchmarking interni, si è ipotizzato che il caso sperimentale non presenterà alcun danno e/o rottura degli elementi costitutivi dei Mock-Up. Di conseguenza, è stata valutata l'idoneità della facciata continua attraverso il criterio *pass*, come indicato all'interno della norma UNI EN 13830.

Nello specifico, nel *Mock-Up con montante ad asse unico* si prevede un *comportamento più rigido dell'elemento verticale* rispetto al secondo Mock-Up, la cui sezione e i relativi momenti di inerzia, però, dovrebbero essere in grado di accogliere le deformazioni imposte dagli spostamenti in fase elastica del materiale e quindi non portare tali elementi a deformazioni permanenti.

Diversamente nel *Mock-Up con montante ad asse spezzato*, le soluzioni tecnologiche-costruttive dell'elemento verticale permettono un maggiore grado di libertà, grazie all'utilizzo e posizionamento del canotto, conferendogli un *comportamento più flessibile*.

In *entrambi i Mock-Up* gli elementi di connessione montante-traverso, cavallotti a pulsante e tondi, non dovrebbero essere intesi come elementi critici, al contrario, sono in grado di accogliere gli spostamenti indotti durante tale test. Infine, la diminuzione dell'ingresso vetro a 10mm nella parte di testa dei Mock-Up dovrebbe favorire il movimento roto-traslante dell'elemento vetrato, evitando il contatto critico vetro-telaio. Nelle parti dei Mock-Up in cui l'ingresso vetro è pari a 13 mm, i piccoli spostamenti quasi statici non dovrebbero portare gli elementi vetrati ad incorrere nella fase di fessurazione del vetro, seppur è possibile che l'elemento vetrato entri in contatto con il telaio-facciata.

Diversamente il *Crescendo Test* consiste in una serie concatenata di intervalli quali "*rampa di salita*" e di intervalli di "*ampiezza costante*", costituiti da quattro *cicli sinusoidali* ciascuno.

In questo modo, si è ipotizzato che i modelli fisici siano stati sottoposti a spostamenti sull'asse orizzontale di piano con valori in positivo e negativo e con movimenti sinusoidali ad ampiezze di rampa gradualmente e progressivamente maggiori fino a uno spostamento dinamico pari a ± 75 mm e con una frequenza di $0,8 \pm 0,1/0,0$ Hz.

Grazie alla comparazione con i benchmarking interni, si è ipotizzato che per il *caso del Mock-Up con montante ad asse unico* si potrebbero registrare le seguenti condizioni:

- *maggiori deformazioni nell'elemento montante* a causa del comportamento rigido sottoposto a spostamenti che può causare ad alcune fessurazioni nella parte inferiore del Mock-Up dovuto al valore dell'ingresso vetro pari a 13 mm e all'utilizzo del cavallotto a pulsante per la connessione montante-traverso inferiore. Tali deformazioni potrebbero causare la fuoriuscita dalla sede delle guarnizioni;
- *piccole fessurazioni degli elementi vetrati* nella parte centrale del Mock-Up, causate dal maggiore spostamento in corrispondenza della trave sismica, il cui comportamento viene però migliorato grazie alla presenza dei cavallotti tondi. Gli apribili potrebbero subire alcuni danni. Nello specifico, si prevede che per il caso dell'apribile anta a ribalta, il sistema si comporti in modo migliore rispetto all'apribile a sporgere grazie alle sue dimensioni, tuttavia è possibile che si presentino alcune deformazioni che inficino il sistema di apertura. Diversamente per il secondo apribile, le dimensioni del vetro potrebbero comportare il contatto critico vetro-telaio portando ad alcune fessurazioni negli angoli che hanno subito il contatto;
- nella parte di testa del Mock-Up grazie alla posizione rispetto alla trave sismica e diminuzione dell'ingresso vetro è ipotizzabile che *non si registri alcun tipo di fessurazione*;
- gli elementi di connessione staffa al muro potrebbero subire alcune piccole deformazioni di tipo elastico nella parte centrale del Mock-Up in corrispondenza della trave sismica e quindi del massimo spostamento imposto.

Per il *secondo Mock-Up* invece, ad asse spezzato, il comportamento dinamico del sistema sollecitato riguarda le seguenti ipotesi:

- *deformazioni minori nell'elemento montante*, grazie all'utilizzo del canotto asolato che consente all'elemento verticale di compiere piccoli spostamenti registrando un comportamento più flessibile;
- *piccole fessurazioni* nella parte inferiore del Mock-Up dovute alle soluzioni tecnologiche di connessione montante e traverso, costituite dall'utilizzo del cavallotto a pulsante, causando, come nel Mock-Up con montante ad asse unico, la fuoriuscita dalla sede delle guarnizioni;
- *piccole fessurazioni* degli elementi vetrati nella parte centrale del Mock-Up, causate dal maggiore spostamento in corrispondenza della trave sismica, il cui comportamento viene però migliorato grazie alla presenza dei cavallotti tondi. Gli apribili potrebbero subire alcuni danni. Nello specifico, si prevede che per il caso dell'apribile anta a ribalta, il sistema si comporti in modo migliore rispetto all'apribile a sporgere grazie alle sue dimensioni, tuttavia è possibile che si presentino alcune deformazioni che inficino il sistema di apertura. Diversamente per il secondo apribile, le dimensioni del vetro potrebbero comportare il contatto critico vetro-telaio portando ad alcune fessurazioni negli angoli che hanno subito il contatto;
- nella parte di testa del Mock-Up grazie alla posizione rispetto alla trave sismica e diminuzione dell'ingresso vetro è ipotizzabile che *non si registri alcun tipo di fessurazione*;
- gli elementi di connessione staffa al muro potrebbero subire alcune piccole deformazioni in campo elastico minori rispetto al primo Mock-Up, in corrispondenza della trave sismica.

Il processo di confronto dei risultati ottenuti dagli strumenti di verifica impiegati

Riportati i singoli risultati ottenuti dalle fasi di simulazione e testing, la Tabella 2 mette in relazione il comportamento dei componenti principali del Mock-Up con montante ad asse unico⁵ in condizioni di carico sismico, in modo tale da valutare la possibile congruenza tra i metodi di verifica impiegati per il dato sistema sperimentale.

I risultati ottenuti dalle attività di verifica attraverso gli step simulazione e testing evidenziano come la metodologia di lettura dei possibili danni e/o fallimenti dei componenti del sistema di facciata non sia del tutto sovrapponibile.

Tabella 2. Comparazione delle deformazioni risultanti dalle attività di simulazione e testing rispetto i componenti principali del sistema "PONZIO WS50 PG" per il caso del Mock-Up con montante ad asse unico

Componenti del Sistema "PONZIO WS50 PG"	ATTIVITA' DI SIMULAZIONE	ATTIVITA' DI TESTING	
	Analisi strutturale lineare ± 75 mm	Test Sismico Statico ± 50 mm	Crescendo Test ± 75 mm - 0,8 ± 0,1/-0,0 Hz
Apribile a sporgere	Deformazioni permanenti nei componenti del telaio.	Nessun tipo di deformazione permanente	Presenza di fessurazioni nelle regioni angolari degli elementi vetrati
Anta ribalta	Deformazioni permanenti nei componenti del telaio e valori di fessurazione nei regioni angoli del vetro.	Nessun tipo di deformazione permanente	Deformazioni di tipo elastiche del del telaio e presenza di fessurazioni nelle regioni angolari degli elementi vetrati
Giunti meccanici	Deformazioni permanenti dei giunti installati sui profili del pressore-montante e nella parte centrale del modello digitale dei pressori-traversi corrispondenti al posizionamento della trave sismica.	Nessun tipo di deformazione permanente	Nessun tipo di deformazione permanente
Guarnizioni in EPDM	Perdita di funzione della pressione di attrito tra gli elementi in alluminio e le superfici vetrate.	Nessun tipo di deformazione permanente	Perdita di funzione della pressione di attrito nella parte di testa del Mock-Up
Montanti	Deformazione permanente del profilo montante in corrispondenza del valore di massimo spostamento imposto con movimento torsionale del profilo in alluminio.	Nessun tipo di deformazione permanente	Deformazioni di tipo elastiche del profilo montante in corrispondenza del valore di massimo spostamento
Traversi	Sforzo di compressione nelle regioni esterne del traverso.	Nessun tipo di deformazione permanente	Deformazioni di tipo elastiche del profilo traverso in corrispondenza del valore di massimo spostamento
Vetri	Valori di stress che identificano la fase di fessurazione e conseguente rottura della superficie vetrata nella parte centrale del modello digitale.	Assenza di fessurazioni e/o rotture degli elementi vetrati	Presenza di fessurazioni nelle regioni angolari degli elementi vetrati nella parte centrale del Mock-Up in corrispondenza della trave sismica.

Infatti, come più volte espresso, nel caso delle attività di testing non esistono ad oggi strumenti di misurazione che siano in grado di rilevare numericamente i valori di stress dei singoli componenti e/o dell'intero sistema stressato, la valutazione del comportamento del Mock-Up sollecitato è di tipo visivo.

Nonostante questo limite critico relativo alla fase di testing, tale metodo di verifica rimane da considerarsi, allo stato attuale, il più *affidabile* rispetto al comportamento reale dei sistemi sollecitati dalle azioni fenomenologiche esterne.

Dalla lettura delle deformazioni risulta evidente come il Mock-Up sottoposto ad *analisi strutturale lineare* tramite simulazione computazionale – seppur non siano stati settati gli intervalli quali "rampa di salita" e di "ampiezza costante" come nel caso del Crescendo Test – riporti un comportamento peggiorativo rispetto la simulazione "dal vero" riproposta all'interno del laboratorio di prova specializzato, la sezione TCLab.

Nello specifico, nel report tecnico di prova è stato ipotizzato che i componenti principali quali profili montanti e traversi non subiscano alcuna deformazione di tipo permanente e il materiale rimanga nella fase elastica del diagramma *stress-deformazione*.

L'incongruenza dei risultati ottenuti è relativa anche agli elementi vetrati, infatti, i valori di stress registrati a seguito dell'analisi lineare identificano la fase di rottura⁶ nella parte centrale del modello digitale – in corrispondenza del valore massimo di spostamento.

Diversamente una volta eseguiti i test nella fase di ispezione del provino è stato ipotizzato che vengano riscontrate solo alcune piccole fessurazioni nelle regioni angolari degli elementi vetrati in corrispondenza della trave sismica, il cui valore di ingresso vetro è pari a 13mm e gli spostamenti indotti possono incorrere al contatto critico vetro-telaio.

Infine, il comportamento degli elementi in EPDM quali le guarnizioni non è risultato congruente tra i due metodi di verifica impiegati. Nella fase di analisi computazionale, in netta antitesi al test di laboratorio, i valori di stress di tali elementi identificano una perdita della funzione di attrito fra la superficie di contatto esterna dell'elemento in EPDM e il sistema vetrato portando alla fuoriuscita dello stesso elemento.

Alla luce di tali considerazioni, si evince come le funzionalità attuali del software non siano ancora in grado di analizzare il comportamento reale dei sistemi di facciata continua sottoposti agli stress sismici. Tuttavia, grazie al continuo scambio di feedback con gli sviluppatori del software SimSolid dell'azienda partner, *Altair Software and Services SL*, è stato proposto di incrementare alcune funzionalità dello strumento di verifica.

L'upgrade delle funzionalità del software

Il miglioramento del software riguarda le funzionalità del modulo "*connection*" e con particolare riferimento alle modalità con le quali gli elementi siano messi in contatto fra di loro. Come discusso all'interno del Paragrafo 6.2.2 – "*Le analisi agli elementi finiti condotte sui Digital Mock-Up e la discussione dei risultati ottenuti*" – la condizione più assimilabile al comportamento reale sarebbe di impostare i vincoli su entrambe le superfici di contatto – interne/esterne delle guarnizioni e le superfici vetrate – le connessioni di tipo "*sliding without friction*" in quanto, nonostante la pressione di attrito esercitata, la caratterizzazione materica degli elementi in EPDM può consentire piccoli spostamenti in piano favorendo la flessibilità dell'intero sistema facciata.

In questo scenario, la proposta di *upgrade* delle funzionalità del software dovrebbe conferire allo strumento computazionale maggiore affidabilità costituendosi come strumento valido per il processo di analisi agli elementi finiti, FEA.

In quest'ottica la ricerca mira a mettere in atto un'innovazione di tipo incrementale rivolta, da un lato, verso l'innovazione di processo, in cui l'affidabilità del software può identificarlo come strumento *valido* per i processi di progettazione degli involucri edilizi. Dall'altro lato, la proposta di *upgrade* sopra menzionata identifica un'innovazione di prodotto legata alle capacità del software di leggere e analizzare tutti gli elementi che costituiscono i sistemi di facciata continua per la loro verifica prestazionale. I processi di innovazione saranno ripresi nell'ultima parte del presente *Annex* al fine di individuare rispetto ai risultati specifici – ottenuti nel corso della ricerca dottorale – quali sono i livelli di maturità tecnologica, TRL, raggiunti.

Conclusa la valutazione dei metodi di verifica impiegati per la valutazione del comportamento dinamico del caso studio sperimentale, la ricerca si orienta verso la discussione della fase progettuale dell'elemento di connessione flessibile emersa all'interno del Paragrafo 4.3 – *I materiali avanzati per applicazioni estreme*. Ciò avviene attraverso l'indagine della fattibilità tecnica ed economica del componente adattivo non strutturali finalizzato al miglioramento delle prestazioni sismiche degli involucri edilizi, grazie all'integrazione di materiali intelligenti quali le leghe a memoria di forma con effetti superelastici negli elementi di connessione interposti tra il telaio-facciata e la struttura primaria di supporto.

Valutazioni finali utili alla progettazione dell'elemento di connessione flessibile

Ai fini della valutazione tecnica-prestazionale del componente di connessione flessibile, si specifica che questa fase fa riferimento ai risultati ottenuti dal report tecnico di prova⁷ (Cfr. Paragrafo 6.4.2), per la definizione degli attuali *deficit* del caso studio sperimentale sottoposto agli stress sismici.

Queste valutazioni non possono di fatto esimersi dalle considerazioni critiche emerse dallo studio e l'analisi del background scientifico di riferimento ed affrontate nella prima sezione teorica della presente ricerca (Cfr. Paragrafo 4.1). Nel percorso evolutivo della ricerca, infatti, sono state analizzate, in maniera scalare, le criticità che insorgono durante gli eventi sismici, sia attraverso l'analisi di alcuni casi studio relativi al comportamento dei sistemi di facciata continua a seguito degli eventi sismici del passato, sia attraverso lo studio di alcuni filoni di ricerca inerenti il miglioramento delle prestazioni sismiche dei sistemi involucrati, attraverso i consolidati strumenti e metodi di verifica prestazionale.

Dai diversi versanti della ricerca, l'attenzione verso il miglioramento delle prestazioni sismiche si è rivolta, in maggiore misura, a soluzioni tecnologiche atte a evitare il contatto critico vetro-telaio facciata, ciò a causa del comportamento tipicamente fragile delle superfici vetrate. Alla luce di tali considerazioni, durante la fase del Project Mock-Up, PMU (Cfr. Paragrafo 6.1), sono state messe in atto alcune variabili che possono favorire il movimento roto-traslante delle superfici vetrate all'interno della "tasca" del telaio, conferendo maggiore flessibilità all'intero sistema e di seguito riproposte:

- l'utilizzo di *due tipologie di cavallotti* (tondo e a pulsante), quali elementi di connessione traverso-montante;

- un *aumento variabile dello spazio* che intercorre tra il bordo del vetro e la "tasca" del telaio (10-13 mm) in cui si innesta il sistema vetrato, al fine di evitare il contatto critico tra vetro-telaio;

- la scelta della tipologia di *vetro stratificato* che consente il miglioramento della risposta del sistema vetrato sottoposto a spostamenti di interpiano.

All'interno del report tecnico di prova, infatti, la prova in Crescendo Test dovrebbe di fatto non portare le superfici vetrate a rottura. Tuttavia, nella parte centrale dei modelli fisici – corrispondente al massimo spostamento imposto pari a ± 75 mm e con valori di ingresso vetro pari a 13 mm – si è ipotizzata la presenza di alcune piccole *fessurazioni* nelle regioni angolari dei vetri.

Tali deficit mostrano come il comportamento del sistema facciata – seppur migliorato attraverso l'adozione degli aspetti tecnici e tecnologici sopracitati – non sia ottimale in caso di forti terremoti con valori di magnitudo elevati. La presenza delle fessurazioni potrebbe compromettere le condizioni di servizio dei sistemi di facciata, nonostante l'ispezione a seguito di sisma consentirebbe l'utilizzo immediato della struttura⁸.

Le procedure di prova postulate all'interno dei protocolli normativi di riferimento (Cfr. AAMA 501.6-09), infatti, non prevedono la ripetizione dei test – quali le prove di permeabilità all'aria, tenuta all'acqua e resistenza al carico da vento – dopo avere eseguito la prova distruttiva. Per queste ragioni, non è possibile prevedere quale siano le performance "di servizio" reali del sistema una volta sottoposto a stress sismico.

Un altro importante aspetto riguarda il limite critico del caso studio sperimentale di non poter registrare gli stress che vengono trasferiti sulla struttura primaria di supporto dal sistema di facciata sollecitato. A fronte di ciò, l'obiettivo di migliorare le prestazioni sismiche del sistema facciata persegue tenendo in considerazione i danni riscontrati in fase di testing e riprendendo la discussione sui sistemi di connessione avanzata (Cfr. Paragrafo 4.2). Nel corso della trattazione, l'attenzione è stata posta – tra le varie tipologie discusse – sulle *connessioni con smorzamento per attrito* (Figura 2), sviluppate dall'intuizione di alcuni ricercatori attraverso l'osservazione del comportamento dei freni automobilistici.

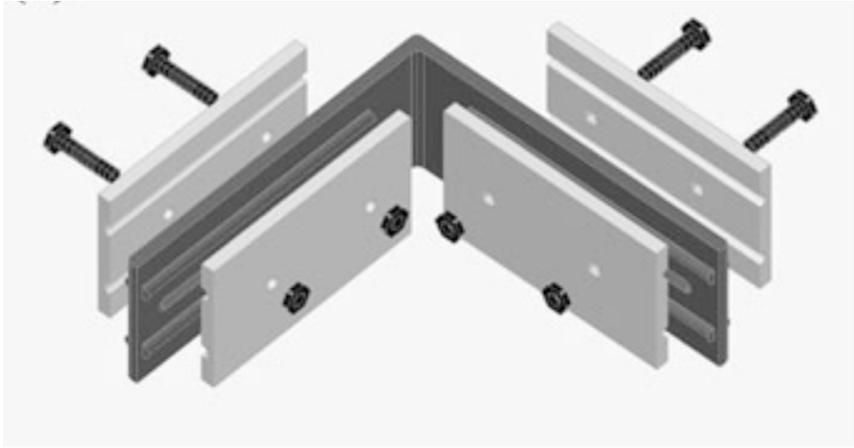


Fig. 2. Componenti costitutive della connessione con smorzamento per attrito proposto da Khoraskani (2015)

Questi tipi di connessione si presentano a livello formale simili alle staffe di connessione tradizionale in alluminio estruso ma con l'alloggiamento di un materiale che, per la capacità di attrito tra due superfici, "frena" le forze sismiche, evitando di sovraccaricare la struttura primaria di supporto – trasferendo i carichi in modo graduale e filtrato – ed evitando la deformazione del telaio-facciata.

Allo stato attuale, tali sistemi di connessione non risultano essere entrati nel mercato produttivo a causa della scarsa conoscenza sui materiali con capacità di attrito, facendo emergere la necessità di condurre la ricerca verso lo studio di materiali che siano in grado di accogliere tali deformazioni e di migliorare la capacità di *autocentraggio*.

In questo senso, l'innovazione di tipo incrementale – che ci si propone di attuare – riguarda il miglioramento delle caratteristiche funzionali materiche di questi componenti. Ciò avviene secondo una logica sistemica incentrata sull'indagine dei *materiali* cosiddetti *intelligenti* che siano in grado di conferire all'intero sistema involucro la loro capacità adattiva.

La valutazione della lega a memoria di forma

L'attenzione è stata posta sull'avanzamento della conoscenza nella classe dei materiali a memoria di forma SMA, grazie all'effetto superelastico SE, e nelle loro tecniche di produzione. Nel corso degli ultimi anni, infatti, grazie all'avanzamento delle conoscenze sul comportamento termomeccanico, questa classe di materiali ha registrato importanti sviluppi. Grazie alle proprietà termofisiche, i materiali a memoria di forma sono in grado di reagire in maniera attiva e intelligente non solo ad azioni di "carico-scarico" ma rispondono ai cambiamenti di temperatura. Questi studi hanno portato di fatto a utilizzare questa tipologia di materiali in diversi settori di scienza e tecnica, innovandone anche il processo di produzione. Derivante da altri settori, come biomedico e aerospaziale, infatti l'innovazione delle leghe a memoria di forma è spinta dalla necessità che queste diventino sempre più performanti, leggere e di dimensioni ridotte, diminuendo così i costi di produzione.

Alla luce di ciò, è stata la validata la proposta che il miglioramento dei dispositivi di connessione possa avvenire applicando alle *connessioni con smorzamento per attrito* una piastra strato "sottile" con la lega a memoria di forma superelastica, la lega *NiTi*.

In prima ipotesi, la configurazione del sistema di connessione era costituita differenziando – sia in termini formali che materici – il corpo delle staffe dalle ali (Cfr. Paragrafo 4.3). Il continuo scambio di feedback con l'azienda Ponzio s.r.l. ha contribuito all'evoluzione della fase progettuale del componente.

La configurazione tecnologica e materica del componente flessibile innovato

Come mostrato nella Figura 3, il sistema di connessione è costituito da quattro piastre in alluminio – per ogni singola staffa – alle quali viene interposta una piastra in lega a memoria di forma costituendo un sistema di tipo composito – ovvero piastra in alluminio, strato in lega a memoria di forma e piastra in alluminio.

A livello formale – in linea con la configurazione tipologica delle attuali *connessioni con smorzamento per attrito* – il sistema di connessione flessibile "innovato" risulta sovrapponibile ai sistemi di connessione staffa a muro tradizionali attualmente in uso nel mercato e impiegati per l'ancoraggio dei sistemi di facciate continue a marchio "Ponzio".

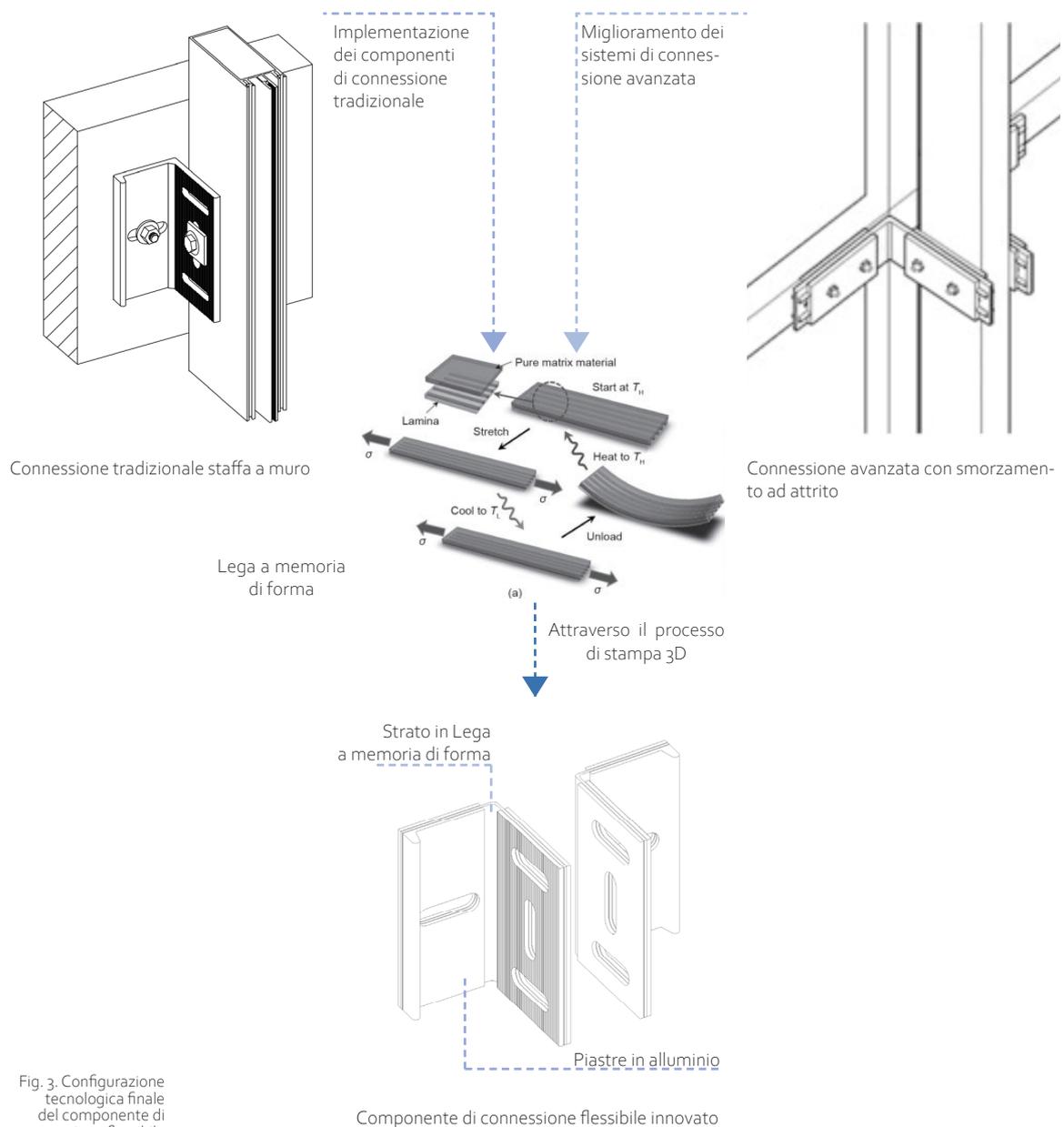


Fig. 3. Configurazione tecnologica finale del componente di connessione flessibile

In questo scenario, l'impiego di connessioni flessibili nell'intero sistema di ancoraggio tra il telaio-facciata e la struttura primaria di supporto può di fatto conferire al sistema involucrato le capacità dei dispositivi di smorzamento. Al fine di agevolare gli spostamenti indotti dalle azioni sismiche, nelle tre direzioni, la configurazione delle *innovate* staffe prevede nella parte di ancoraggio alla struttura primaria di supporto una barra in alluminio estruso tipica delle connessioni scorrevoli (Cfr. Paragrafo 4.2), progettate per migliorare le *tolleranze di spostamento* che si riscontrano nella fase di posa in opera del sistema. Altre considerazioni riguarderanno la configurazione "*asolata*" delle staffe.

Infatti, la configurazione di tipo composito del componente flessibile, come mostrato nella Figura 4, dovrà essere realizzata predisponendo nella superficie di contatto tra la piastra in alluminio estruso e la piastra in lega a memoria di forma un sistema "*di scorrimento*" che sia in grado di migliorare l'aderenza/attrito tra le due superfici favorendo così la capacità di ricentraggio del materiale avanzato fra le piastre corrispondenti. Tale configurazione impone una diminuzione dei valori dimensionali delle attuali asole e un aumento di spessore delle singole piastre in alluminio estruso.



Fig. 4. Posizionamento e configurazione del sistema di scorrimento fra le superfici di contatto della connessione flessibile

Un altro importante aspetto riguarda il processo di produzione di tali staffe. Come emerso nel corso della trattazione della presente ricerca, gli aspetti legati alle strategie della *Circular Economy* – grazie all'ausilio delle tecnologie abilitanti derivanti dalla quarta rivoluzione industriale – stanno modificando radicalmente i processi di produzione. Fra i temi, la diminuzione degli sfridi di lavorazione favorisce i processi di stampa 3D. Le recenti innovazioni sulla produzione delle leghe a memoria di forma risultano in linea con quanto espresso. Per queste ragioni, lo strato della lega a memoria di forma del componente di connessione flessibile sarà prodotto tramite la tecnica dell'Additive Manufacturing.

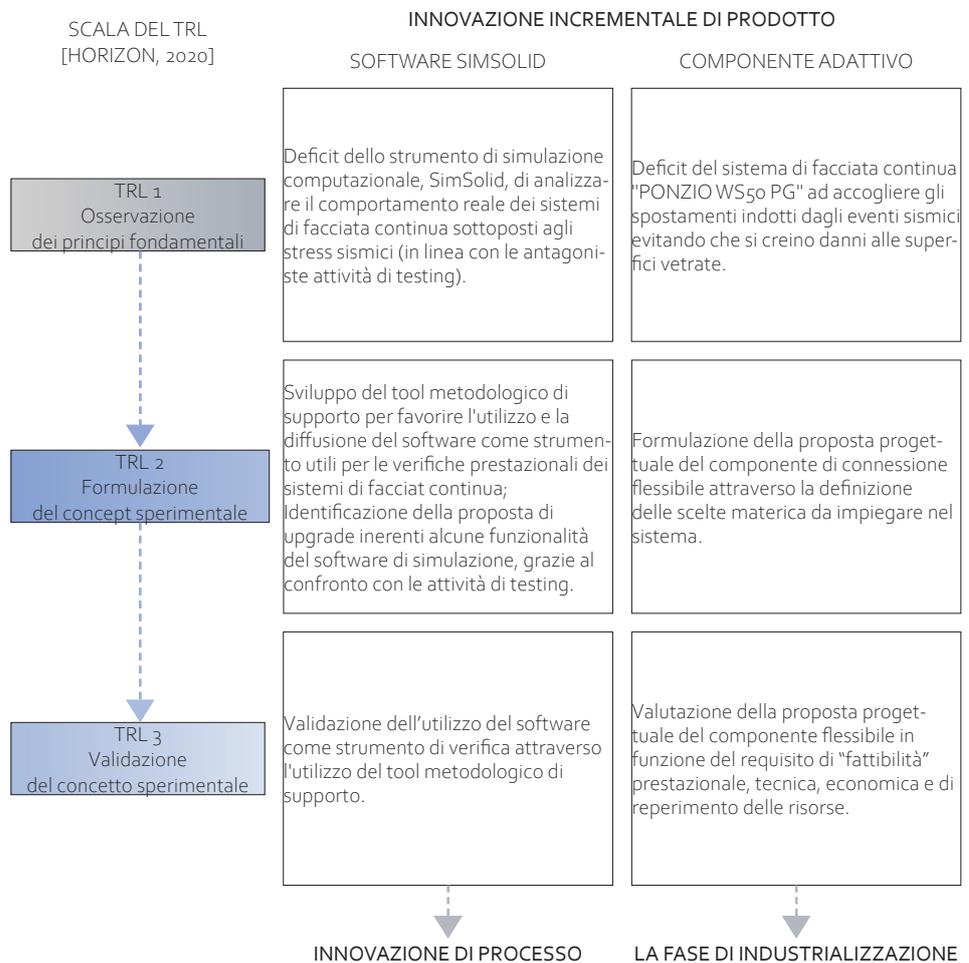
Attraverso la valutazione della configurazione finale del componente di connessione flessibile si raggiunge il *risultato specifico* della tesi, identificandosi come un componente adattivo non strutturale per il miglioramento delle prestazioni sismiche degli involucri edilizi. Nelle fasi successive della ricerca infatti, la progettazione e valutazione del comportamento dinamico del sistema di ancoraggio telaio-facciata e struttura primaria di supporto apre diverse traiettorie di sviluppo, tra cui la *fase prototipazionale* del componente adattivo. Prima di fare questo passaggio, risulta necessario trattare i processi di innovazione che sono stati messi in atto all'interno della ricerca dottorale. Tali tematiche costituiscono il *focus* del successivo paragrafo.

I processi di innovazione del progetto di Ricerca

Dai risultati specifici ottenuti la ricerca ha messo in atto:

- un'innovazione del *processo* di progettazione attraverso l'utilizzo di strumenti di valutazione prestazionale basati su un approccio *fail-safe*;
- una duplice innovazione incrementale di *prodotto* relativa, al miglioramento delle funzionalità del software impiegato e all'implementazione delle complessive prestazioni sismiche dell'involucro edilizio attraverso la configurazione del componente adattivo non strutturale.

L'interrelazione tra innovazione di prodotto e di processo costituisce il *focus* del presente paragrafo. Il carattere fortemente industriale della ricerca – grazie al supporto delle aziende partner *Ponzio s.r.l.* e *Altair Software and Services SL* e al contributo della *Sezione TCLab del BFL* – ha permesso di definire in modo puntuale i processi di innovazione messi in atto. Alla luce di ciò, il concetto di innovazione – e della sua possibile e necessaria "*misurabilità*" – è stato affrontato nel corso della tesi alle diverse scale, servendosi del parallelismo con il *TRL (Technologies Readiness Level)*, quale strumento di misurazione per l'innovazione. Infatti, ogni capitolo è stato associato ad un livello del TRL corrispondente, identificando nel TRL 3 "*Validazione del concetto sperimentale*" lo step finale della ricerca.



Per meglio espletare tale processo di innovazione, risulta necessario ripercorrere le azioni che hanno condotto la ricerca verso i relativi livelli di maturità tecnologica conseguiti.

Il raggiungimento del TRL 1 "*Osservazione dei principi fondamentali*" è avvenuto grazie alle considerazioni critiche emerse nella prima sezione teorica. La necessità di avanzare le conoscenze nel campo della progettazione antisismica degli involucri edilizi ha di fatto evidenziato un *gap* tra le innovazioni attuate dal settore Ricerca & Sviluppo aziendale – attraverso le prestazioni raggiunte dagli attuali componenti ed elementi dei sistemi di facciata continua prodotti – e le innovazioni proposte in campo accademico – costituite dagli attuali filoni di ricerca che mirano al miglioramento delle prestazioni sismiche degli involucri edilizi.

Tali studi scientifici dimostrano come, seppur non entrati nel mercato produttivo, l'utilizzo di componenti di *connessione avanzata* – per il sistema di ancoraggio tra il telaio-facciata e la struttura primaria di supporto – sia stato affrontato alle diverse scale. Dal background scientifico, infatti, deriva la consapevolezza che la progettazione dei sistemi di facciata continua occupi oggi un ruolo strategico, in cui il comportamento degli stessi – in tutti gli aspetti funzionali e prestazionali – deve essere valutato *ex-ante*.

Da qui, la verifica del comportamento dinamico del sistema di facciata a marchio "*Ponzio*" ha condotto la ricerca verso:

- la valutazione degli attuali metodi di verifica attraverso gli strumenti di simulazione la cui validità potrebbe entrare a far parte del complesso processi di progettazione, riducendo tempi e costi dello stesso processo;
- la valutazione del componente adattivo non strutturale finalizzato al miglioramento delle complessive prestazioni sismiche del caso studio sperimentale.

Procedendo con ordine, l'attenzione viene posta sulla prima valutazione sopracitata e ai processi di innovazione che ne sono derivati.

Il confronto dei risultati ottenuti tramite gli step di simulazione e testing ha permesso di definire in modo puntuale gli attuali deficit di tale strumento di verifica.

I maggiori limiti critici riscontrati per la risoluzione delle analisi agli elementi finiti riguardano, in maggior misura, il modulo "*connection*" (Cfr. Paragrafo 6.2.1). A causa delle dimensioni notevolmente ridotte di alcuni elementi del sistema di facciata, infatti, è stato necessario proporre:

- *l'implementazione delle tolleranze geometriche* utili per la creazione delle connessioni tra i vari elementi del sistema posto in esame;
- *il miglioramento delle modalità* con le quali vengono create le connessioni.

Ciò consentirebbe di migliorare la funzionalità del software a rilevare le superfici di contatto e di impostare – su entrambe le superfici di contatto interne/esterne delle guarnizioni e le superfici vetrate – le connessioni di tipo "*sliding without friction*" senza incorrere – in fase di analisi – al distacco tra i vari elementi che costituiscono il sistema di facciata continua.

Al fine di espletare e diffondere l'utilizzo di tale software è stato sviluppato, nel corso della presente ricerca, un *tool metodologico* di supporto per progettisti, ricercatori del settore delle facciate che si affacciano ai processi di simulazione. Tale strumento viene inteso come un importante *output della ricerca*, poiché consente di avviare i processi di analisi – dimezzando i tempi di apprendimento del software – ed essere considerato quale strumento affidabile nei processi di progettazione.

In questo scenario, la proposta di *upgrade* di alcune funzionalità del software e lo sviluppo del *tool metodologico di supporto* hanno condotto la ricerca verso il raggiungimento del TRL 2 "*Formulazione del concept tecnologico*". Infine, l'utilizzo del *tool metodologico* può intendersi replicabile in altre tipologie di facciata continua e convergendo verso il TRL 3 "*Validazione del concetto sperimentale*".

Rispetto la seconda valutazione inerente al comportamento dinamico dell'attuale sistema di facciata a marchio "*Ponzio*", le attività di verifica hanno dimostrato come il sistema di

facciata "WS50 PG" risulti, attualmente, vulnerabile alle azioni indotte dai terremoti. Infatti, la rilevazione di danni – quali le fessurazioni nelle regioni angolari delle superfici vetrate – conduce la ricerca verso il TRL 2 "*Formulazione del concept tecnologico*" attraverso la configurazione del componente flessibile innovato. Il componente adattivo si presenta a livello formale, sovrapponibile agli attuali elementi di connessione tradizionali impiegati per l'ancoraggio dei sistemi di facciata continua a marchio "Ponzo" alla struttura primaria di supporto. Di fatto, la soluzione tecnologica adattiva risulta implementata – rispetto ai componenti di connessione avanzata – nella configurazione materica grazie all'utilizzo della lega a memoria di forma, la lega *NiTi*.

La composizione materica del materiale intelligente ha condotto la ricerca verso la valutazione del possibile processo di produzione da impiegare per il sistema di connessione flessibile proposto. Le recenti innovazioni, provenienti dalla quarta rivoluzione industriale, hanno permesso di identificare nell'Additive Manufacturing la tecnica con il quale il materiale può essere estruso, favorendo la diminuzione degli sfridi di produzione, in linea con i principi della Circular Economy. La validazione della proposta progettuale del componente flessibile – in funzione del requisito di "*fattibilità*" prestazionale, tecnica, economica e di reperimento delle risorse – costituisce la fase conclusiva della tesi dottorale, grazie al raggiungimento del TRL 3 "*Validazione del concetto sperimentale*".

In conclusione, i processi d'innovazione messi in atto intendono sottolineare l'importanza di rafforzare la ricerca – nella sua accezione più ampia – e favorire la diffusione di modelli innovativi sfruttando le potenzialità che possono derivare dalla stretta collaborazione tra il settore Ricerca & Sviluppo delle imprese e l'ambito di ricerca delle università, il cui focus è incentrato a sostenere i processi per l'innovazione ed il trasferimento tecnologico.

Note

1. I Mock-Up – Digital Mock-Up e Physical Mock-Up – sono progettati con montanti da 125 mm ad asse unico e spezzato e traversi da 129,5 mm, le cui dimensioni nel complesso sono rispettivamente 6860 mm (altezza) x 6570 mm (larghezza). Per la messa in atto di diverse variabili all'interno dei singoli Mock-Up, montanti e traversi sono stati disposti in modo asimmetrico configurando campate ad altezza e lunghezza variabile, con 6 serie di specchiature fisse e due tipologie di apribili per Mock-Up, anta a ribalta e apribile a sporgere (Cfr. Allegato 3)
2. Si ricorda che uno dei maggiori vantaggi nell'utilizzare il software di simulazione SimSolid risiede nella funzionalità dello stesso di superare – grazie a complessi algoritmi – le fasi di modellazione e meshing e di essere in grado valutare il comportamento di qualsiasi tipo di materiale purché se ne conoscano le proprietà meccaniche, termiche e di fatica. (Cfr. Paragrafo 6.2 – "Modellazione e analisi agli elementi finiti del sistema facciata convenzionale tramite software di simulazione SimSolid".)
3. La scelta di riproporre anche il sistema tecnologico costruttivo della camera di prova, in cui verranno installati i modelli fisici, risiede nella volontà di riprodurre anche all'interno del software di simulazioni le condizioni reali in cui verrà eseguito il test di laboratorio. (Cfr. Paragrafo 6.2 *Il Design per il PMU (Project Mock-Up) del sistema di facciata convenzionale.*
4. Come espresso nel Paragrafo 6.5.2 – *Il report tecnico di prova* – tali benchmarking concernono:
 - il primo caso studio, che costituisce il riferimento per gli indicatori esterni relativo ai risultati ottenuti dalle procedure di prova condotte e certificate, per le condizioni di servizio in ambito normativo europeo, sulla tipologia di facciata "WS50 PG Curtain Wall" all'interno del banco di prova dell'azienda Ponzio s.r.l.;
 - il secondo caso studio, che costituisce il riferimento per gli indicatori interni relativo ai risultati ottenuti dalle procedure di prova condotte e certificate, per le condizioni di servizio e sicurezza in ambito normativo americano, su una tipologia di facciata continua di tipo Stick System – equiparabile ai Mock-Up sperimentali – testata all'interno della sezione TCLab del BFL.
5. Nella fase di confronto dei risultati ottenuti dalle fasi di simulazioni e testing, la scelta di valutare gli aspetti prestazionali del Mock-Up con montante ad asse unico risiedono nel comportamento prestazionale dello stesso. Infatti la presenza del canotto, quale elemento di connessione tra i due montanti conferisce all'intero sistema maggiore flessibilità. Ai fini della proposta progettuale, sarà preso in considerazione il sistema il cui comportamento presenta maggiori deficit.
6. Nel processo di analisi lineare strutturale – diversamente da altre tipologie di analisi come quella dinamica –, il software non mostra la fase di rottura degli elementi costitutivi dei modelli digitali. Questa è *intuitibile* attraverso i valori di stress registrati a seguito del processo di analisi.
7. La scelta di rifarsi ai risultati ottenuti dalle attività di testing risiede nella considerazione critica che questi risultino, allo stato attuale, quelli più congruenti rispetto al comportamento reale dei sistemi di facciata continua. Di fatti le criticità riscontrate nell'adozione del software di simulazione non possono del tutto essere considerate superate.
8. Tra le maggiori criticità in termini di costi, la perdita delle performance riconducibili alle condizioni di servizio dei sistemi di facciata continua comporta la sostituzione degli elementi danneggiati. Soprattutto in riferimento alla posa in opera delle tipologie a montanti e traversi, la sostituzione di tali elementi impone lo smontaggio dei profili quali carter e pressori. Ciò può e deve essere evitato attraverso soluzioni di mitigazione sismica atte ad evitare danni come fessurazioni nelle regioni angolari delle superfici vetrate.

Conclusioni

La tesi dottorale dal titolo: "*Seismic Mitigation strategies di componenti adattivi non-strutturali degli involucri. Processi di sperimentazione per il miglioramento delle prestazioni sismiche attraverso Simulazione e Testing*" si è sviluppata in ambito dei "Dottorati innovativi con caratterizzazione industriale" grazie al supporto delle aziende partner *Ponzio s.r.l* e *Altair Software and Services SL*, attraverso un approccio metodologico deduttivo schematico scalare scandito da fasi sequenziali che hanno strutturato la ricerca in tre parti, identificando i macro-temi discussi nel corso dei vari capitoli.

Nello specifico, la tesi si è proposta di rispondere all'esigenza di fornire una panoramica generale sulle indagini condotte nel settore accademico per l'implementazione delle performance delle facciate continue sollecitate alle azioni sismiche, attraverso metodi e verifiche sperimentali, in diversi domini di interesse. Da questo proposito, però, si può ritenere che la ricerca si sia costituita in due sezioni principali:

- una sezione "*teorica*", legata alle indagini condotte nell'ambito scientifico di riferimento, non scevra dalla contaminazione delle diverse discipline di scienza e tecnica. Lo scopo è incentrato sullo sviluppo di processi di sperimentazione legati non solo alla progettazione di componenti non-strutturali, ma anche alle caratteristiche che possono rendere gli stessi adattivi, con forti ricadute sugli strumenti impiegati nel processo di progettazione;
- una sezione "*propositiva-sperimentale*", incentrata sulla valutazione delle performance attuali del sistema di facciata *Stick System "WS50 PG Curtain Wall"*, correntemente in uso nel mercato italiano e prodotto dall'azienda partner, *Ponzio s.r.l.* attraverso due metodi e strumenti di verifica.

Con riferimento alla fase sperimentale, le valutazioni delle prestazioni della facciata sono state condotte attraverso una metodologia scandita da *due step*:

- il primo che riguarda la verifica del sistema di facciata, attraverso la *modellazione e l'analisi agli elementi* finiti servendosi del software di simulazione, *SimSolid*, fornito dall'azienda *Altair Software and Services SL*, imponendo carichi e spostamenti coerenti con le indicazioni fornite dalle normative di settore;
- il secondo step, è avvenuto tramite *procedure di prova normale* servendosi del laboratorio di testing, *la Sezione TCLab del BFL*, in condizioni di servizio e di sicurezza.

Il concetto di innovazione e della sua possibile e necessaria "*misurabilità*" è stato affrontato nel corso della tesi alle diverse scale, del parallelismo con il *TRL (Technologies Readiness Level)*, quale strumento di misurazione per l'innovazione identificando nel *TRL 3 "Validazione del concetto sperimentale"* lo step finale della ricerca.

Il processo di confronto e di "*sovrapposizione dei risultati ottenuti dalle attività di simulazione e testing*" è risultato uno step fondamentale e strategico, poiché ha condotto la sperimentazione verso la valutazione del comportamento dinamico più assimilabile al comportamento reale del sistema di facciata sollecitato. Dal report tecnico di prova è emerso come il sistema di facciata continua per il caso sperimentale seppure risulti in grado di sopportare le deformazioni causate dagli spostamenti sismici, presenta alcuni danni visibili, come le fessurazioni negli angoli degli elementi vetrati.

Tali risultati sono, di fatto, in netta opposizione con i risultati derivanti dalle attività di simulazione.

Alla luce di tali considerazioni, il testing è stato inteso come *strumento di calibrazione* per il settaggio di alcune funzionalità del software posto in esame, conducendo la ricerca verso due risultati specifici.

Il primo, relativo all'individuazione puntuale dei limiti critici legati alla capacità del software di simulazione SimSolid di leggere e analizzare tutti gli elementi che costituiscono i modelli digitali, al fine di proporli al miglioramento. Grazie al dialogo sinergico con l'azienda Altair Software and Services SL, la proposta di *upgrade* del software ha riguardato l'implementazione di alcune funzionalità inerenti il modulo "*connection*" e in particolare:

- l'*implementazione delle tolleranze geometriche* utili per la creazione delle connessioni tra i vari elementi del sistema posto in esame;
- l'*implementazione delle modalità* con le quali vengono create le connessioni in linea con il comportamento reale dei componenti ed elementi sollecitati alle azioni sismiche.

Lo strumento di simulazione computazionale implementato acquisisce maggiore affidabilità costituendosi come metodo di verifica valido per il processo di analisi agli elementi finiti, FEA.

In questo senso, il concetto di innovazione si è incentrato sul *miglioramento delle performance di prodotto*, con forti ricadute sull'*innovazione di processo* inteso come le procedure che costituiscono la fase di progettazione attraverso un approccio *fail-safe*, ovvero prevedendo *ex ante* i possibili danni che l'involucro subisce in caso di eventi sismici.

Il secondo risultato riguarda l'individuazione degli attuali *deficit* del sistema di facciata continua – attualmente prodotto nel mercato italiano e sollecitato alle azioni sismiche –, al fine di valutare la proposta progettuale dell'elemento di *connessione flessibile* emersa nella prima sezione teorica della ricerca. In questo senso, le recenti *innovazioni materiche* sono fortemente correlate alla nuova concezione di involucro edilizio, il cui scopo è legato alla progettazione e realizzazione di elementi con *capacità reattive*, in grado di regolare la loro configurazione o le loro proprietà fisiche in risposta ai cambiamenti delle condizioni ambientali esterne. Grande attenzione è stata posta all'evoluzione di materiali intelligenti con *effetti a memoria di forma SME* e *effetti superelastici SE*. Il punto focale riguarda la capacità del materiale di generare un movimento reversibile e trasferire all'intero sistema le *capacità adattive*, costituendo in un unico elemento in ciò che spesso viene attuato attraverso l'inserimento di attuatori e sensori sempre più complessi, informatizzati e digitalizzati.

Da questi assunti, la ricerca configura la proposta di incrementare la qualità delle prestazioni sismiche dei dispositivi di connessione applicando – alle *connessioni con smorzamento per attrito* – una piastra di strato sottile con la *lega a memoria di forma superelastica, la lega NiTi*. Il continuo scambio di feedback con l'azienda *Ponzio s.r.l.* ha contribuito all'evoluzione di tale proposta. Infatti, se in prima analisi la configurazione del componente adattivo non strutturale era costituita differenziando – sia in termini formali che materici – il corpo delle staffe dalle ali. Attraverso il processo di valutazione, la configurazione finale del sistema di connessione è costituita da quattro piastre in alluminio – per ogni singola staffa – alle quali viene interposta una piastra in lega a memoria di forma costituendo un sistema di tipo composito – ovvero piastra in alluminio, strato in lega a memoria di forma e piastra in alluminio, intendendosi come valida *strategia di mitigazione sismica*.

Con questi risultati specifici, si ritiene raggiunto il livello di maturità tecnologica TRL 3 "*Validazione del concetto sperimentale*" in cui la duplice innovazione incrementale di *prodotto* e l'*innovazione di processo* proposta, aprono la strada a diversi scenari di sviluppo futuro, avviando la *fase prototipale* del componente innovato, corrispondente al livello di maturità tecnologica TRL 4 "*Validazione tecnologica in ambiente di laboratorio*". Prima di fare questo passaggio, risulta necessario individuare i limiti e le problematiche aperte della tesi dottorale, al fine di trattare le traiettorie di ricerca *ex post* alla sperimentazione in modo critico e puntuale.

Limiti della ricerca e problemi aperti

Sviluppare i limiti e problemi aperti della ricerca consente di trattare in maniera critica le tematiche sinora affrontate preparando il terreno al paragrafo conclusivo relativo agli sviluppi futuri.

La tesi dottorale – e nello specifico la sezione sperimentale – si è incentrata sulla verifica prestazionale sismica di una determinata tipologia di facciata continua – a montanti e traversi – prodotta dall'azienda partner *Ponzio s.r.l.* e correntemente in uso nel mercato italiano. Quest'affermazione – corrispondente allo *status quo* della tesi – permette di delineare alcuni limiti della ricerca sviluppata, di seguito esposti e *focus* del presente paragrafo.

Come acclarato, le indagini condotte fanno riferimento ad una specifica tipologia di facciata continua. Per cui, la valutazione della vulnerabilità sismica è stata sviscerata – attraverso metodi e strumenti di verifica – in funzione di tale tipologia. Da ciò, emerge come i risultati ottenuti nella sezione sperimentale non possono essere, di fatto, del tutto assimilati alle valutazioni che ne deriverebbero dalla verifica di altre tipologie dei sistemi di facciata continua attualmente prodotti e in uso nel mercato italiano, come ad esempio le facciate a cellula, con vetro strutturale, sistemi a doppia pelle, ecc.

Tale limite riguarda finanche i componenti ed elementi che costituiscono il sistema di facciata indagato e nello specifico la proposta delineata, dalla presente ricerca, per il miglioramento delle prestazioni dei componenti di connessione impiegati per l'ancoraggio del sistema facciata alla struttura primaria di supporto. Nel corso della tesi dottorale, infatti, l'analisi dello stato dell'arte si è incentrata sulla disamina tassonomica dei componenti, elementi e materiali che costituiscono i sistemi di facciata continua a montanti e traversi e della vulnerabilità sismica ad essi annessa. In questo senso, la valutazione della fattibilità tecnica - prestazionale del componente di connessione flessibile proposto è stata "*validata*" in funzione dei requisiti richiesti per i sistemi di tipo Stick System.

Verificare la *replicabilità* del componente di connessione in altri sistemi di facciata costituisce una delle problematiche aperte che identificano una tra le traiettorie di ricerca future che possono essere sviluppate nella fase *ex post* della sperimentazione – affrontate in modo puntuale nel paragrafo successivo.

Un altro limite – che può essere riscontrato nello *status quo* della ricerca – è relativo agli aspetti prestazionali indagati nel corso della tesi. Per fare questo passaggio risulta necessario fare un passo indietro, riportando la trattazione alla definizione ormai consolidata di involucro edilizio contemporaneo.

Come emerso nel primo capitolo di inquadramento generale al tema di ricerca, l'involucro è definito quale elemento di *frontiera* che da un lato separa fisicamente l'ambiente interno da quello esterno, dall'altro, ne è chiamato a dialogare. Tale definizione identifica uno tra gli aspetti capisaldi degli attuali filoni di ricerca inerenti la funzionalizzazione evoluta dell'involucro edilizio.

La molteplicità dei requisiti funzionali-tecnici e tecnologici indagati e indagabili per la risposta prestazionale di tali sistemi si contrappone alla singola tematica di ricerca affrontata sinora. Come ormai acclarato, infatti, l'attività sperimentale della presente ricerca è finalizzata al miglioramento del comportamento sismico del sistema di facciata a marchio *Ponzio s.r.l.*

Per cui, il sistema oggetto di verifica – implementato nei componenti ed elementi che lo costituiscono – dovrebbe essere in grado di reagire in modo *adattivo* alle azioni che derivano dalle sollecitazioni sismiche, ma di fatto non viene valutato il suo comportamento sottoposto alle sollecitazioni che possono derivare da altre azioni fenomenologiche esterne.

A rafforzare tale concetto, l'attuale scenario congiunturale dimostra come gli effetti dovuti dal cambiamento climatico definiscono e delineano un altro importante filone di ricerca che investe le performance dell'involucro edilizio. Infatti, molti studi e ricerche – come emerso nella prima parte della tesi dottorale – sono rivolte alla risposta *adattiva* dei sistemi di facciata per gli aspetti prestazionali ambientali ed energetici.

Derivante dal background scientifico, gli effetti causati dall'aumento di temperatura modificano e sollecitano in modo differente le superfici del sistema involucro, soprattutto in riferimento all'orientamento ed esposizione dell'edificio in cui verrà installato il sistema di facciata. A fronte di ciò, infatti, si evidenzia come a seconda del prospetto a cui è esposta la facciata, tale sistema può subire alcuni fenomeni di ombreggiamento contrapposti all'eccessiva esposizione. In modo più specifico, si possono riscontrare nello stesso edificio, prospetti che saranno esposti alla luce solare e sollecitati ad un forte irraggiamento e prospetti completamente in ombra. Ciò comporta un'importante differenza di temperatura a cui l'involucro deve rispondere. In ambito di testing, queste sollecitazioni vengono simulate attraverso una strumentazione precisa quale la camera termica. Generalmente, tale strumentazione permette di verificare il comportamento del sistema facciata simulando gli shock termici, attraverso il raggiungimento di temperature comprese tra i -15 e i +85°C e capace di simulare l'irraggiamento solare. La camera termica, però, non è in grado di determinare il comportamento del sistema sottoposto a differenti temperature contemporaneamente. Per questo motivo, alcuni filoni di ricerca hanno dimostrato come i test sismici statici sono in grado di determinare il comportamento reale dell'intero sistema sollecitato a differenti gradienti di temperatura ed esposizione mediante gli spostamenti imposti, simulando la dilatazione dei profili in alluminio stressati dall'aumento di temperatura. Le ragioni di questa scelta risiedono nella caratterizzazione materica dell'alluminio che costituisce il sistema facciata. Il test sismico può, quindi, determinare in un unico Mock-Up il comportamento della dilatazione confrontato con quello del restringimento del profilo. Ciò richiede che il sistema facciata continua sia progettato in modo tale da assumere un comportamento *adattivo* in grado di rispondere contestualmente alle diverse sollecitazioni a cui è sottoposto.

In questo senso, le recenti innovazioni materiche – discusse nel corso della tesi dottorale – mettono in evidenza come le leghe a memoria di forma costituiscono una valida strategia di risposta a tali fenomeni e siano in grado di rispondere a tali sollecitazioni. Si ricorda infatti, che il comportamento di questa classe di materiale riguarda non solo la risposta ad una fase di *carico-scarico* ma anche ad un differenziale di temperatura.

Alla luce di tali considerazioni, la proposta del componente flessibile può dunque essere in grado di rispondere, da un lato, alle sollecitazioni imposte dalle possibili azioni sismiche, dall'altro il comportamento del materiale a memoria di forma può rendere il componente come *adattivo* anche per le sollecitazioni che derivano dagli effetti del cambiamento climatico. Nell'indagine prestazionale del componente di connessione innovato, tale problematica aperta può essere affrontata in modo contestuale alla valutazione della vulnerabilità sismica. In conclusione, le valutazioni che seguiranno la fase *ex-post* della sperimentazione sono finalizzate ad indirizzare la ricerca verso la *prototipazione* del componente non-strutturale dell'involucro edilizio, avviando – come indicato all'interno degli indicatori del TRL – la *fase di industrializzazione del sistema di connessione flessibile*.

Possibili scenari di sviluppi futuri

La tesi dottorale si è sviluppata, nel tentativo di ampliare le conoscenze nei processi di progettazione degli involucri edilizi e nei componenti che li costituiscono al fine di migliorarne le prestazioni, grazie al continuo scambio di *input* e *output* con le aziende partner e il laboratorio specializzato, che hanno contribuito positivamente allo sviluppo della tesi, in linea con quanto espresso dalla Mission 4 del PNRR "Sostegno di processi di innovazione e trasferimento tecnologico".

Nello specifico, la ricerca si è incentrata sulla valutazione del comportamento dinamico di un sistema di facciata continua a montanti e traversi sottoposto agli stress sismici. Dai risultati raggiunti è emersa la proposta di un *componente di connessione flessibile* il cui fine ultimo è quello di far fungere l'intero sistema di facciata come un dispositivo di smorzamento e identificandosi come una *strategia di mitigazione sismica*. Tale proposta è stata definita negli elementi e materiali che la costituiscono e validata attraverso un processo di valutazione inerente il requisito di fattibilità tecnica ed economica, aprendo la strada alla *fase prototipale* del componente innovato, corrispondente al livello di maturità tecnologica TRL 4 "Validazione tecnologica in ambiente di laboratorio".

In questo senso, si auspica che la ricerca possa contribuire significativamente al dibattito scientifico per il miglioramento delle prestazioni sismiche, rafforzando la ricerca condotta tra università e impresa e favorendo i processi di trasferimento tecnologico.

La fase *prototipazionale* del componente adattivo subirà un processo di valutazione finalizzato all'industrializzazione ed immissione nel mercato produttivo del sistema innovato. Ciò delinea un'importante traiettoria di ricerca futura. Lo step di valutazione della prestazionale del componente subirà un processo di verifica puntuale e complessivo. In prima battuta, il comportamento del componente prodotto dovrà essere verificato – attraverso accurati test di laboratorio – attenzionando gli aspetti materici e di fatica. Successivamente, in modo analogo alle attività sviluppate nella fase sperimentale della ricerca per l'indagine sismica del caso studio, il componente di connessione flessibile – installato nel sistema di facciata a marchio "Ponzo" – sarà sottoposto ad un processo di validazione attraverso i metodi e gli strumenti di verifica, che riguardano:

- la *simulazione* tramite il software computazionale SimSolid per la verifica alle analisi agli elementi finiti, FEA;

- il *test di laboratorio*, grazie al contributo della sezione TCLab del BFL, attraverso procedure di prova normate in condizioni di servizio e di sicurezza.

Tali step mettono in evidenza come il rapporto tra ricerca sviluppata in ambito accademico e nel settore ricerca e sviluppo delle imprese si delinea come una *conditio sine qua non* per le attività future. In cui, nello step di simulazione, il software subirà un ulteriore processo di validazione per la valutazione del comportamento reale del sistema facciata che risulti coerente con le attività di testing.

Le prestazioni del componente di connessione e la variabilità delle performance a cui l'involucro è chiamato oggi a rispondere aprono la strada a diversi scenari. In questo contesto, nelle fasi *ex post* della sperimentazione potrà essere verificato il comportamento del componente anche per la risposta *adattiva* dell'intero sistema facciata sollecitato alle molteplici azioni fenomenologiche esterne, valutandone i requisiti ambientali ed energetici che costi-

tuiscono importanti filoni di ricerca scientifica. In aggiunta a ciò, la validità del componente di connessione flessibile in altri sistemi di facciata continua può identificarsi come uno tra i possibili scenari di sviluppi futuri.

In conclusione, le innovazioni messe in campo nella ricerca dottorale mirano a contribuire al dibattito scientifico per l'implementazione delle prescrizioni normative che coinvolgono i processi di progettazione dell'involucro edilizio, agevolando il dialogo tra i diversi attori e ambiti coinvolti.

Alla luce di questi possibili scenari futuri, risultano di fondamentale importanza la condivisione trasversale e collettiva del sapere scientifico legato all'applicazione e disseminazione delle soluzioni tecnologiche adattive per il miglioramento del comportamento dell'involucro edilizio, nonché la necessità di strumenti specifici atti a supportare gli attori coinvolti nelle scelte tecnologiche, strategiche e progettuali, colmando nel lungo periodo il divario tra sviluppo tecnologico e applicazione nella pratica architettonica. In un'ottica che mira a promuovere lo sviluppo di un'architettura orientata verso il futuro, è necessario che l'enorme potenziale dell'involucro costruttivo sia concretizzato partendo da una prospettiva strutturale, funzionale e formale.

Credits Immagini

Capitolo 1 *Inquadramento del problema scientifico* _ Le prestazioni dell'Involucro Contemporaneo

Figura 1. Sony City Tokyo- Arup, Tokyo (2006). *Source:* <https://www.ntt-f.co.jp/ntt-fjd/feature/0025/>.

Figura 2. Apple Store- Foster + Partner, New York (2019). *Source:* <https://www.datamanager.it/2015/12/sara-lapple-store-milano/>.

Figura 3. Al Bahr Towers- Aedas Architects, Abu Dhabi (2012). *Ph.:* Arch. Alessandro Attinà.

Figura 4. Render of Snapping Façade by Dioinno Architecture PLLC. *Source:* <https://dioinno.com/Snapping-Facade>.

Figura 5. Prototype of the project "a Degree of Freedom", Jim Rhoné, Martin Genet (2014), National School of Architecture Paris-Malaquais (ENSAPM). *Source:* <https://materiability.com/portfolio/a-degree-of-freedom/>

Figura 6. Hallidie Building, Willis Polk. San Francisco (1918). *Source:* <https://www.ribaj.com/culture/hallidie-building-san-francisco-willis-polk-parting-shot>.

Figura 7. Technologies Readiness Level TRL. *Source:* <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5cce7b21b&appId=PPGMS>.

Capitolo 2 *Lo stato dell'arte*_ La progettazione antisismica degli Involucri Contemporanei

Figura 1. Lavori di demolizione a seguito di eventi estremi. *Source:* <https://amconstruction.pl/en/offer/demolition>.

Figura 2. Façade Performance Level - Operativo e Occupazione immediata. *Source:* Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2000). "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building". FEMA 356. Building Seismic Safety Council for the FEMA, Washington, D.C.

Figura 3. Façade performance Level - Sicurezza della vita e Riduzione dei pericoli. *Source:* Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2000). "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building". FEMA 356. Building Seismic Safety Council for the FEMA, Washington, D.C.

Figura 4. Fallimento degli elementi vetrati (Terremoto Northridge 1994). *Source:* Aiello, C.,

Caterino, N., Maddaloni, G., Bonati, A., Franco, A., & Occhiuzzi, A. (2018). Experimental and numerical investigation of cyclic response of a glass curtain wall for seismic performance assessment. *Construction and Building Materials*, 187, 596-609.

Figura 5. Fallimento degli elementi vetrati (Terremoto Christchurch 2011). *Source*: Baird, A., Palermo, A., & Pampanin, S. (2011). Facade damage assessment of multi-storey buildings in the 2011 Christchurch earthquake. *Bulletin of the New Zealand Society for earthquake engineering*, 44(4), 368-376.

Figura 6. Fallimento degli elementi di connessione (Terremoto Christchurch 2011). *Source*: Baird, A., Palermo, A., & Pampanin, S. (2011). Facade damage assessment of multi-storey buildings in the 2011 Christchurch earthquake. *Bulletin of the New Zealand Society for earthquake engineering*, 44(4), 368-376.

Figura 7. Livelli di Performance fissati dalla norma FEMA 356. *Source*: Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2000). "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building". FEMA 356. Building Seismic Safety Council for the FEMA, Washington, D.C.

Figura 8. Technologies Readiness Level TRL. *Source*: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5cce7b21b&appId=PPGMS>.

Capitolo 3 *Estrapolazione degli elementi utili alla Ricerca_* I dispositivi di risposta dinamica con capacità di smorzamento

Figura 1. Beijing New Poly Plaza, Skidmore, Owings & Merrill LLP (SOM), Beijing City (2007). *Source*: <http://www.yuandacn.com/index.php/en/projects-cn-2/101-domestic/beijing/220-beijing-new-poly-plaza-2.html>.

Figura 2. Possibili strategie di mitigazione sismica. *Source*: <https://www.moriliving.com/en/estate/services/aseismic>

Figura 3. Livello di comfort degli occupanti senza smorzatori. *Source*: Lago, A., Trabucco, D., & Wood, A. (2018). *Damping technologies for tall buildings: Theory, design guidance and case studies*. Butterworth-Heinemann. ISBN: 978-0-12-815963-7.

Figura 4. Modi di vibrazione di un tipico telaio di un edificio e la sua relazione con le facciate continue. *Source*: Arnold, C., (2016). *Seismic Safety of the Building Envelope*. Whole Building Design Guide.

Figura 5. Categorie e tipologie dei sistemi di smorzamento per edifici alti. *Source*: Lago, A., Trabucco, D., & Wood, A. (2018). *Damping technologies for tall buildings: Theory, design guidance and case studies*. Butterworth-Heinemann. ISBN: 978-0-12-815963-7.

Figura 6. Tuned Mass Damper of Taipei 101 – Taipei City, Taiwan - Atlas Obscura. *Source*: https://buildingcue.it/grattacieli-una-soluzione-a-venti-e-terremoti/711/taipei_101_tuned_mass_damper_20101/.

Figura 7. Sistema di funzionamento delle strutture con dispositivi di smorzamento attivi. *Source*: Lago, A., Trabucco, D., & Wood, A. (2018). *Damping technologies for tall buildings*:

Theory, design guidance and case studies. Butterworth-Heinemann. ISBN: 978-0-12-815963-7.

Figura 8. Integrazione dei dispositivi dell'energia nei sistemi di facciata a doppia pelle. *Source*: Moon, K. S. (2009). Tall building motion control using double skin façades. *Journal of architectural engineering*, 15(3), 84-90.

Figura 9. Interazione tra i dispositivi di smorzamento attivi e sistema di facciata a doppia pelle. *Source*: Fu, T. S., & Zhang, R. (2016). Integrating double-skin façades and mass dampers for structural safety and energy efficiency. *Journal of Architectural Engineering*, 22(4), 04016014.

Figura 10. Sony City Tokyo- Arup, Tokyo (2006). *Source*: <https://www.arup.com/projects/sony-city-tokyo>.

Figura 11. Mode Gakuen Cocoon Tower. Tange Associates, Tokyo (2008). *Source*: <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/torre-mode-gakuen-cocoon/>.

Figura 12. Technologies Readiness Level TRL. *Source*: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5cce7b21b&appld=PPGMS>.

Capitolo 4 *Il tema specifico*_ I sistemi di connessione "flessibile" la valutazione delle variabili in ambiente simulato

Figura 1. Shanghai Tower - Gensler, Shanghai (2015). *Source*: <https://modulo.net/it/realizzazioni/shanghai-tower>.

Figura 2. Movimento del pannello di vetro all'interno del telaio di una finestra vetrata. *Source*: Sucuoglu, H., & Vallabhan, C. G. (1997). Behaviour of window glass panels during earthquakes. *Engineering structures*, 19(8), 685-694.

Figura 3. Tipologie di rottura dei vetri a seconda delle tecniche di lavorazione. *Source*: <https://cciwindows.com/safety-glass/>

Figura 4. Provino sottoposto a prova di Crescendo con l'impianto di prova Dynamic Racking. *Source*: Memari, A. M., Kremer, P. A., & Behr, R. A. (2006). Architectural glass panels with rounded corners to mitigate earthquake damage. *Earthquake Spectra*, 22(1), 129-150.

Figura 5. Sistema di connessione scorrevole prodotto da Halfen. *Source*: https://www.halfen.com/it_CH/gamma-di-prodotti/calcestruzzo/sistemi-di-fissaggio/sistema-curtain-wall.

Figura 6. Connessione bullonata a fessura introdotta da FitzGerald et al. (1989). *Source*: Fitzgerald, T. F., Anagnos, T., Goodson, M., & Zsutty, T. (1989). Slotted bolted connections in aseismic design for concentrically braced connections. *Earthquake spectra*, 5(2), 383-391.

Figura 7. Componenti costitutive della connessione con smorzamento per attrito proposto da Khoraskani (2015). *Source*: Khoraskani, R. A. (2015). *Advanced connection systems for architectural glazing*. Springer International Publishing.

Figura 8. Schema di ancoraggio del sistema di connessione con smorzamento per attrito

proposto da Khoraskani (2015). *Source*: Khoraskani, R. A. (2015). *Advanced connection systems for architectural glazing*. Springer International Publishing.

Figura 9. Overview of the Materials Project thrust. *Source*: Jain, A., Ong, S. P., Hautier, G., Chen, W., Richards, W. D., Dacek, S., ... & Persson, K. A. (2013). Commentary: The Materials Project: A materials genome approach to accelerating materials innovation. *APL materials*, 1(1), 011002.

Figura 10. Contaminazione dell'innovazione materica in architettura. *Source*: <http://www.ongreening.com/en/Resources/smart-materials-explained-74>

Figura 11. Prototipo "Shaoe Shift". *Source*: Addington, D. M., & Schodek, D. L. (2012). *Smart materials and new technologies: for the architecture and design professions*. Routledge.

Figura 12. Immagine di copertina sito Ask Nature. *Source*: <https://asknature.org/>

Figura 13. Mapping ICS Materials: Interactive, Connected, and Smart Materials. *Source*: Rognoli, V., & Ferraro, V. (2022). *ICS Materials: Interactive, connected, and smart materials* (p. 224). FrancoAngeli.

Figura 14. Shape Memory Alloy Effect. *Source*: Concilio, A., Antonucci, V., Auricchio, F., Lecce, L., & Sacco, E. (2021). *Shape Memory Alloy Effect Engineering. For Aerospace, Structural, and Biomedical Application*. Second Edition. Butterworth-Heinemann. ISBN: 978-0-12-819264-1.

Figura 15. Superelastic Effect. *Source*: Concilio, A., Antonucci, V., Auricchio, F., Lecce, L., & Sacco, E. (2021). *Shape Memory Alloy Effect Engineering. For Aerospace, Structural, and Biomedical Application*. Second Edition. Butterworth-Heinemann. ISBN: 978-0-12-819264-1.

Figura 16. Prima di copertina Shape Memory Alloy Effect Engineering. For Aerospace, Structural, and Biomedical Application (Concilio et al., 2021). *Source*: Concilio, A., Antonucci, V., Auricchio, F., Lecce, L., & Sacco, E. (2021). *Shape Memory Alloy Effect Engineering. For Aerospace, Structural, and Biomedical Application*. Second Edition. Butterworth-Heinemann. ISBN: 978-0-12-819264-1.

Figura 17. Esempio di analisi FEA con software convenzionale. *Source*: <https://ki.dk/en/fea/>

Figura 18. Esempio di analisi FEA con software non-convenzionale. *Source*: <https://info.symetri.com/simsolidwebinars>

Figura 19. Database materiali del software non convenzionale. Proprietà meccaniche, termiche e di fatica richieste. *Source*: Immagine elaborata dall'autore dall'interfaccia del software SimSolid.

Figura 20. Proposta progettuale per il miglioramento delle connessioni telaio-facciata e struttura primaria di supporto. *Source*: Immagine elaborata dall'autore su base Catalogo Ponzio s.r.l. e Figura 8.

Figura 21. Technologies Readiness Level TRL. *Source*: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5cce7b21b&appId=PPGMS>.

Capitolo 5 Considerazioni critiche e problematiche aperte per la definizione dei protocolli sperimentali

Figura 1. Posa in opera sistema di facciata continua Ponzio s.r.l. *Source*: Foto dell'autore.

Capitolo 6 *La sperimentazione*_ La valutazione delle prestazioni sismiche attuali di una facciata continua a montanti e traversi presso Ponzio s.r.l. ed Altair Software and Services SL

Figura 1. Profili in alluminio estruso per il PMU. *Ph*: Ing. Vincenzo Di Diadoro.

Figura 2. WS50 PG Curtain Wall. Tipologia Stick System, Ponzio s.r.l. *Source*: Catalogo Ponzio s.r.l.

Figura 3. Tipologia di montaggio per il sistema Ponzio WS50 Curtain Wall: a) in luce, b) poggiata, c) appesa. *Source*: Catalogo Ponzio s.r.l.

Figura 4. Tipologia di cavallotti per il sistema Ponzio WS50 Curtain Wall: a) cavallotto a pulsante, b) cavallotto tondo. *Source*: Catalogo Ponzio s.r.l.

Figura 5. Profili traversi del Mock-Up con cavallotti tondi per la connessione montante-traverso. *Ph*: Ing. Vincenzo Di Diadoro.

Figura 6. Tipologia di guarnizioni per il sistema Ponzio WS50 Curtain Wall: a) guarnizione "a riposo", b) guarnizione "in condizione di servizio". *Source*: Immagine elaborata dall'autore su base Catalogo Ponzio s.r.l. e interfaccia del software SimSolid.

Figura 7. Modalità connessioni automatiche all'interno del Workbench toolbar. Interfaccia SimSolid. *Source*: Immagine elaborata dall'autore su base del software SimSolid.

Figura 8. Modalità connessioni manuali all'interno del Workbench toolbar. Interfaccia SimSolid. *Source*: Immagine elaborata dall'autore su base del software SimSolid.

Figura 9. Technologies Readiness Level TRL. *Source*: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5cce7b21b&appId=PPGMS>.

Figura 10. Mock-Up₁ Analisi modale_ SimSolid. Immagine elaborata dall'autore su base del software SimSolid.

Figura 11. Camera di prova Test Lab presso la sezione TCLab del Building Future Lab (Reggio Calabria). *Ph*: Arch. Alessandro Attinà.

Figura 12. Impianto griglia sprinkler progettato secondo normative UNI - AAMA presso la sezione TCLab del Building Future Lab (Reggio Calabria). *Ph*: Prof. Martino Milardi.

Figura 13. Schema dell'impianto di prova con alloggiamento del provino. *Source*: Memari, A. M., Behr, R. A., & Kremer, P. A. (2003). Seismic behavior of curtain walls containing insulating glass units. *Journal of architectural engineering*, 9(2), 70-85.

Figura 14. Inter-Story Drift, normativa AAMA 501.6. *Source*: Lee, H., Oh, M., Seo, J., &

Kim, W. (2021). Seismic and energy performance evaluation of large-scale curtain walls subjected to displacement control fasteners. *Applied Sciences*, 11(15), 6725.

Figura 15. Telaio apribili del Mock-Up. *Ph*: Ing. Vincenzo Di Diadoro.

Annex *La sperimentazione_* Le valutazioni finalizzate al Design dell'elemento di connessione flessibile di una facciata Stick System

Figura 1. Posizionamento virtuale dei Digital Mock-Up all'interno della Sezione TCLab. *Source*: Immagine elaborata dall'autore su base del modello digitale sviluppato con il software SimSolid e la Figura 11 del Capitolo 6.

Figura 2. Componenti costitutive della connessione con smorzamento per attrico proposto da Khoraskani (2015). *Source*: Khoraskani, R. A. (2015). *Advanced connection systems for architectural glazing*. Springer International Publishing.

Figura 3. Configurazione tecnologica finale del componente di connessione flessibile. *Source*: Immagine elaborata dall'autore su base Catalogo Ponzio s.r.l. e Figura 8 del Capitolo 4.

Figura 4. Posizionamento e configurazione del sistema di scorrimento fra le superfici di contatto della connessione flessibile. *Source*: Immagine elaborata dall'autore.

La borsa di dottorato è stata cofinanziata con risorse del
Programma Operativo Nazionale Ricerca e Innovazione 2014-2020 (CCI 2014IT16M2OP005),
Fondo Sociale Europeo, Azione I.1 “Dottorati Innovativi con caratterizzazione Industriale”



UNIONE EUROPEA
Fondo Sociale Europeo



*Ministero dell'Istruzione,
dell'Università e della Ricerca*

