



# **Metodologie di sperimentazione e verifica da testing strumentali per la progettazione di involucri adattivi ad alta efficienza**

**La Fluidodinamica Computazionale - CFD come metodo predittivo per il Testing Avanzato**

Dottorando: Arch. Giovanni Malara

Tutors: Prof. Arch. Massimo Lauria,

Prof. Arch. Martino Milardi

Co-tutor: Ing. Pietro Cacciatori

Dottorato di Ricerca in Architettura e Territorio  
XXXIII ciclo - a.a. 2017/2018 -2019/2020





Scuola di Dottorato  
Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria  
Dipartimento di Architettura e Territorio (dArTe)

Dottorato di Ricerca in Architettura e Territorio  
Dottorato a caratterizzazione industriale  
s.s.d. ICAR /12  
a.a. 2017/2018-2019/2020

# METODOLOGIE DI SPERIMENTAZIONE E VERIFICA DA TESTING STRUMENTALI PER LA PROGETTAZIONE DI INVOLUCRI ADATTIVI AD ALTA EFFICIENZA

Dottorando: Arch. Giovanni Malara

Coordinatore: Prof. Adolfo Santini



SANTINI ADOLFO  
PROF.  
26.07.2021 08:24:24  
GMT+00:00

Tutors: Prof. Massimo Lauria e Prof. Martino Milardi



LAURIA  
MASSIMO  
PROF.  
27.07.2021  
07:02:55  
GMT+01:00

Co-Tutor: Ing. Pietro Cacciatori



MILARDI  
MARTINO  
Professore  
26.07.2021  
11:29:47 UTC

Anno 2020

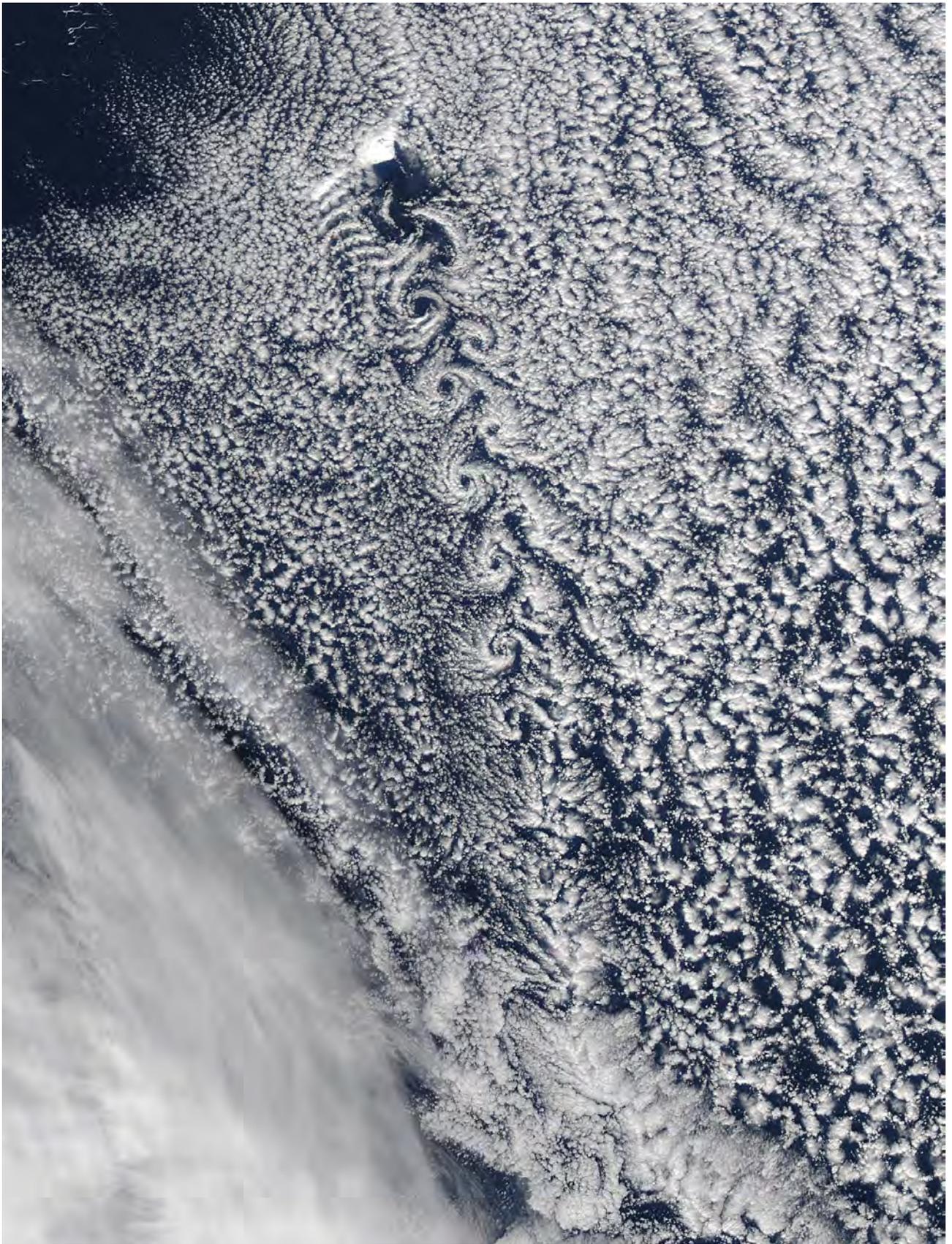
Composizione del Collegio dei Docenti  
Dottorato di Ricerca in Architettura e Territorio

Prof. Ottavio Amaro  
Prof.ssa Marinella Arena  
Prof.ssa Raffaella Campanella  
Prof. Francesco Cardullo  
Prof. Alberto De Capua  
Prof. Francesca Fatta  
Prof. Gaetano Ginex  
Prof. Massimo Lauria  
Prof.ssa Maria Teresa Lucarelli  
Prof. Martino Milardi  
Prof.ssa Francesca Moraci  
Prof.ssa Consuelo Nava  
Prof.ssa Paola Raffa  
Prof. Ettore Rocca  
Prof.ssa Alba Sofi  
Prof. Adolfo Santini  
Prof.ssa Antonella Sarlo  
Prof. Marcello Sestito  
Prof.ssa Rita Simone  
Prof.ssa Marina Tornatora  
Prof. Corrado Trombetta

*Immagine a fronte:*

*Fotografia scattata dal satellite Aqua della NASA il 4 aprile 2012.*

*Propagazione di vortici a spirale formati dall'impatto dei venti con il vulcano Beerenberg, nelle isole Jan Mayen, Norvegia, Oceano Atlantico settentrionale.*





# INDICE

1 - INTRODUZIONE	11
1.1 - OBIETTIVI DI RICERCA	13
1.2 - STRUTTURA METODOLOGICA DELLA RICERCA	16
2 - DEFINIZIONE DEL PROBLEMA	17
Duplica transizione: verde e digitale	17
3 - STATO DELL'ARTE	19
3.1 - Il ruolo delle facciate oggi	19
3.2 - Il Curtain wall	26
3.3 - Tipologie di sistema in Curtain wall	31
3.4 - La dimensione del mercato degli involucri edilizi in alluminio	39
3.5 - Repertorio di involucri innovativi	43
4 - IL PROCESSO PROGETTUALE DEL SISTEMA DI FACCIATA	85
4.1 - Il Prototipo Digitale di un involucro edilizio	85
4.2 - Le fasi di prototipazione di un mock-up digitale	90
5 - LA FLUIDODINAMICA COMPUTAZIONALE - CFD	97
5.1 - Applicazione della fluidodinamica alla progettazione architettonica	97
5.2 - I software per la simulazione CFD	110
6 - IN CAMPO AZIENDALE	119
6.1 - L'esperienza in AluK	119
6.2 - Le altre realtà aziendali	128
7 - IL TESTING AVANZATO	131
7.1- Il Building Future Lab	135
7.2 - Altre strutture di prova nel contesto europeo	138

7.3 - Il quadro normativo per le certificazioni	140
8 - TESTING SUL PERFORMANCE MOCK-UP	145
8.1 - Esperienza di testing avanzato presso il BFL di Reggio Calabria	145
9 - TESTING SUL DIGITAL MOCK-UP	157
9.1 - Modellazione BIM della facciata AluK SL50	159
9.2 - Modellazione ed elaborazione CFD	163
9.3 - Risultati CFD	170
CONCLUSIONI	179
BIBLIOGRAFIA	183
RINGRAZIAMENTI	189

DELAGE, 1921

*"Se il problema dell'abitazione, dell'appartamento, venisse studiato come si studia un telaio d'automobile, si vedrebbero rapidamente trasformate e migliorate le nostre case. Se le case fossero costruite industrialmente, in serie, come da telai d'automobile, si vedrebbero sorgere rapidamente forme inattese, ma sane, definibili e l'estetica verrebbe formulata con precisione sorprendente."*

Le Corbusier (1887-1965). Vers une architecture. 1925.



# 1 - INTRODUZIONE

Il presente studio intende considerare l'evoluzione dei processi di progettazione dei sistemi di facciata continua presenti sul mercato, con l'obiettivo di ridefinire una guida al controllo degli aspetti di valutazione progettuale e della successiva prototipazione ai fini della messa in produzione.

Il lavoro è il frutto di un'attività di ricerca condotta dal Dipartimento dArTe dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria, all'interno del Building Future Lab, nelle sezioni TestLAB, TestCELL, e in partenariato con il gruppo AluK spa, azienda internazionale leader nella progettazione e realizzazione di sistemi di facciate in alluminio, serramenti, accessori di completamento funzionale. Il coordinamento sperimentale tra la realtà accademica e quella aziendale ha condiviso un'indagine approfondita sulle opportunità di settore e sui futuri metodi che progettazione-produzione devono obbligatoriamente considerare per rendere competitivo e visionario il proprio orizzonte.

Le finalità individuate dalla ricerca sono principalmente quelle di rintracciare gli impulsi derivanti dalle più recenti metodologie di controllo analitico sul progetto dei sistemi di facciata, definirne i risultati e confrontarli con gli esiti prodotti dal testing avanzato effettuato in laboratorio sul modello reale.

La presente tesi è organizzata in 9 capitoli.

Il primo capitolo intende inquadrare gli obiettivi della ricerca, le fasi e le modalità metodologiche secondo cui è stata condotta.

Il secondo capitolo individua gli attuali motivi di disconnessione tra progettazione e produzione e le problematiche che oggi interessano la filiera dell'edilizia, in particolar modo quelle legate alle politiche ambientali.

Il terzo capitolo presenta una breve evoluzione del significato che ha assunto l'involucro contemporaneo e i caratteri sistemici e prestazionali che stanno alla base delle facciate continue. Questo capitolo riporta inoltre un approfondimento dello specifico segmento che quest'ultima tipologia di facciata occupa sul mercato. A conclusione del capitolo viene riportato una raccolta di involucri selezionati e catalogati per distinte caratteristiche di innovazione.

Il quarto capitolo indaga lo sviluppo di un prototipo digitale di un involucro

edilizio e le similitudini con altri settori che hanno avvertito con largo anticipo la necessità di testare gli effetti desiderati su un "analogo digitale" mediante innovative tecniche computazionali.

Il quinto capitolo richiama i principi che stanno alla base degli studi afferenti alla fluidodinamica e gli attuali sviluppi attraverso i quali questa materia oggi viene applicata nel campo della progettazione architettonica.

Nel sesto capitolo si introducono sinteticamente i processi di produzione Aluk, azienda partner della ricerca, indicando gli step di produzione osservati durante il periodo di frequenza speso presso le sedi.

Il settimo capitolo descrive l'iter di testing degli involucri edilizi e i luoghi deputati per rilasciarne la certificazione alla luce del corposo quadro normativo.

Nell'ottavo capitolo sono raccontati i test prestazionali eseguiti presso il Building Future Lab di Reggio Calabria su un mock-up della facciata continua in alluminio della serie SL50 Aluk.

In ultimo, il nono capitolo restituisce la procedura di calcolo CFD di un involucro edilizio, dalla modellazione parametrica della facciata alla definizione delle condizioni al contorno. I risultati e le immagini conseguiti dalla prova CFD sono contenuti all'interno del presente capitolo.

## 1.1 - OBIETTIVI DI RICERCA

In linea con i dettati della Strategia Nazionale di Specializzazione Intelligente (SNSI), la presente ricerca si colloca dentro l'Area Tematica "Agenda Digitale, Smart Communities, Sistemi di mobilità intelligente" e in particolar modo con la Traiettorie di Sviluppo "Tecnologie per smart building, efficientamento energetico, sostenibilità ambientale".

Attraverso il progetto di ricerca condiviso tra il Building Future Lab, centro di sperimentazione di riferimento per il Testing Avanzato dei sistemi di facciata, e l'AluK spa, azienda internazionale produttrice di sistemi di involucro innovativi, integrati ed adattivi nei diversi assetti tipologici "montanti e traversi" e a "cellule", si è svolta un'intensa indagine sui trend di processi e tecnologie che controllano le relazioni tra edificio - nelle sue componenti - e il contesto.

Il sistema di involucro in modo particolare è stato oggetto negli ultimi anni di molteplici ricerche applicate che hanno contribuito alla sua evoluzione attraverso la sperimentazione di nuovi componenti e materiali caratterizzati da elevate prestazioni. La sempre maggiore attenzione al problema della riduzione dei consumi energetici e del benessere ambientale ha trasformato così la pelle dell'edificio in una membrana intelligente, dinamica, attiva ed adattiva.

L'innovazione tecnologica degli ultimi decenni in questo ambito si affaccia oggi in modo predominante nel mondo delle costruzioni e richiede un cambio di rotta incontrovertibile: una transizione green e digitale assicurata dalla verifica in tutte le fasi di realizzazione degli elementi costruttivi edilizi, dalla fase di progettazione attraverso la prototipazione ed i testing preliminari, passando per la customizzazione nella fase di produzione, dal testing avanzato e dalla certificazione finale dei prodotti. Per questo motivo la presente ricerca indaga il trasferimento tecnologico dal settore scientifico a quello industriale e viceversa, mediante la realizzazione di mock-up digitali intesi come previsori dei risultati progettuali.

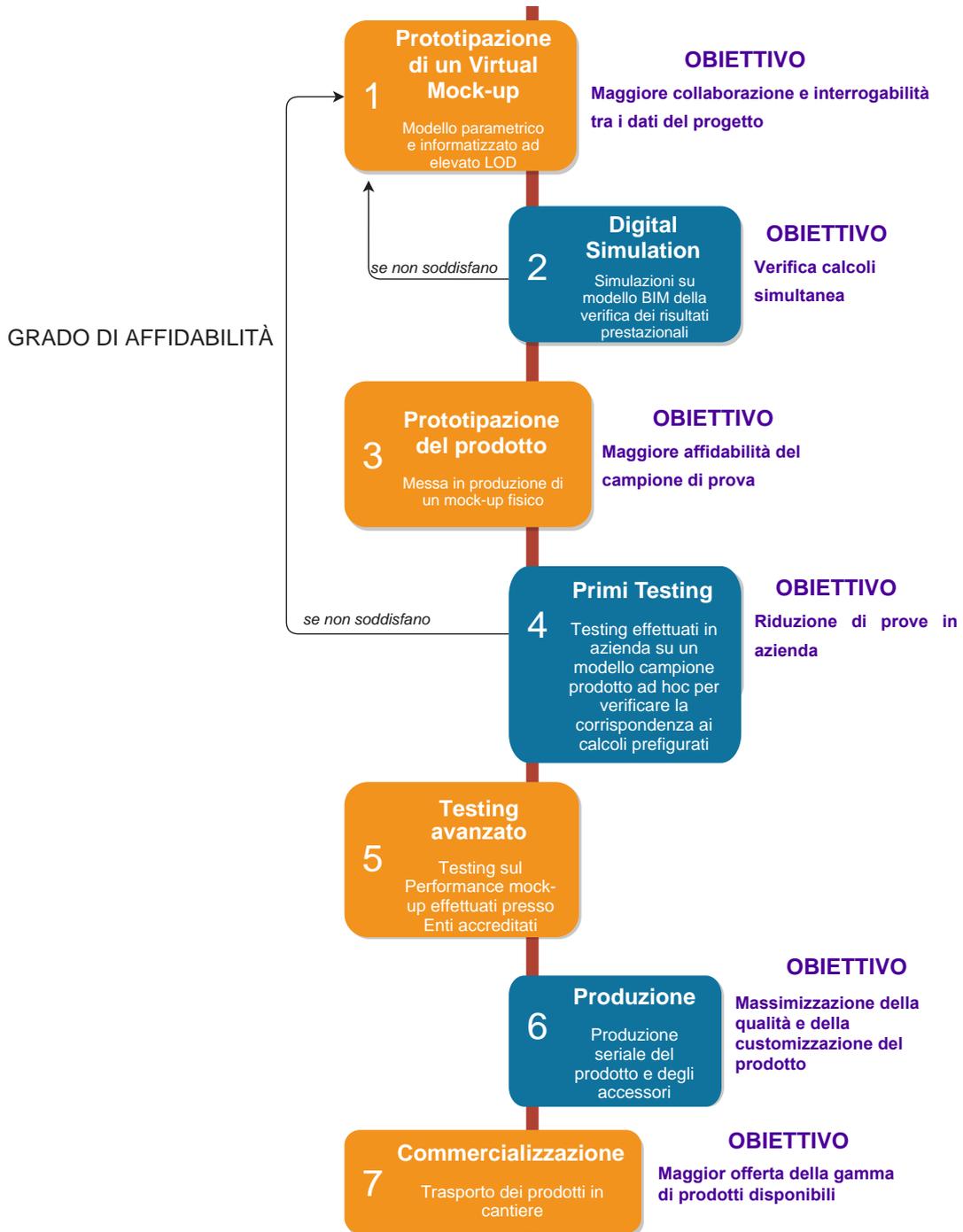
Le dinamiche che influenzano la resilienza urbana in tutte le fasi del ciclo di vita viaggiano oggi su un binario parallelo. Da un lato puntano ad efficientare

il costruito e a innovare le consuete tecniche legate all'edilizia, dall'altro ad azzerare l'input di materia immessa sul pianeta, ed in questo senso le metodologie di simulazione aiutano a individuare il *come sarà* e a produrre solo quanto necessario.

Pertanto la presente ricerca è finalizzata al conseguimento di molteplici obiettivi:

- Esplorare e innovare i processi di una linea produttiva seriale quale quella dell'azienda Aluk spa, leader nel settore dei sistemi di facciata continua in alluminio
- Tracciare un percorso sperimentale di confronto tra gli attuali metodi rispondenti al campo della Building Performance Simulation (BPS) e il Facade Testing in modalità Avanzata condotti all'interno del BFL - Building Future Lab dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria.
- Massimizzare l'affidabilità dei prodotti AluK incrementandone l'innovazione e la competitività.
- Fornire una guida in materia di studio dei flussi d'aria applicabile dalla scala urbana a quella dell'involucro edilizio.

## PROCESSO INNOVATO



*Obiettivi di innovazione del processo di fabbricazione di un involucro edilizio.*

## **1.2 - STRUTTURA METODOLOGICA DELLA RICERCA**

La linea di ricerca presentata è stata favorita da un progetto condiviso tra la realtà scientifica dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria per mezzo del suo Building Future Lab e quella industriale su richiamata dell'Aluk spa, la cui operatività in Italia si colloca tra la storica sede di San Giovanni Lupatoto (VR) e la sede di Aluk Design Milano destinata alle sperimentazioni del R&D - Research and Development. La vigile frequenza all'interno delle sedi ed il costante confronto con i team delle due realtà hanno agevolato l'iter di ricerca che sinteticamente può essere descritto in diverse fasi ed obiettivi:

WP1 - Competenze di base sulla Ricerca

WP2 - Competenze di Settore ed esperienza tecnologica sul Testing Avanzato

WP3 - Competenza sui modelli progettuali operativi basati sul Testing Avanzato

WP4 - Sviluppo di un Repertorio di Involucri Innovativi Adattivi

WP5 - Competenze sui modelli progettuali innovativi in campo Building Performance Simulation

WP6 - Definizione e sviluppo della tesi di dottorato.

## 2 - DEFINIZIONE DEL PROBLEMA

### **Duplicale transizione: verde e digitale**

L'urgenza globale di una società a zero emissioni impone una corsa verso la neutralità climatica entro il 2050, raggiungendo la soglia prefissata di riduzione delle emissioni di gas serra nel mondo del 80%-95%, coinvolgendo trasversalmente tutti i settori economici protagonisti di tale trasformazione. Se si considerano le responsabilità in ambito europeo, quella del settore dell'energia si attesta intorno al 75%, attirando la gran parte delle strategie verso una transizione verde da attuare in una politica di cooperazione internazionale già avviata con l'accordo di Parigi del 2015.

Il comparto edilizio risulta responsabile del 40% del consumo energetico europeo<sup>1</sup> e non è difficile attribuire gran parte del peso di questa percentuale ad errate o obsolete pratiche progettuali degli attori tecnici coinvolti, a varia scala e nelle diverse fasi, nel settore delle costruzioni.

Particolarmente plausibile nelle considerazioni delle carenze logiche di progettazione degli edifici è il richiamo ad una poco attenta valutazione nella scelta delle soluzioni riguardanti il sistema dell'involucro, conteso soprattutto tra espressione compositiva ed estetica ed elevate prestazioni richieste e, gioco forza, da personalizzare caso per caso.

Ai fini della rivoluzione energetica descritta, gli involucri detengono la triplice funzione di ridurre significativamente il consumo energetico degli edifici<sup>2</sup>, di migliorare il livello della qualità ambientale interna<sup>3</sup> e di avere un impatto positivo di corrispondenza tra l'energia rinnovabile immagazzinata in loco e l'energia utilizzata per il fabbisogno dell'edificio.<sup>4</sup>

Le attese degli involucri nella loro capacità di adattare le proprie proprietà fisiche o meccaniche alle condizioni al contorno dell'edificio, siano esse di

*1 Fonte report ENEA. Rapporto annuale efficienza energetica 2020.*

*2 Perino, M., 2008. Responsive Building Elements.*

*3 Luible, A. 2015. COST Action 1403. In Proceedings of Energy Forum 2015. Bern, Switzerland.*

*4 Reynders, G., T. Nuytten, and D. Saelens. 2013. "Potential of Structural Thermal Mass for Demand-Side Management in Dwellings."*

natura climatica o di benessere fisico degli occupanti, stanno incrementando notevolmente la spinta dei prodotti offerti dalle aziende del settore. Questa necessaria "customizzazione prestazionale" richiesta al manufacturing snatura ed in parte confligge con la vocazione seriale, standardizzata e sempre più automatizzata della produzione a "larga scala", non sempre pronta a dare risposte calibrate alle specificità dei luoghi oggetto dell'edificio.

A supporto della produzione manifatturiera legata all'edilizia, ancor prima della realizzazione dei sistemi costruttivi di cui essa si compone, la progettazione oggi dovrebbe agire da faro e provvedere a condurre tutto la filiera verso una transizione digitale fondata sull'implementazione dei sistemi delle più comuni tecnologie digitali quali il Robotics e i droni, l'AI Artificia Intelligence, l'IOT Internet of Things e il Connectivity, l'Augmented e la Virtual Reality, il Cloud Computing. Il contributo di queste tecnologie, seppur con le limitazioni più avanti individuate dalla presente ricerca, è emblematico della preparazione multidisciplinare che i professionisti oggi sono chiamati ad avere, tenendo conto del controllo delle performance progettuali tanto nella fase preliminare quanto in quella di monitoraggio nel tempo. Diventa così strumento imprescindibile la BPS - Building Performance Simulation, quale disciplina metodologica di predizione digitale dell'impatto ambientale sull'edificio e della effettiva corrispondenza tra valori prestazionali di progetto e prestazioni certificate dai laboratori, i quali rivestono il ruolo accreditato a rilasciare l'ultima parola in questo processo.

## 3 - STATO DELL'ARTE

### 3.1 - Il ruolo delle facciate oggi

#### *Parete, Involucro, Energy Skin*

Il ruolo dell'involucro edilizio dalla sua originaria concezione ha subito sostanziali trasformazioni corrispondenti ai mutevoli bisogni della società nel corso dei secoli.

*"Il rivestimento degli edifici con la sua funzione di protezione dalle intemperie e dalle aggressioni oltre che di riparo per scorte e provviste, rappresenta la prima e la più importante ragione del costruire."*<sup>1</sup>

Se fino a qualche decennio fa veniva richiesto agli involucri di assolvere alla necessità di sicurezza, privacy, estetica e miglioramento delle condizioni climatiche tra esterno ed interno dell'edificio, oggi viene aggiunta la pretesa di captare, immagazzinare e produrre energia.

La recente pandemia da Covid-19 e la necessità di rimanere nelle proprie abitazioni, da un lato hanno confermato il ruolo dell'involucro come barriera separatrice tra l'esterno e l'interno, nel rapporto di intimità e sicurezza tra gli uomini, dall'altro hanno definitivamente messo in risalto il bisogno di ridurre gli impatti energetici che le abitazioni oggi richiedono e che gradualmente le politiche comunitarie e nazionali stanno puntando ad azzerare.

Con questi precisi intenti, la comunità scientifica e il settore della produzione sono attivamente impegnati nella definizione di approcci standardizzati necessari per conseguire gli obiettivi di sostenibilità imposti per il settore dell'edilizia, volti a realizzare quella forma di Economia Circolare ormai improcrastinabile che punta a *"contrastare il depauperamento delle risorse naturali, re-immettere nel mercato le risorse in dismissione ed agevolare il recupero delle risorse di valore"*<sup>2</sup>.

In questa logica il cambiamento climatico è solo un nodo della rete dello sviluppo sostenibile. L'attuale modello dovrebbe rivedere le politiche

1 Thomas Herzog, Roland Krippner, Werner Lang, *Atlante delle facciate*, UTET, Torino, 2005

2 European Environment Agency, 2016.

ambientali indirizzate alla riduzione delle emissioni di gas serra. L'economia circolare è certamente la strategia più adatta a rimettere sul mercato materia tramite sistemi di riciclo e riuso, prolungando il ciclo di vita e riducendo rifiuti da smaltire. Tuttavia occorre che essa sia rivolta anche ad una riduzione delle quantità effettivamente prodotte, perché produrre significa mettere in circolo oggetti che generano emissioni tanto dirette (riscaldamento, elettricità, carburanti), quanto indirette, spesso poco considerate (trasporto degli oggetti prodotti, costi legati alla loro realizzazione). Il ricorso a soluzioni tecniche e ipertecnologiche sta provando a contenere le emissioni dirette ma servirebbe un cambio di paradigma, cioè diminuire drasticamente l'apporto di materia prodotta.<sup>3</sup>

Per ridurre perciò i nostri usi (spesso abusi) energetici le nuove misure politiche e progettuali si dirigono inevitabilmente verso i cosiddetti ZEBs - "Zero Energy Buildings", edifici ad alte prestazioni, capaci di autosostenersi riducendo quasi a zero il proprio fabbisogno per mezzo di fonti rinnovabili "on site" (integrati in copertura o nell'involucro) o "off site" (esterna all'edificio, vedi il caso di biomasse). Sulla scorta di questo acronimo si parla anche di NZEBs - "Net Zero Energy Buildings" considerando il rapporto tra l'energia primaria prelevata, non disponibile ad ogni ora della giornata, e quella autoprodotta. Con ZEEBs - "Net Zero Energy Emissions Buildings" invece si intendono edifici a zero emissioni di carbonio.

Ulteriore evoluzione sono gli Smart Buildings, che oltre a garantire la riduzione degli impatti ambientali, si configurano come edifici pensanti, accumulatori ed amplificatori di informazioni capaci di rilevare, elaborare ed interpretare, anche da remoto, dati in tempo reale riguardo il loro stato di utilizzo, di consumo, di allerta. L'avanzamento nel settore della sensoristica facilita questa abilità, si guardino ad esempio i sensori "always-on" connessi real time mediante tecnologie wireless o i più recenti sistemi di smart metering, contatori intelligenti di telelettura e telegestione di energia elettrica, gas e acqua. A tal proposito, gli Smart system più innovativi come BMS (Building Management System) consentono di gestire centralmente i dati derivanti dagli impianti, condizioni micromiclimatiche e sistemi di sicurezza, con un beneficio in termini di risparmio energetico annuo superiore al 15%. La capacità di questi sistemi apre anche alla possibilità di memorizzare situazioni ricorrenti registrando

<sup>3</sup> Butera, F. - *Affrontare la complessità. Per governare la transizione ecologica*. Edizioni Ambiente. 2021

dati meteo e presenza media all'interno dell'edificio, abitudini e esigenze, anticipando soluzioni o addirittura fornendo suggerimenti. Lo screening effettuato e il conseguente data mining mettono in condizione gli edifici di essere connessi ad una rete globale, dove gli edifici comunicano con gli altri edifici, con i sistemi di mobilità, con la città, con gli utenti, coerentemente con i temi di inclusività e governance partecipativa.

A fronte di questa situazione, assume un ruolo rilevante la prontezza da parte del progettista nell'utilizzo delle nuove tecnologie già disponibili ma non ancora messe a sistema: Building Information Modelling, Internet of Things, sensoristica integrata, Building Automation.

Smart Grids e infrastrutture ICT sono le chiavi per vincere la sfida dell'efficienza e della gestione degli edifici per tutto il loro ciclo di vita, orientate tanto sulle nuove costruzioni quanto e soprattutto sulla manutenzione del costruito, oggi tema prioritario da risolvere. Il sistema edificio oggi deve invertire il ruolo passato di consumatore divenendo primo produttore di energia. Tutto ciò mantenendo qualità architettonica e il legame con il contesto. Il progresso tecnologico in materia di architettura oggi aiuta molto in questa necessità: il mondo della ricerca e la produzione offrono materiali e sistemi innovativi compatibili con le elevate performance estetiche richieste. Quest'ultimo è spesso il compito assegnato all'involucro, oggetto della rivoluzione tecnologica che gli conferisce oggi il vantaggio di essere adattivo, in grado cioè di mutare le proprie caratteristiche in risposta agli stimoli esterni. Certamente è importante sottolineare che le mansioni attese dall'involucro edilizio contemporaneo debbono riguardare soluzioni tanto attive quanto passive, attuando un dialogo con gli impianti in un sistema integrato e controllato. Da qui urge affermare che non esiste un involucro ottimale ma è necessario progettare la pelle degli edifici "ad hoc", caso per caso e con particolare studio del contesto ambientale e socio-culturale del luogo.

A tal fine, dal punto di vista progettuale, devono essere valutati in primo luogo un corretto inserimento nel contesto, la forma e l'orientamento spaziale ottimali. In seconda istanza, per garantire la qualità energetica desiderata, va attentamente indagata la selezione dei materiali.

Una prima selezione, derivante dal settore della bioarchitettura, considera l'introduzione di materiali ecocompatibili di origine vegetale o animale (legno, bambù, sughero, cartone, fibra di cellulosa, canapa, lino, paglia, amido di mais, steli di grano, lana di pecora, alghe marine, funghi, piume di volatili da cortile), riciclati (prodotti in plastica, cartone, vetro metallo, pietra e laterizi riciclati) o

addirittura recuperati e riutilizzati a seguito di processi di demolizione selettiva (Design for resource conservation, for low impact materials, for cleaner production and for re-use and recycling). Una soluzione comune per gli involucri opachi dell'edificio risulta essere persino quella delle Green Surfaces (pareti vegetali), che, oltre ad assorbire buona parte di energia radiante, riescono a ridurre sensibilmente l'effetto Urban Heat Island Effect (UHI) - più noto come "effetto isola di calore", cioè il processo di innalzamento della temperatura all'interno dei centri urbani.

Una seconda scelta progettuale è l'utilizzo di Smart materials e materiali nanotecnologici con reazioni prestazionali variabili in funzione delle risposte in condizione di esercizio. È emblematico il caso dei NIMs - materiali isolanti nanotecnologici che con spessori ridottissimi assicurano risultati eccellenti. Prendendo a modello l'aerogel, questa sostanza solida composta dal 99% di aria, si produce sotto forma di rotoli o pannelli fibrorinforzati, e grazie alla sua estetica invisibile, consente l'isolamento di coperture, pareti o pavimenti. Stessi progressi sono stati raggiunti da vernici, intonaci e massetti con un elevato miglioramento delle caratteristiche termoisolanti e termoriflettenti. Ulteriori risultati in termini di isolamento da materiali nanotecnologici sono dati dai VIPs (Vacuum insulation panels), pannelli isolanti sottovuoto e dai TIMs (Transparent insulating materials), cioè pannelli autoportanti o inseriti nelle intercapedini costituite da policarbonati (PC), polimetacrilati (PMMA), policloruri di vinile (PVC) o da materiali a cambiamento di fase. Proprio i materiali a cambiamento di fase (PCM) nell'involucro edilizio giocano un ruolo essenziale per l'attenuamento e lo sfasamento temporale della temperatura esterna all'interno dell'edificio, come una valvola di termoregolazione corporea.

Per merito del progresso tecnologico, l'involucro del terzo millennio può essere considerato una membrana cellulare sensoriale capace di controllare i livelli di benessere degli ambienti e generare energia. Queste innovative Energy Skin<sup>4</sup> sono capaci di adattarsi in modo dinamico alle condizioni climatiche esterne (climate adaptive buiding shells) e rispetto ai sistemi tradizionali consentono:

- Prestazioni superiori con spessori ridottissimi;
- Possibilità di migliorare le prestazioni dei materiali già in opera attraverso l'applicazione sia sulle componenti opache che su quelle trasparenti di coating, film o rivestimenti;

4 Casini M. - *Smart Building. Involucro 2.0*, DEI, 2014

- Integrazione di fonti rinnovabili;
- Comportamento dinamico e selettivo;
- Capacità autopulenti e antinquinamento;
- Integrazione con gli impianti di climatizzazione e illuminazione;
- Controllo remoto tramite wi-fi.

Le chiusure trasparenti sono per ovvie ragioni le parti dell'involucro più esposte a possibili situazioni di discomfort ambientale, dal momento che devono rispondere alle esigenze di luce e ventilazione degli ambienti interni, ma sono anche oggetto di numerosi studi recenti della ricerca tecnologica in architettura. Ritenute assodate le considerazioni sul corretto inserimento e orientamento dell'edificio all'interno del contesto e i relativi studi sulla condizione climatica del luogo, i tradizionali sistemi di oscuramento delle radiazioni solari, siano essi statici o mobili, si stanno dimostrando insoddisfacenti sotto il profilo dell'efficienza energetica e del benessere all'interno degli edifici. La risposta a questa necessità risulta oggi affidata alle Smart Windows, vetrate dinamiche ad elevato isolamento termico spesso integrate a sistemi di controllo degli impianti di illuminazione e climatizzazione o a sistemi fotovoltaici per produrre contemporaneamente energia. Il campo di ricerca nel settore dell'involucro edilizio ha particolarmente riguardato l'innovazione nel campo dei vetri e dei sistemi schermanti.

Oltre ai vetri ad avanzato isolamento termico tramite vetrocamera con una o più intercapedini di gas o sottili film di materiali low-emissiv (metalli nobili quali rame, argento e oro, o semiconduttori quale l'ossido di stagno), sono stati portati avanti studi su vetri autoriscaldanti tramite un rivestimento di alluminio che sfruttano un rivestimento semiconduttivo in ossidi di alluminio a contatto con la corrente elettrica. Gli effetti dinamici dei vetri intelligenti possono essere apportati in maniera passiva e attiva. I sistemi dinamici passivi, quali i vetri fotocromici e quelli termocromici, non hanno necessità di stimoli elettrici ma si modificano rispetto alla quantità di luce e alla temperatura ai quali sono esposti. I sistemi dinamici attivi, invece, richiedono un collegamento con un sistema centrale di gestione, governabile da remoto anche tramite smartphone, nel quale vengono messe in relazione informazioni riguardanti le presenze all'interno dei diversi ambienti di uno stesso edificio o le previsioni meteorologiche, per un elevato risultato di riduzione degli sprechi energetici. Tra questi sistemi, molti ancora in fase di sperimentazione, si citano brevemente i dispositivi elettrocromici, la cui variazione radiazione termica è gestita

dall'utente, i dispositivi a cristalli liquidi PDLC, che tramite diversi film composti da microsfere di cristallo liquido permettono la regolazione dell'opacità del vetro ed infine, i dispositivi MEMS Micro Electrical Mechanical System, costituiti da elettrodi inorganici presolleccitati di dimensione di 100 micrometri, capaci di attivarsi ad un debole stimolo elettrico.

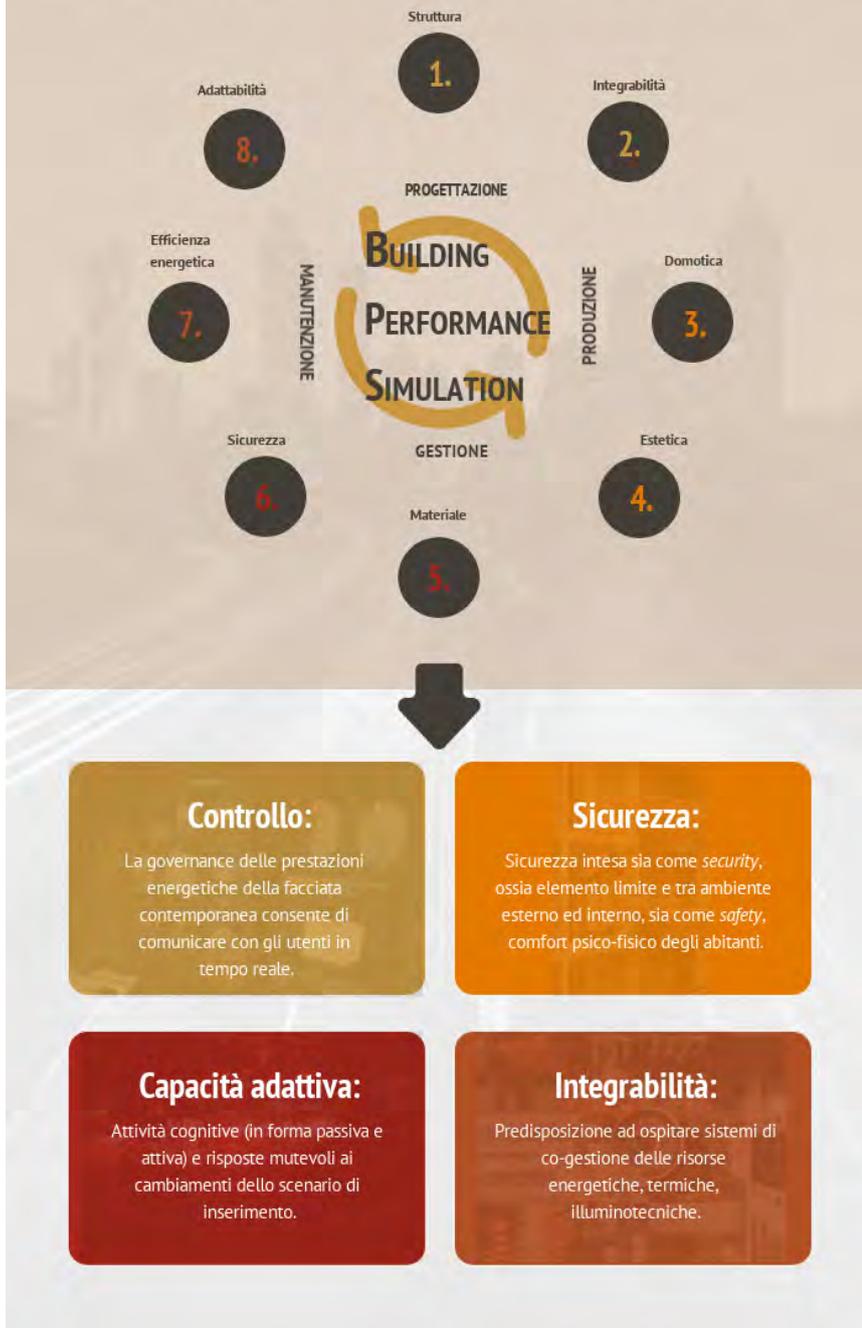
Con notevoli risultati estetici ispirati dalla natura, in numerosi progetti contemporanei si sono sviluppati sistemi modulari di brise-soleil dinamici, definiti Adaptive facades o Kinetic facades, collegati a software di building automation e domotica che ne permettono l'apertura e l'inclinazione in funzione delle condizioni climatiche esterne.

Sintetizzando, i caratteri attesi degli involucri edilizi possono essere così inquadrati:

- Sicurezza
- Integrabilità
- Flessibilità/Capacità adattiva
- Controllo

# Involucro edilizio

**BPS** Building Performance Simulation - Strategia di simulazione dei caratteri attesi



BPS e involucri edilizi. Categorie di inquadramento. Immagine dell'autore

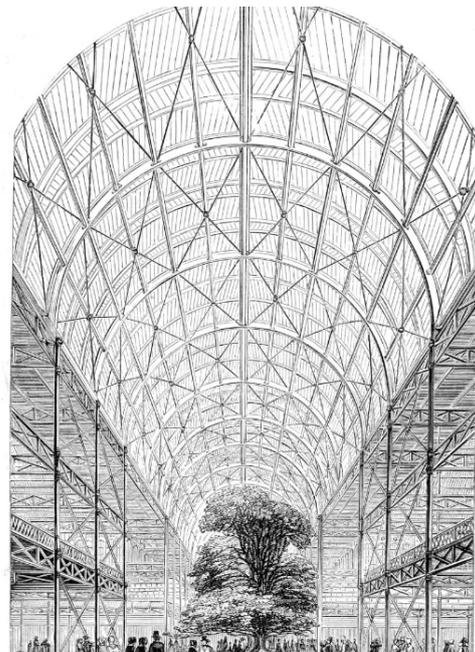
### 3.2 - Il curtain wall

#### *Da soluzione tecnica ad icona high tech*

La caratterizzazione della facciata è certamente un segno di distinzione tra gli edifici ed è stato argomento di ricerca ampiamente dibattuto in letteratura. L'annosa sfida nella progettazione di edifici sempre più sviluppati in altezza ha comportato la necessità di alleggerire i carichi e di rintracciare soluzioni che consentano maggiore facilità e tempi rapidi di esecuzione. A ciò ha contribuito la divergenza di funzione tra elementi strutturali ed involucro, sviluppatasi definitivamente dalla nascita del calcestruzzo nel XIX secolo e con cui si è aperta la strada del dissolvimento dello spessore classico della parete per far spazio alla trasparenza della modernità e all'immaterialità spesso tipica del postmoderno.

Il principio alla base del *curtain wall* è appunto quello di appendere la facciata all'edificio, come fosse una tenda (in inglese appunto *curtain*), dotandola di struttura autonoma che trasferisca i carichi, propri e dinamici, agli elementi strutturali dell'edificio.

L'origine dell'impiego delle facciate continue in acciaio e vetro viene attribuita alle sperimentazioni di Paxton del 1851 per il Crystal Palace, uno straordinario spazio espositivo facilmente considerabile il modello ispiratore per i contemporanei luoghi commerciali. Seppure in ghisa e mediante tecniche di produzione non ancora contrassegnate dalla logica della serialità, il visionario compito di dare continuità materica e funzionale mediante il transetto interamente vetrato è una chiara testimonianza della rivoluzione che da quegli anni interessa gli involucri edilizi.



*Crystal Palace. Joseph Paxton, Londra. 1852*

La scuola di Chicago ha contribuito negli Stati Uniti a favorire lo studio della minimizzazione dei pesi in facciata. Emblematico è il Tacoma Building, in cui è ancora presente una muratura portante, ma le facciate sono sostanzialmente "appese" alla struttura. L'esigenza nasce dallo sviluppo in altezza considerevole dell'edificio e dalla necessità di ridurre l'impiego di illuminazione a gas, ritenuta esplosiva e tossica, oltre che antieconomica.

Così ancora un ulteriore fattore dell'espansione delle facciate continue nei progetti di Chicago è stato il maggiore reperimento di vetro messo in commercio e dell'affinamento delle tecniche di produzione, che hanno reso il vetro più sicuro per l'impiego in edilizia.<sup>1</sup>

L'utilizzo delle grandi superfici vetrate nei progetti agli inizi '900 è una richiesta puramente funzionale all'obiettivo di far entrare quanta più luce possibile negli ambienti interni. I principali riscontri sono individuabili nei progetti di fabbriche o edifici commerciali, mentre nel caso del residenziale la grande trasparenza era ancora vista come privazione della privacy.<sup>2</sup>

A questo proposito è importante citare la Fabbrica di turbine AEG, progettata da Peter Behrens nel 1909, dove le alte pareti, dovute alla necessità di manovrare le grandi turbine per mezzo di un carroponete, sono state arretrate dalla struttura principale e completamente realizzate in vetro. Sebbene nel prospetto laterale risulti evidente il grande sforzo di realizzare una grande superficie interamente vetrata, questa però era ancora interrotta dai pilastri.



*AEG Turbinenfabrik. Peter Behrens, Berlino. 1909*

1 Leslie T. "Buildings without Walls: Curtain Wall Development in Chicago Architecture of the 1890s". *Second International Congress on Construction History*, 2006.

2 Yeomans D. "The pre-history of the curtain wall". *Construction History*, 1998

Ciò non avvenne nel caso del progetto di Walter Gropius e Adolf Meyer per le officine Fagus nel 1911. In questa circostanza, la facciata viene posta sul filo esterno della struttura e l'angolo una soluzione di facciata vetrata continua. Qui è evidente l'introduzione dello *spandrel*, un pannello cieco che generalmente assolve il compito di nascondere il solaio.



*Officine Fagus. Walter Gropius e Adolf Meyer, Alfeld an der Leine, Germania. 1911*



*Curtain wall della sede del Bauhaus a Dessau, 1925.*

Nel Bauhaus di Dessau del 1926 di Gropius i due solai d'interpiano vengono completamente arretrati rispetto alla facciata continua e vengono lasciati a vista dietro il vetro. Anche in questa occasione gli angoli vengono svincolati da qualsiasi elemento strutturale per formare un involucro interamente connotato dalla scansione data dai montanti e dai traversi.

La storia della facciata continua del decennio '50 è segnata dall'avvio della produzione di profili estrusi in alluminio, che garantiscono ulteriore leggerezza alla facciata e grazie alle forme date dagli stampi in alluminio, consentono di reggere pannelli vetrati di dimensioni maggiori.

In questi anni fioriscono progetti di edifici interamente vetrati, come il Seagram Building di Mies Van der Rohe e Philip Johnson del 1958, dove verticalità e funzionalità vengono esaltate per mezzo di montanti non strutturali di color bronzi evidenti in facciata.



*Seagram Building, Ludwig Mies van der Rohe. New York, 1958.*

Negli anni '60 e '70 i processi di industrializzazione hanno consentito un rapido sviluppo della produzioni in serie di profili customizzati in maggiore misura e iniziano a diffondersi i sistemi unitised, fabbricando in officina dei mock-up fisici su cui eseguire i test prestazionali prima della loro posa in cantiere.<sup>3</sup>

Parallelamente gli stessi anni sono lo sfondo per l'evoluzione dei sigillanti siliconici strutturali consentendo di incollare i pannelli vetrati direttamente su un elemento di sostegno senza piastre di pressione o tappi sul filo esterno della facciata. Questa continuità materica è evidente già da quello che viene riconosciuto come il primo esempio di curtain wall del tipo Structural Glazing, cioè il Cass Building al 455 West Fort Street di Detroit negli Stati Uniti. Il progetto

<sup>3</sup> Oh S.H. et al. *Curtain Wall Façades on the New Generation of Supertall Buildings Present and Future Directions. International Journal of High-Rise Buildings, 2020*

di Smith, Hinchman e Grylls del 1971 ha previsto di avvolgere l'edificio con un involucro totalmente vetrato, sostenuto da silicone strutturale e ritegni meccanici puntuali (ragnetti) di sicurezza.



*Cass Building, Smith, Hinchman e Grylls. 455 West Fort Street di Detroit, 1971.*

Durante i decenni successivi, fino ancora ai giorni d'oggi, le lastre di vetro hanno subito grandi trasformazioni con riguardo all'isolamento e al rivestimento tramite coatings basso-emissivi e selettivi, assottigliandone lo spessore della materia e incrementandone le prestazioni.

Gli anni '90 si sono contraddistinti per la consapevolezza della riduzione delle risorse energetiche naturali, ciò ha portato a sperimentare sistemi di circolazione dell'aria, naturale, ventilata, meccanica, all'interno di intercapedini nel caso di innovative facciate a doppia pelle, (*Double Skin Facade*) e a sistemi di raffrescamento interamente passivi. Inoltre, come detto, lo sviluppo di nuove tecnologie ha alimentato la nascita di nuovi materiali e sistemi di immagazzinamento dell'energia integrati all'involucro.

A questo si è aggiunto il valore comunicativo che i progettisti affidano alla facciata dei cosiddetti Media Building, facendone icone di sperimentazioni tecnologiche e vettori di informazioni.

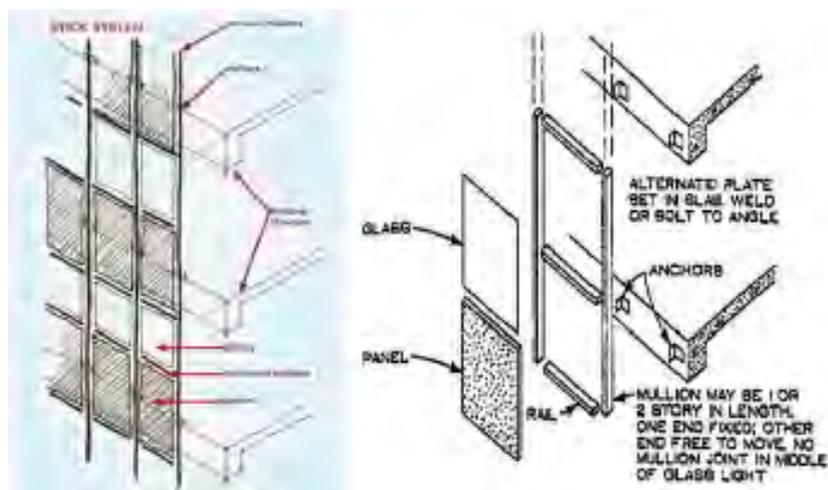
Nel capitolo successivo sono state selezionati alcuni riferimenti di involucri ad alte prestazioni energetiche, quasi tutti riferibili alla tipologia del curtain wall, di cui brevemente si intende illustrare le differenti tipologie che ne stanno alla base.

### 3.3 - Tipologie di sistema in curtain wall

Come evidenziato nei precedenti capitoli, l'approccio alla progettazione delle facciate continue è in continuo evolversi e si manifesta sotto molteplici e mutevoli aspetti. Tuttavia, oggi è possibile proporre una ricognizione dei principali sistemi di curtain wall ed è altrettanto opportuno richiamarli per comprendere meglio i casi studio considerati nello specifico capitolo di questo lavoro.

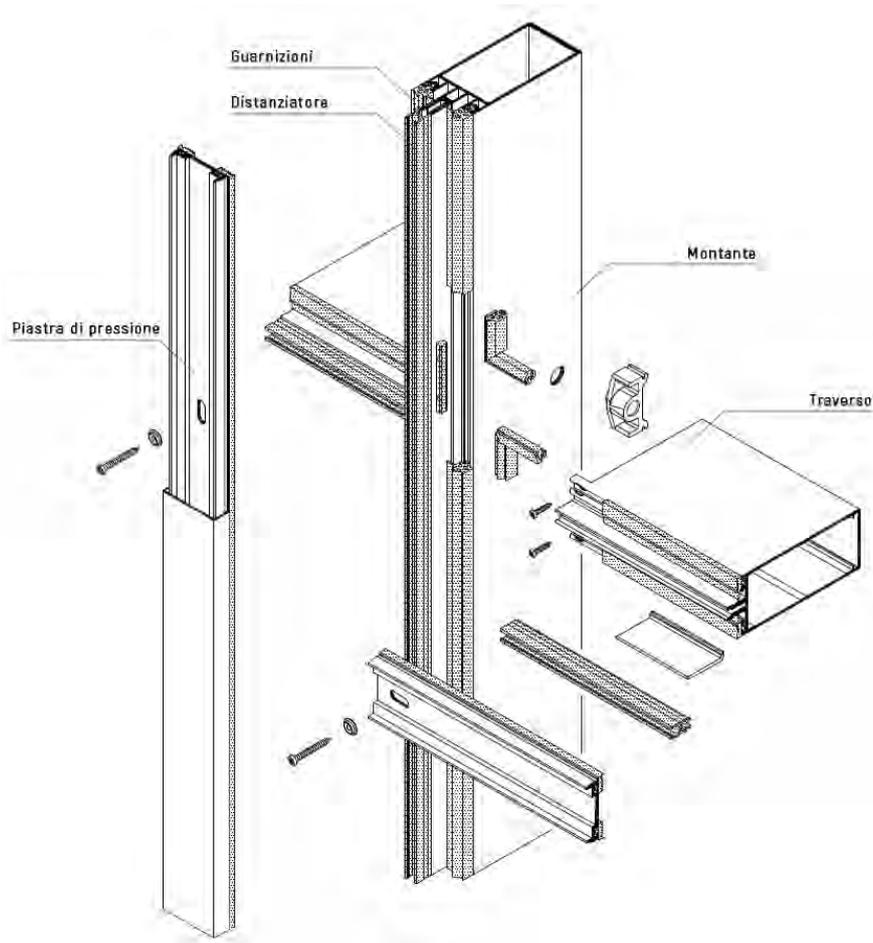
#### Stick system - "Montanti e traversi"

Si tratta di un sistema assemblato sul posto attraverso profili solitamente in alluminio estruso, posti in direzione verticale e orizzontale a formare una cornice metallica che funge da sostegno per i pannelli. L'alta deformabilità dell'acciaio in caso di incendio richiede di trattare i profili con processi di anodizzazione, che creano una patina superficiale sulle superfici e ne incrementano così le caratteristiche meccaniche del materiale.



*Stick System Curtain Wall Installation Technique (Helmut, K. 2008)*

Dal punto di vista progettuale, la scelta dimensionale dei profili è determinata tanto da ragioni strutturali per sopportare i carichi dinamici dovuti alle azioni del vento, quanto a ragioni estetiche. Il vantaggio di montare "a pezzi" questo genere di sistema risiede nel poter trasportare un kit da montare dai volumi notevolmente ridotto.

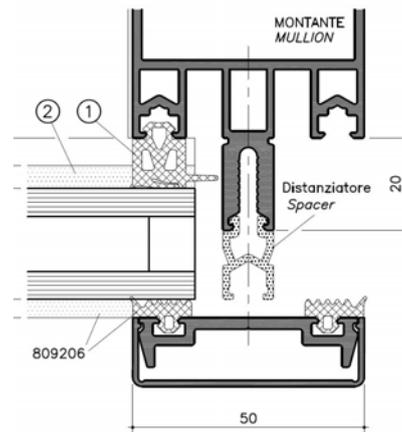


*Vista esplosa del sistema Stick della serie SL50. Immagine concessa da Aluk (2018)*

Il fissaggio dei pannelli, vetrati o *spandrel*, il pannello cieco posto in corrispondenza del solaio, può avvenire mediante:

- *Pressore esterno*

La lastra viene fissata mediante viti ad una piastra di pressione, anche definito *pressore*, che tiene il pannello e le guarnizioni premuti contro il telaio strutturale.

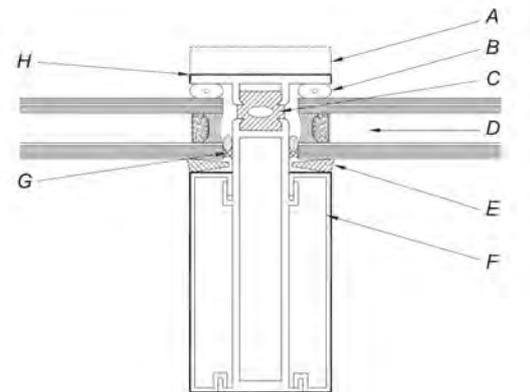


Vista di pianta del sistema Stick della serie SL50.

Immagine concessa da Aluk (2018)

- *Fermo fiss*

La battuta esterna è fissa e tiene in pressione le guarnizioni previste. In questo caso i pannelli vetrati vengono montati dal lato interno rimuovendo il fermo interno.



- A - Tappo a scatto opzionale
- B - Nastro per vetri
- C - Taglio termico
- D - Camera d'aria
- E - Guarnizione in gomma
- F - Fermo interno rimovibile
- G - Guarnizione di tenuta all'aria
- H - Fermavetri esterno fisso

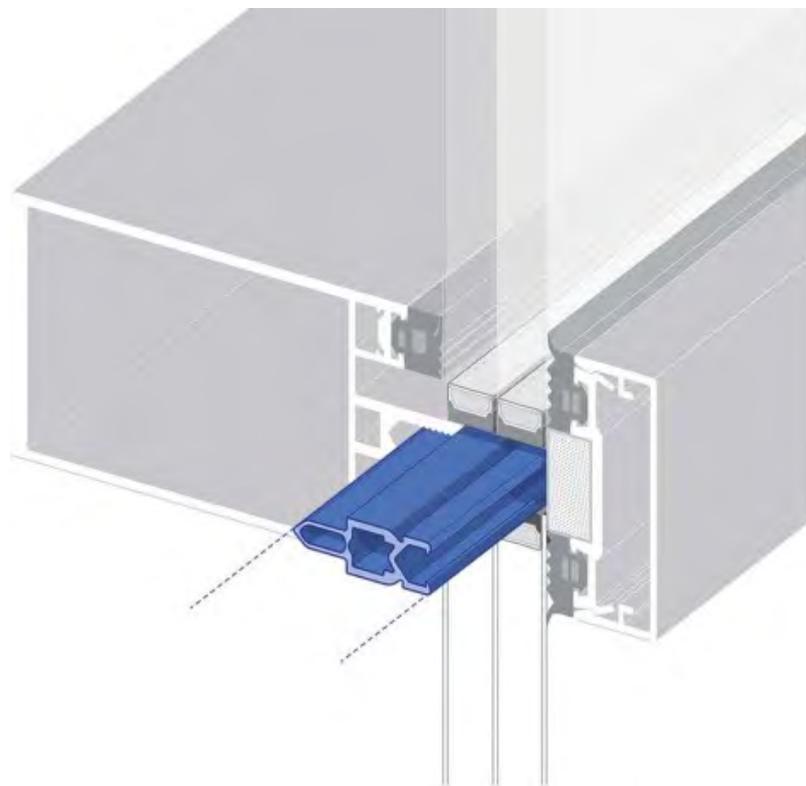
*Glass and metal Curtain walls. Best practice guide building technology. CMHC, Canada*

Le *guarnizioni* sono poste in corrispondenza dei giunti orizzontali e verticali. Le caratteristiche materiche di cui sono costituite le guarnizioni (EPDM, neoprene, silicone), in virtù della propria elasticità e impenetrabilità, divengono di fondamentale importanza nella realizzazione di una facciata continua.

Il loro compito infatti è da un lato quello di evitare eventuali lesioni e rotture che possono verificarsi agli spigoli dei pannelli, a causa di oscillazioni e sfregamento contro le parti metalliche, dall'altro quello di abbattere l'immissione di acqua e di aria all'interno dell'edificio.

La guarnizione esterna favorisce la tenuta alle infiltrazioni di acqua, mentre quella interna si configura di fatto come una barriera e previene le possibili infiltrazioni d'aria.

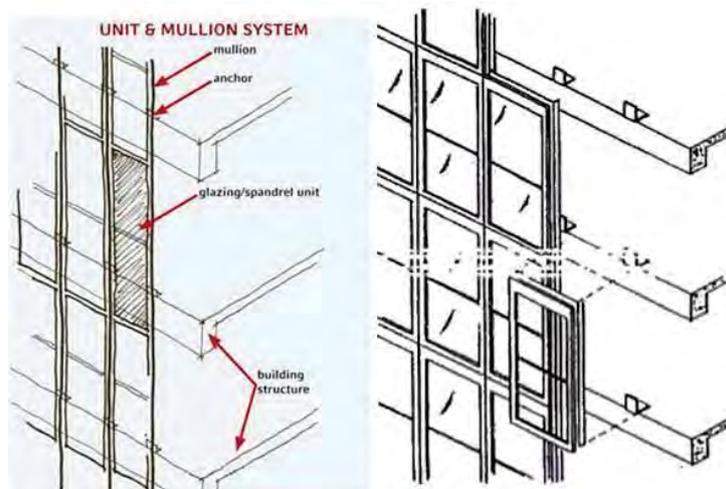
I *distanziatori* sono elementi in EPDM, neoprene o silicone o materiali simili a base polimerica che mantengono la tenuta termica e alle infiltrazioni alla base delle lastre di vetro, tra l'elemento pressore e il profilo. Il materiale plastico di cui è composto deve essere altrettanto resistente per sostenere il peso degli stessi pannelli e quindi varia a seconda dello spessore delle lastre previsto.



*Distanziatore in EPDM. <https://www.vidrioperfil.com>*

## Unitized system - "A cellule"

Il sistema a cellule prevede di produrre un pannello autonomo modulare interamente assemblato in fabbrica che richiede la sola installazione nel luogo di progetto. La maggiorparte dei processi di validazione di questo sistema si concentra durante la fase di fabbricazione, dove le prestazioni del singolo pannello vengono personalizzate e testate per poi essere trasferito in cantiere. La velocità di montaggio è il motivo per cui risulta il sistema più utilizzato negli ultimi anni nella progettazione di edifici di considerevole altezza. Infatti il posizionamento dei pannelli può essere operato tramite sollevamento e movimentazione per mezzo di gru e successivamente questi vengono fissati direttamente dall'interno dell'edificio a delle staffe prediposte sui solai o su appositi montanti, riducendo così i costi di eventuali ponteggi sulla facciata.



*Unitized Curtain Wall Installation (Helmut, K. 2008)*

Dal punto di vista delle performance, le cellule necessitano di un numero minore di sigillanti rispetto alla tipologia stick e quindi viene notevolmente minimizzato il rischio di infiltrazioni di aria e acqua dall'involucro, generalmente dovute ad un'errata posa in opera delle componenti. Alternativamente esistono anche tipologie ibride di cellule che richiedono la necessità di essere bloccate da un fermavetro esterno alla facciata, in aggiunta alle staffe predisposte sui solai per l'ancoraggio.

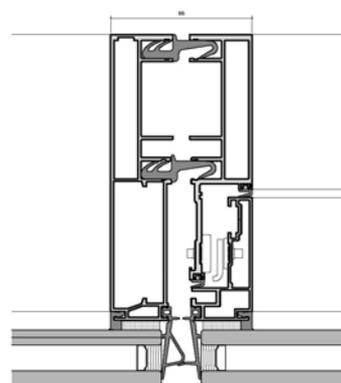
Le unità possono essere anche agganciate ai montanti per mezzo di ritegni meccanici. La variante della serie AW86B di Aluk ad esempio prevede delle cellule da applicare alla struttura del curtain wall mediante fissaggi di ritegno meccanico e guarnizioni interna.



*Vista tridimensionale del sistema Unized della serie AW86B.*

*Immagine concessa da Aluk (2018)*

Ulteriore variante di Aluk è costituita dalla serie AW86S, dove le cellule sono incollate strutturalmente ai montanti.

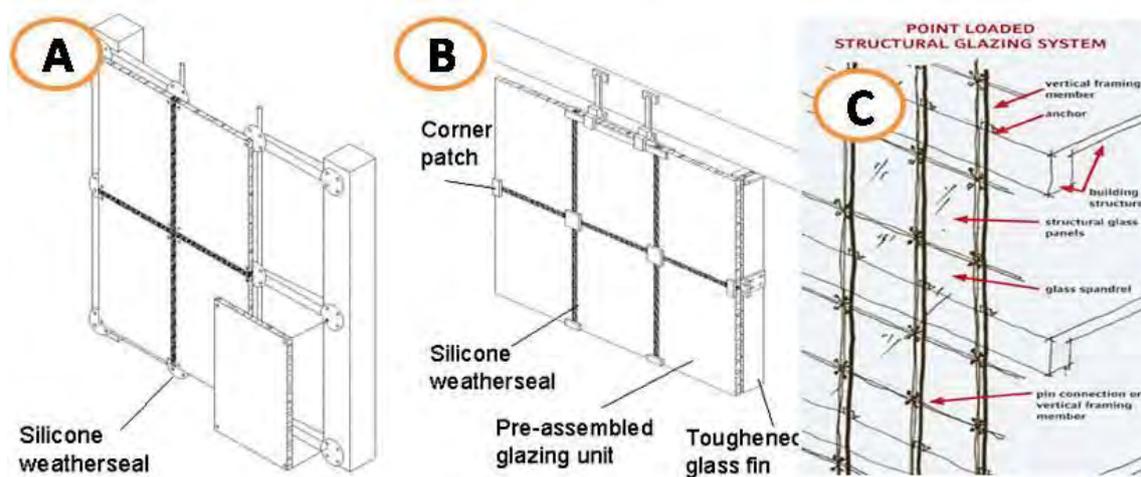


*Vista di pianta del sistema Unized della serie AW86S.*

*Immagine concessa da Aluk (2018)*

## Structural Glazing Facade - SGF

Altro sistema da richiamare, è la SGF - Structural Glazing Facade. Questa tipologia di facciata si differenzia dai sistemi prima descritti per l'assenza della cornice strutturale e pressori in alluminio. L'aspetto esteriore risulta una pelle vetrata ininterrotta costituita da pannelli vetrati accostati e i giunti impermeabilizzati con sigillanti applicati a umido. Viene utilizzata generalmente laddove si hanno grandi luci, contrariamente alla tipologia stick che lavora tra solaio e solaio, scaricando i carichi su una sottostruttura retrostante che può essere del tipo montanti e traversi o mediante cavi e altri profili metallici.

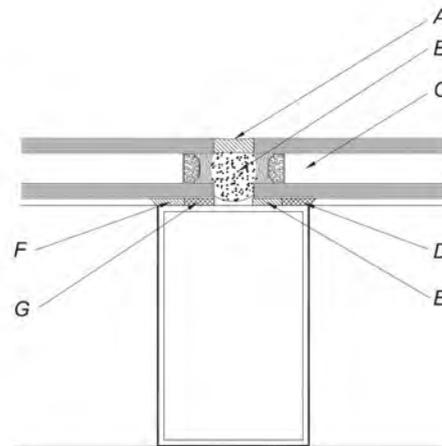


*Unitized Curtain Wall Installation (Helmut, K. 2008)*

## Structural Sealant Glazing - SSG

Il sistema di facciata a con silicone strutturale non richiede la presenza di piastre di pressione o ritegni meccanici. L'assemblaggio avviene mediante sigillanti a base di silicone che mantengono incollati i pannelli alla struttura. Il vantaggio di questo tipo di montaggio è il risultato estetico in quanto viene mantenuta una continuità materica delle superfici.

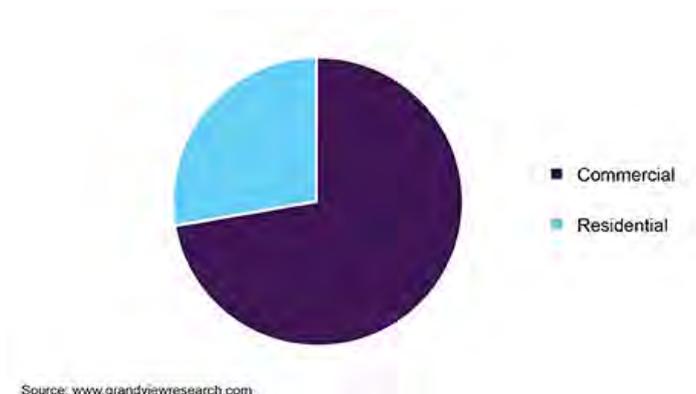
- A - Silicone esterno per la tenuta alle intemperie
- B - Backer Rod. Schiuma di supporto nel giunto
- C - Camera d'aria
- D - Guarnizione compatibile con il silicone
- E - Silicone strutturale
- F - Silicone strutturale
- G - Guarnizione di tenuta all'aria compatibile con silicone



*Glass and metal Curtain walls. Best practice guide building technology. CMHC, Canada*

### 3.4 - La dimensione del mercato degli involucri edilizi in alluminio

Il mercato globale delle facciate continue in alluminio<sup>1</sup> è in continua espansione grazie alla capacità di realizzare involucri ampi e trasparenti per garantire un significativo apporto di illuminazione naturale e quindi risparmio energetico. L' estrema facilità di assemblaggio richiesta da edifici commerciali e luoghi di lavoro, nel 2019 ha portato il comparto della produzione ad una dimensione stimata di 31,9 miliardi di dollari e si prevede che tra il 2020 e il 2027 si assisterà ad un CAGR - *Tasso di crescita annuo composto* del 9,6%, maturando un valore di 62,85 miliardi entro la fine del periodo.



*Mercato cinese del curtain-wall nel 2019 per campo di applicazione.*

La scelta di impiego di involucri in alluminio è coerente con le politiche di sostenibilità sulle quali stanno investendo i governi a livello mondiale, decisamente inclini alla riduzione delle emissioni di gas serra e alle strategie energetiche smart per il controllo dei consumi dell'edificio. India, Cina, Giappone e Thailandia, in cui intere città stanno sorgendo rapidamente, guidano il trend e confermano l'aumento degli investimenti nel settore. La regione dell'Asia e del Pacifico infatti rappresenta il 35% della quota di mercato influenzata notevolmente dalle richieste di spazi commerciali. Anche l'ammodernamento

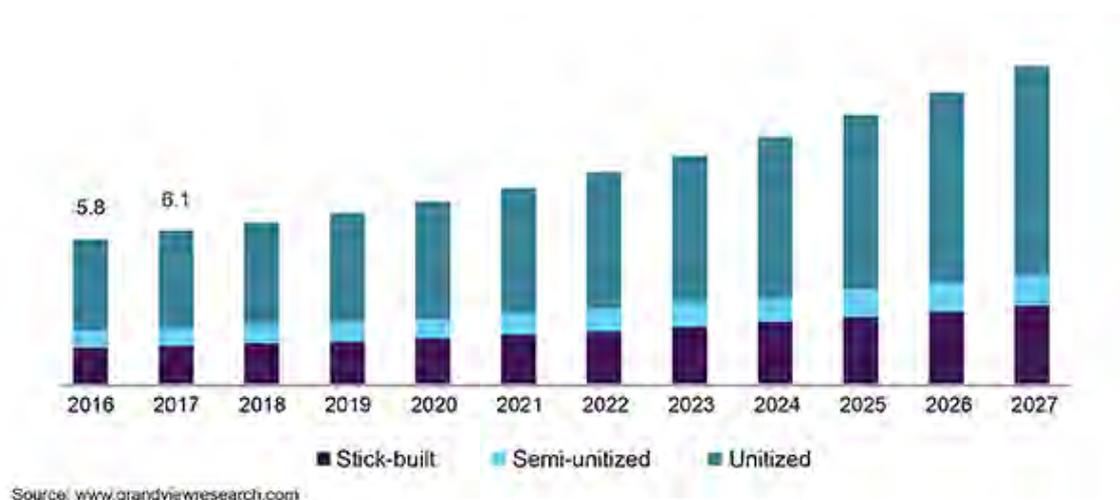
<sup>1</sup> Fonte [www.grandviewresearch.com](http://www.grandviewresearch.com)

degli edifici esistenti porterà giocoforza a ripensare l'involucro con materiali ad alta percentuale di riciclabilità, oltre che leggerezza, permeabilità alla luce naturale.

In Cina nel 2019 la crescente domanda di spazi commerciali ha determinato una quota di fatturato globale delle facciate continue in alluminio attestata a quasi il 75%, a scapito di quella in sede residenziale, dove si prevede una ripresa del mercato soprattutto in USA e Sud America.

Il CARG maggiore nel periodo (+8,2%) in ottica di previsione è quello di Medio Oriente e Africa, dove si immagina che Dubai possa imporsi quale polo finanziario e possa condizionare l'imminente crescita dell'edilizia in Arabia Saudita e Qatar.

Tra le diverse tipologie, il sistema Stick ha rappresentato un fatturato di 16,2 miliardi di dollari nel 2019 e risulta essere ancora oggi molto comune, essendo un sistema più comodo da fabbricare e più rapido da trasportare. Malgrado ciò, gli elevati costi di installazione e i tempi di installazione maggiori portano a considerare un minor impiego nei prossimi anni.

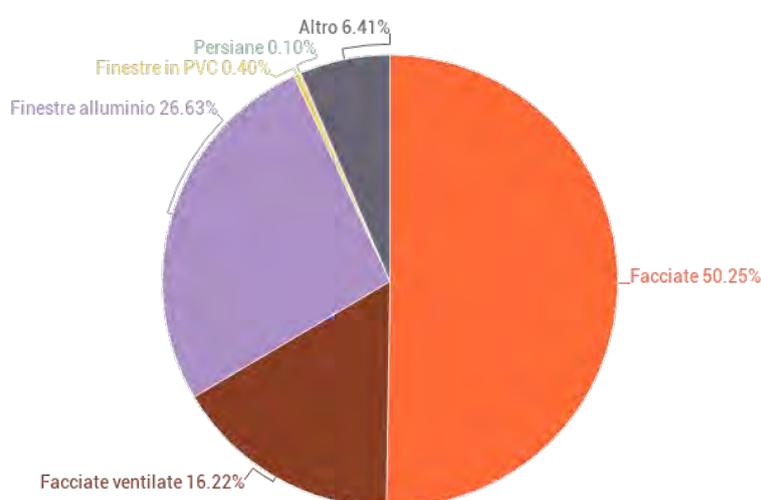


*Mercato americano del curtain wall per tipo. 2016 - 2027 in Bilioni di dollari*

Il segmento di mercato della tipologia Unitized è oggi il sistema più utilizzato quando si tratta di edifici di una certa complessità e rapidità di costruzione. Nel 2019 ha infatti registrato oltre il 65% del fatturato globale grazie al vantaggio

di essere pre-assemblato, necessita minori tempi di installazione, costi di manodopera e minore produzione di rifiuti in fase di fabbricazione.

In Italia il mercato delle facciate continue<sup>2</sup> è in continua crescita e risulta essere oggi il 50,2% del fatturato per sistemi di involucro. I dati del fatturato disponibili nel decennio 2010-2021 dimostrano che, nonostante una flessione attorno a metà del decennio, il mercato italiano conta 565 milioni di euro previsti al 2021 (\*dati pre-covid 2019) in netto rialzo sul 2020 (+3,1%).



*Fatturato 2020 aziende italiane per prodotto di facciata.*

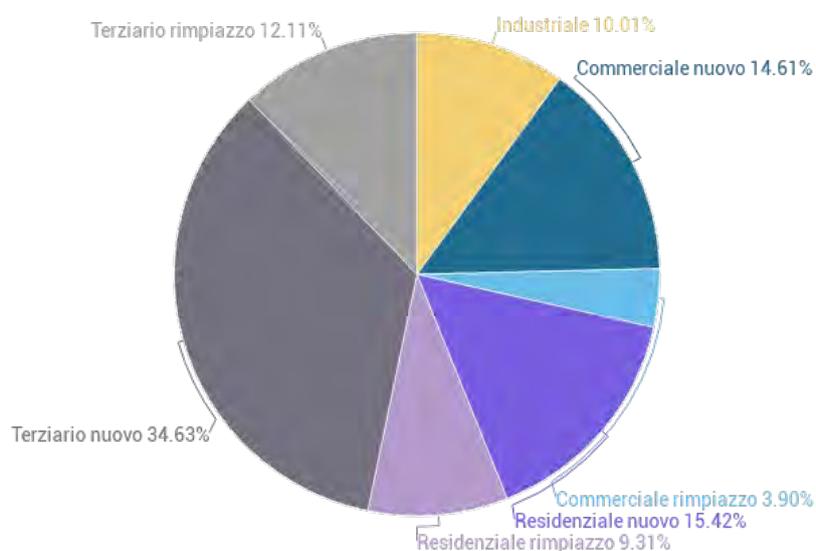
Nel 2020 si riporta inoltre un notevole indice percentuale (37,4%) di quota export di facciate fabbricate in Italia verso l'estero, a comprova di un settore, quello delle facciate, ormai piuttosto consolidato. I segni della pandemia sul mercato riflettono nel 2020 un calo del tasso di crescita annuo al -7,7% nel settore dei serramenti e delle facciate continue e dalle stime dei dati si può immaginare un ritorno al +3,9% nel 2021.

<sup>2</sup> Fonte UNICMI su base dati ISTAT 2020 e stimati 2021.



*Tasso di crescita annuo 2016-2021 in Italia nel settore facciate e serramenti.*

Il segmento di maggior utilizzo dichiarato dai costruttori italiani è dato dalle nuove costruzioni di edifici ad uso ufficio (34,6%), seguiti dal nuovo residenziale (15,4%) e dal nuovo a destinazione commerciale (14,6%).



*Segmenti di impiego delle facciate continue in Italia.*

L'analisi sui committenti delle facciate denota che quasi la metà delle richieste è riconducibile alle grandi imprese, mentre piccole e medie imprese e privati occupano rispettivamente 19,4% e 24,9%.

### 3.3 - Repertorio di involucri innovativi

Gli esempi di involucri ad alta efficienza, qui di seguito elencati dando priorità agli studi più recenti, sono stati selezionati e classificati secondo criteri tipologici, funzionali e cronologici. Si è preferito non trattare in questa occasione i casi in via sperimentale, che non potessero restituire un risultato certo in termini progettuali.

I casi studio individuati e organizzati ulteriormente in esperienze internazionali e italiane sono:

#### Esperienze internazionali

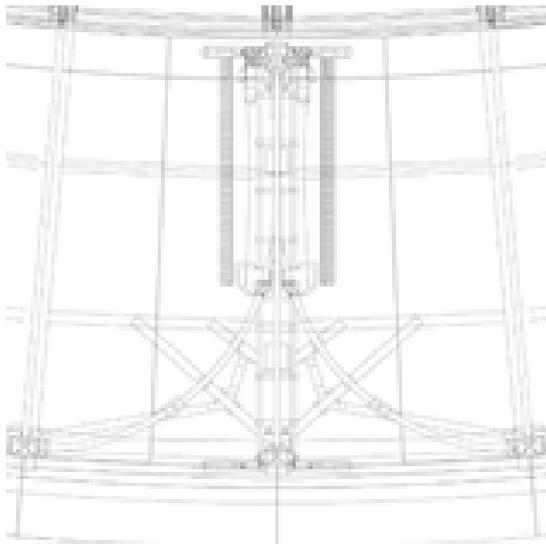
- |    |                             |  |
|----|-----------------------------|--|
| 1. | APPLE DUBAI MALL            | MADRID                                 |
| 2. | SWISSTECH CONVENTION CENTER | 9. MEDIA-ICT BUILDING                  |
| 3. | SOFT HOUSE                  | 10. EDIFICIO Q1 QUARTIERE THYSSENKRUPP |
| 4. | SAHMRI INSTITUTE            | 11. GINZA POLA BUILDING                |
| 5. | BIOREATTORE SOLARLEAF       | 12. KIEFER TECHNIC SHOWROOM            |
| 6. | THEMATIC PAVILION           | 13. MILWAUKEE ART MUSEUM               |
| 7. | AL-BAHR TOWERS              | 14. ISTITUTO DEL MONDO ARABO           |
| 8. | AUDENCIA PROVINCIAL DE      |  |

#### Esperienze italiane

15. 3D HOUSING 05
16. TCB HADID TOWER
17. TORRE INTESA SAN PAOLO
18. PALAZZO ITALIA EXPO 2015
19. PADIGLIONE VANKE EXPO 2015
20. SEDE CENTRALE ARCHIMEDE SOLAR SPA

## 1\_APPLE DUBAI MALL

<b>NOME</b>	Apple Dubai Mall
<b>LUOGO</b>	Dubai, United Arab Emirates
<b>PROGETTISTA(I)</b>	Foster + Partners
<b>ANNO DI COSTRUZIONE</b>	2017
<b>FUNZIONE</b>	Commerciale
<b>TIPO DI INVOLUCRO</b>	Doppio involucro
<b>ESPOSIZIONE</b>	sud
<b>FUNZIONE INVOLUCRO</b>	Termico (controllo solare)
<b>ZONA CLIMATICA</b>	Subtropicale desertico
<b>CLASSIFICAZIONE</b>	Movimento: meccanico - rotazione
<b>DESCRIZIONE</b>	<p>Il design di Apple Dubai Mall è una celebrazione del sole: viene infatti utilizzata l'abbondante luce del giorno per creare un ambiente speciale all'interno. Reinterpretando la tradizionale araba Mashrabiya, l'innovativa "Solar Wings" ombreggia la terrazza esterna durante il giorno e si apre durante la serata per rivelare la vista sul lungomare e sulle fontane. Con il loro movimento, le "ali solari" manifestano una visione integrata tra arte cinetica e ingegneria. Le Solar Wings sono state realizzate in fibra di carbonio per resistere all'ossidazione ed essere estremamente leggere. Ogni ala è alta 11 metri e larga 3m e pesa 1 tonnellata ed è costituita da 340 canne in fibra di carbonio la cui geometria è stata progettata per non intersecare mai. Le ali sono motorizzate e impiegano un minuto per aprirsi e chiudersi.</p>



## 2\_SWISSTECH CONVENTION CENTER

<b>NOME</b>	Convention Center
<b>LUOGO</b>	Losanna, Swiss
<b>PROGETTISTA(I)</b>	Richter Dahl Rocha & Partners
<b>ANNO DI COSTRUZIONE</b>	2014
<b>FUNZIONE</b>	Centro Congressi
<b>TIPO DI INVOLUCRO</b>	Curtain wall
<b>ESPOSIZIONE</b>	Facciata Ovest
<b>FUNZIONE INVOLUCRO</b>	Termico (controllo e produzione solare)
<b>ZONA CLIMATICA</b>	Temperato
<b>CLASSIFICAZIONE</b>	Movimento: meccanico - Ibrido Controllo: centralizzato - diretto
<b>DESCRIZIONE</b>	<p>Il centro congressi di Losanna è la prima sala congressi su larga scala ad utilizzare le celle solari sensibilizzate da coloranti (DSSC), anche note come celle di Grätzel, ricercatore presso l'EPFL - École polytechnique fédérale de Lausanne, da cui prendono il nome. Nella facciata occidentale dell'edificio sono integrati 300 metri quadrati di celle fotovoltaiche coloranti, che costituiscono la prima applicazione di questa tecnologia in un edificio pubblico. Essendo i pannelli traslucidi, l'angolo di incidenza della luce non fa differenza per le celle, che possono essere schierate verticalmente senza alcuna perdita di prestazioni. Oltre a generare elettricità da fonti rinnovabili, proteggono l'edificio dalla luce solare diretta e riducono quindi la necessità di utilizzare energia di raffreddamento.</p>



### 3\_SOFT HOUSE

<b>NOME</b>	Soft House
<b>LUOGO</b>	Hamburg, Germany
<b>PROGETTISTA(I)</b>	KVA matx
<b>ANNO DI COSTRUZIONE</b>	2013
<b>FUNZIONE</b>	Residenziale - Unità abitative a schiera
<b>TIPO DI INVOLUCRO</b>	Curtain wall
<b>ESPOSIZIONE</b>	Facciata Sud
<b>FUNZIONE INVOLUCRO</b>	Termico (controllo solare)
<b>ZONA CLIMATICA</b>	Temperato
<b>CLASSIFICAZIONE</b>	Movimento: meccanico - Ibrido Controllo: centralizzato - diretto



**DESCRIZIONE**

La struttura della Soft House è una tradizionale struttura in legno massello e coperta con giunti a tasselli in legno. La costruzione in legno è accompagnata da nano materiali solari flessibili in un rivestimento tessile leggero e intelligente che raccoglie energia capace di piegarsi per rispondere all'angolo del sole o per aprire la vista verso l'esterno. Il rivestimento in tessuto filtra la luce solare diretta su una grande facciata vetrata con vista sui parchi. Un atrio a tre piani per la convezione dell'aria porta la luce del giorno al piano terra e modula l'ascesa e la caduta dell'aria calda e fredda con un sistema di tende interne e bocchette di apertura. I LED nelle tende mobili sono coinvolgenti, consentendo alle persone di creare nuove connessioni tra l'ambiente domestico e quello naturale. Questa facciata "smart" consente il monitoraggio e la visualizzazione in tempo reale delle condizioni esterne del vento e del clima e la luce a stato solido che si muove lungo la superficie della stessa crea un vento visivo, un'espressione luminosa in relazione ai livelli di vento esterni.

## 4\_SAHMRI INSTITUTE

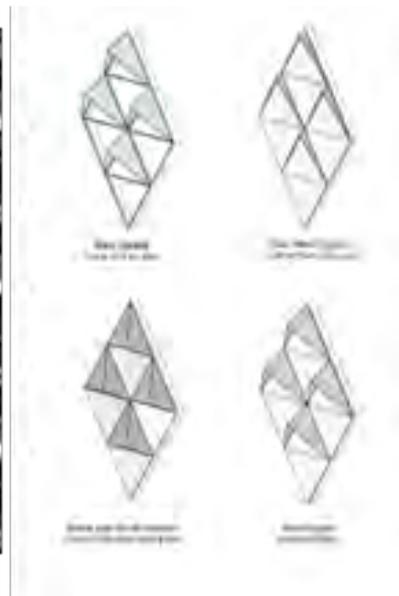
<b>NOME</b>	South Australian Health and Medical Research Institute
<b>LUOGO</b>	Adelaide, Australia
<b>PROGETTISTA(I)</b>	Woods Bagot
<b>ANNO DI COSTRUZIONE</b>	2013
<b>FUNZIONE</b>	Istituto di ricerca per la salute e la medicina
<b>PREMI</b>	R&D Magazine Laboratory of the Year 2015
<b>TIPO DI INVOLUCRO</b>	Curtain wall
<b>ESPOSIZIONE</b>	Facciata Sud
<b>FUNZIONE INVOLUCRO</b>	Termico
<b>ZONA CLIMATICA</b>	Moderato
<b>CLASSIFICAZIONE</b>	Movimento: meccanico - Ibrido Controllo: centralizzato - diretto



**DESCRIZIONE**

Per consentire l'abbondanza di luce all'interno dell'edificio e attraverso gli spazi destinati ai laboratori, Woods Bagot ha progettato una serie di ombrelli in alluminio per ogni modulo di vetro, per l'ombra e in particolare per modulare la quantità di luce necessaria all'interno dell'edificio, come determinato dalla modellazione parametrica effettuata dai software. La struttura a maglia diagonale avvolge l'intero edificio, una singola pelle che la fa apparire come un oggetto unico, tanto da farla sembrare dall'esterno come una pigna gigante (è uno dei soprannomi locali del SAHMRI).

Un altro aspetto ecologico del SAHMRI è il suo sistema di climatizzazione: sfruttando lo spazio aperto sotto l'edificio, il sistema aspira aria fredda dal basso e scarica l'aria più calda nella parte superiore, creando un effetto camino a bassa energia. Questo, combinato con un sistema di acqua e di smaltimento dei rifiuti attenti all'energia, ha aiutato SAHMRI a ottenere un rating LEED Gold, il primo edificio di ricerca medica in Australia a farlo.



## 5\_BIOREATTORE SOLARLEAF

<b>NOME</b>	Solarleaf
<b>LUOGO</b>	Hamburg, Germany
<b>PROGETTISTA(I)</b>	Splitterwerk Architects - SSC Strategic Science Consult GmbH - ARUP
<b>ANNO DI COSTRUZIONE</b>	2013
<b>FUNZIONE</b>	Progetto sperimentale
<b>PREMI</b>	Zumtobel Group Award 2014
<b>TIPO DI INVOLUCRO</b>	Curtain wall
<b>ESPOSIZIONE</b>	Facciata Sud
<b>FUNZIONE INVOLUCRO</b>	Termico, qualità dell'aria (controllo Co2), prestazioni acustiche
<b>ZONA CLIMATICA</b>	Moderato
<b>CLASSIFICAZIONE</b>	Movimento: meccanico - Ibrido Controllo: centralizzato - diretto



<p><b>DESCRIZIONE</b></p>	<p>La facciata di Solarleaf utilizza la biomassa delle alghe marine in combinazione con il calore solare termico per creare un sistema dinamico, collaborazione delle aziende Colt e Arup. La biomassa algale contenuta nei pannelli verticali in vetro è creata dalla conversione dalla luce diurna e del CO2 all'acqua degli infissi che contiene nutrienti. Inoltre, gli effetti termici derivanti dall'aumento del sole si traducono nel riscaldamento dell'acqua all'interno. Il processo biochimico, la conversione della luce in biomassa, è facilitato dalle microalghe, responsabili della conversione di CO2 grazie alla fotosintesi. La facciata di Solarleaf funziona come un sistema di protezione contro la pioggia e forma la facciata continua dell'edificio. Qui gli elementi ruotano in base alla posizione del sole e i fotobioreattori, mediante cui circola l'acqua e le alghe crescono, sono previsti su entrambi i lati del vetro stratificato per sicurezza. Inoltre, nella parte inferiore del bioreattore, l'aria compressa viene introdotta più volte. Questo stimola l'afflusso di CO2 e della luce per le alghe. Inoltre, si ottiene una manutenzione naturale: l'aria compressa crea una miscela di acqua e aria che lava le superfici interne dei pannelli. La trasparenza delle facciate può essere regolato variando la densità cellulare della biomassa tramite un sistema centralizzato di gestione dell'edificio. Il sistema del bioreattore aiuta a ridurre le emissioni di CO2 dell'edificio e aumenta le prestazioni termiche e acustiche dell'edificio. Il fatto che il sistema sia basato sulla biomassa è vantaggioso rispetto al sistema fotovoltaico: infatti non è necessario alcun immagazzinamento dell'energia .</p>
---------------------------	--

## 6\_THEMATIC PAVILION

<b>NOME</b>	Thematic Pavilion
<b>LUOGO</b>	Yeosu, South Korea
<b>PROGETTISTA(I)</b>	SOMA - Knippers Helbig Advanced Engineering
<b>ANNO DI COSTRUZIONE</b>	2012
<b>FUNZIONE</b>	Esposizioni multimediali, spazi per ricerca e tecnologia
<b>TIPO DI INVOLUCRO</b>	Curtain wall
<b>FUNZIONE INVOLUCRO</b>	Termico (controllo solare)
<b>ZONA CLIMATICA</b>	Subtropicale
<b>CLASSIFICAZIONE</b>	Movimento: stimoli esterni su materiale Controllo: centralizzato - diretto



**DESCRIZIONE**

Questo padiglione dalla forma di pesce è stato costruito per l'EXPO 2012 a Yeosu, in Corea del Sud, lungo una nuova passeggiata nell'ex bacino portuale industriale. Il tema dell'Expo era "The Living Ocean and Coast". Gli architetti di SOMA (dall'Austria) avevano l'intenzione di creare un punto di riferimento che si armonizzasse con il suo contesto urbano e naturale. La forma e il design dell'edificio creano l'esperienza di un oceano come una superficie senza fine e di una certa profondità. L'ispirazione per questa facciata cinetica si basa sull'applicazione dei movimenti biologici in architettura (biomimetica). La facciata ha alcune lamelle mobili che possono controllare l'ingresso della luce nell'edificio, aprendosi e chiudendosi in successione e consentendo la creazione di pattern ondulati lungo la facciata dell'edificio. Le lamelle sono fatte di polimeri rinforzati con fibre di vetro e sono combinate a dei LED sul lato interno. Quando queste sono in posizione aperta, i LED possono illuminare le lamelle adiacenti tramite energia proveniente dai pannelli solari sul tetto.



## 7\_AL-BAHR TOWERS

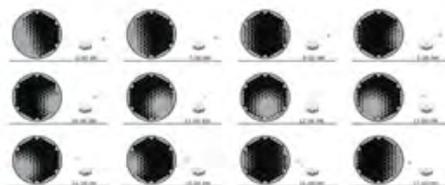
<b>NOME</b>	Al-Bahr Towers
<b>LUOGO</b>	Abu Dhabi, UAE
<b>PROGETTISTA(I)</b>	Aedas Architects, Abdulmajid Karanouh - ARUP
<b>ANNO DI COSTRUZIONE</b>	2009-2012
<b>FUNZIONE</b>	Uffici
<b>PREMIO</b>	CTBUH 'Innovation' award 2012, Tall Building Innovation Award 2012
<b>TIPO DI INVOLUCRO</b>	Curtain wall
<b>ESPOSIZIONE</b>	Facciata Sud, Ovest ed Est
<b>FUNZIONE INVOLUCRO</b>	Termico (controllo solare), ottico (abbagliamento, regolazione della luce naturale)
<b>ZONA CLIMATICA</b>	Subtropicale
<b>CLASSIFICAZIONE</b>	Movimento: meccanico - Ibrido Controllo: centralizzato - diretto/reattivo



<p><b>DESCRIZIONE</b></p>	<p>AEDAS ha progettato nel 2008 il concept per due torri ad Abu Dhabi, caratterizzate dall'integrazione di ambiente, tradizione e tecnologia. Ogni torre è alta 150 metri e la forma fluida è ispirata ad un nido d'ape. Il clima negli Emirati Arabi Uniti è caratterizzato da un caldo intenso e dall'abbagliamento, che richiedevano una soluzione innovativa per creare un ambiente interno confortevole. Il sistema di ombreggiamento automatizzato è un sistema di facciata continua posto su un telaio indipendente, distante due metri dall'esterno dell'edificio. Ogni modulo dello schermo è costituito da sei frammenti triangolari. I telai si muovono attraverso un attuatore e un pistone centrale. Il rivestimento della facciata è posizionato a sud, ovest ed est, mentre la faccia dell'edificio a nord è esposta ai raggi solari diretti solo per un breve periodo prima e dopo l'orario di lavoro, il che rende l'ombreggiamento non necessario. Il motivo geometrico, una struttura triangolare basata sul tradizionale Mashrabiya islamico, è composto da parti che si aprono e si chiudono in reazione al movimento del sole durante il giorno e cambiando gli angoli di incidenza durante i diversi giorni dell'anno. Nella notte, il modulo è chiuso, il che rende visibile l'esterno. Al mattino, quando è presente la luce diretta del sole, il disegno si chiude sul lato est e si muove con il sole intorno all'edificio durante il giorno. Il movimento dinamico dei pannelli ricorda l'apertura e la chiusura dei fiori. L'involucro è costituito da componenti mobili semitrasparenti a ombrello in PTFE (politetrafluoroetilene, rivestito in teflon che reagiscono alla posizione del sole allungandosi. La geometria aerodinamica dei pannelli li aiuta a resistere efficacemente alle pressioni del vento. Inoltre, il colore dei pannelli si adatta perfettamente al colore della sabbia circostante del deserto. Ogni torre comprende 1000 singoli dispositivi di ombreggiamento controllati da Building Management System. Il controllo dei pannelli, basati su modellazione parametrica e algoritmica, viene eseguita da un software di gestione appositamente progettato. Il meccanismo di un'unità è azionato da un attuatore elettrico a coclea posizionato centralmente e che utilizza a bassa quantità di energia. Alcuni sensori regolano l'apertura intelligente dei pannelli durante la giornata e rispetto alle condizioni di cielo coperto e vento forte. Questi sensori forniscono dati in tempo reale su situazioni pericolose riguardo luce, vento e pioggia. Il sistema si traduce in un enorme aumento dell'uso di energia alternativa, migliora il comfort e la luce negli spazi interni riducendo del 50% l'ingresso della radiazione solare nell'edificio. Allo stesso tempo, la necessità di illuminazione artificiale è ridotta. Il movimento di chiusura riduce l'abbagliamento solare evitando la distorsione causata da tende interne o l'uso di vetro colorato scuro.</p>
---------------------------	---

## 8\_AUDENCIA PROVINCIAL DE MADRID

<b>NOME</b>	Audiencia Provincial
<b>LUOGO</b>	Abu Dhabi, UAE Campus de la Justicia, Madrid
<b>PROGETTISTA(I)</b>	Hoberman Associates, Foster + Partners
<b>ANNO DI COSTRUZIONE</b>	2011
<b>FUNZIONE</b>	Palazzo di Giustizia
<b>TIPO DI INVOLUCRO</b>	Copertura
<b>FUNZIONE INVOLUCRO</b>	Termico (controllo solare), ottico (abbagliamento, regolazione della luce naturale), flusso d'aria (ventilazione)
<b>ZONA CLIMATICA</b>	Moderato
<b>CLASSIFICAZIONE</b>	Movimento: meccanico - traslazione Controllo: locale - diretto (sensori)



<b>DESCRIZIONE</b>	<p>Foster and Partners ha progettato due distinti edifici circolari per il nuovo Campus of Justice di Madrid. Il più grande dei due, l'Audiencia Provincial, consiste in una copertura sopra l'atrio a griglia triangolare, composta da una serie unica di celle esagonali per l'ombreggiamento (sistema Strata). L'ispirazione è basata sulla luce filtrata che risplende attraverso le foglie di un albero. Il sistema Strata è un sistema che può estendersi ad una superficie quasi continua composta da una serie di doghe in posizione aperta. In posizione retratta, le lamelle non ostruiscono la luce. Un algoritmo combina i dati storici relativi al guadagno solare e dai dati ottenuti in tempo reale dai sensori di luce. Il sistema di controllo è collegato a un servomotore con controllo di posizionamento personalizzato delle lamelle per consentire alla luce naturale di entrare il più possibile, riducendo al minimo la penetrazione della luce solare diretta. Il sistema Strata è utile per ridurre il guadagno l'abbagliamento solare e allo stesso tempo per controllare la ventilazione e i flussi d'aria in modo efficiente.</p>
--------------------	--

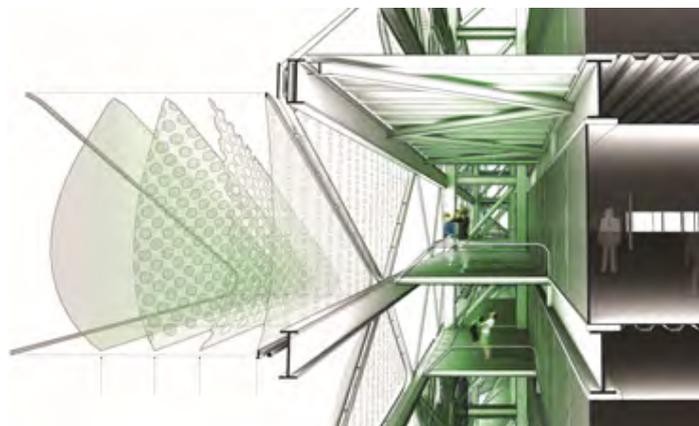
## 9\_MEDIA-ICT BUILDING

<b>NOME</b>	Media-ICT Building
<b>LUOGO</b>	Barcelona, Spain
<b>PROGETTISTA(I)</b>	Enric Ruiz Geli, Cloud9 Architecture
<b>ANNO DI COSTRUZIONE</b>	2010
<b>PREMI</b>	Best building in the world (WAF 2011)
<b>FUNZIONE</b>	Edificio per aziende scientifiche e tecnologiche, workshops e eventi
<b>TIPO DI INVOLUCRO</b>	Curtain wall
<b>ESPOSIZIONE</b>	Facciata Sud Ovest
<b>FUNZIONE INVOLUCRO</b>	Flussi d'aria (controllo aria), ottico (illuminazione), termico (sistema di ombreggiamento)
<b>ZONA CLIMATICA</b>	Moderato
<b>CLASSIFICAZIONE</b>	Movimento: stimoli esterni su materiale (fluido) Controllo: centralizzato - reattivo



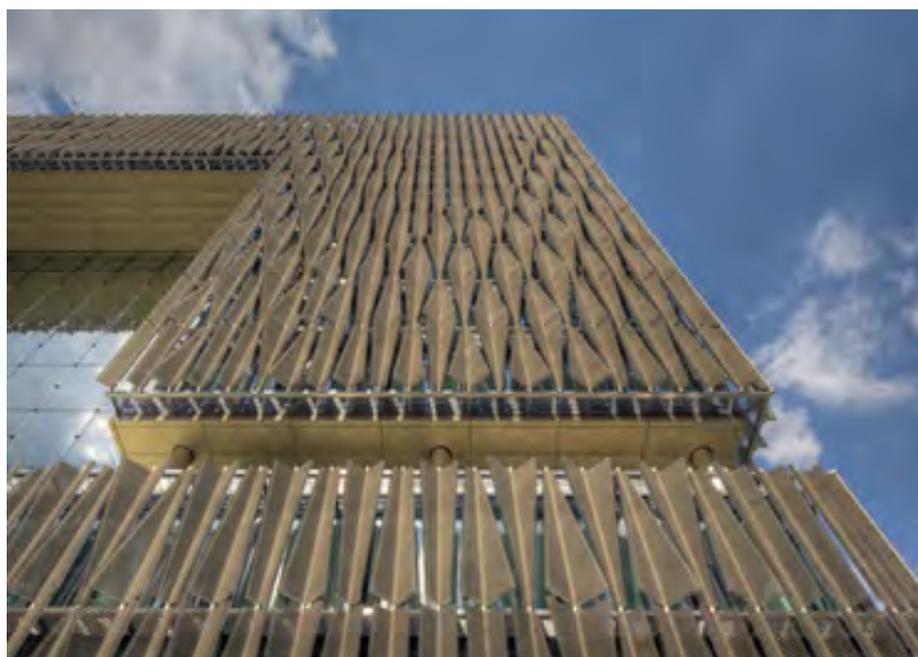
**DESCRIZIONE**

L'involucro dell'edificio è una pelle costituita da pannelli di plastica a temperatura controllata in grado di gonfiarsi e sgonfiarsi. Questo sistema può essere classificato come un principio di deformazione basato su un materiale fluido innescato da un input esterno. I segmenti gonfiabili, racchiusi in una cornice, hanno una forma triangolare ispirata alla natura. La membrana dei segmenti è una plastica a base di fluoro (ETFE: etilene tetrafluoroetilene) che formano delle camere d'aria controllate centralmente da sensori di energia solare. I sensori sono responsabili della contrazione e del gonfiaggio dei cuscini secondo la luce del sole differenziando le pressioni dell'aria all'interno dei "cuscini" e sul continuo calcolo dei cambiamenti ambientali. Il sistema non è in grado di reagire rapidamente alle mutevoli condizioni ambientali ma necessita in media circa un'ora per reagire. La membrana ETFE agisce come una protezione solare e filtra calore e raggi UV gonfiandosi. In inverno, i raggi solari vengono assorbiti dall'apertura della membrana per massimizzare la trasmissione di luce e calore verso l'interno. Accanto alla facciata adattativa, l'edificio è dotato di un tetto fotovoltaico e un sistema di riciclaggio delle acque piovane. Tutte queste misure contribuiscono ad un edificio quasi ad emissioni zero: le emissioni di carbonio sono ridotte del 95%. Inoltre, la pelle è anti-aderente e necessita di poca pulizia.



## 10\_EDIFICIO Q1 QUARTIERE THYSSENKRUPP

<b>NOME</b>	Q1 Building Quartiere Thyssenkrupp
<b>LUOGO</b>	Essen, Germany
<b>PROGETTISTA(I)</b>	JSWD Architekten, Chaix & Morel et Associés - IDN Ingenieur- büro
<b>ANNO DI COSTRUZIONE</b>	2010
<b>PREMI</b>	Gold certificate by the German Society for Sustainable Building, BDA Essen Award, 2012 German Steel Construction Award, LEAF Award
<b>FUNZIONE</b>	Uffici
<b>TIPO DI INVOLUCRO</b>	Curtain wall
<b>ESPOSIZIONE</b>	Tutte
<b>FUNZIONE INVOLUCRO</b>	Termico (controllo solare), ottico (controllo luce diurna)
<b>ZONA CLIMATICA</b>	Moderato
<b>CLASSIFICAZIONE</b>	Movimento: meccanico - rotazione (fuori piano) Controllo: centralizzato - reattivo



**DESCRIZIONE**

La facciata ha una serie verticale di pinne a spirale che formano un sistema adattivo di protezione solare. Le alette sono costituite da un perno centrale a cui sono collegate le doghe orizzontali a sbalzo. La torsione delle alette è possibile da 0°, parallelo alla facciata (blocco totale della radiazione diretta) a 90°, perpendicolare alla facciata (massima penetrazione della luce diurna). La facciata flessibile in questione è composta da 400.000 doghe in acciaio inossidabile totali, prodotte da ThyssenKrupp Nirosta. Le lamelle in acciaio sono rivestite con un rivestimento di zinco e magnesio che li rende resistenti al vento, alla corrosione, alle intemperie e ai raggi UV. A seconda del punto di vista e dell'incidenza del luce, l'aspetto delle lamelle sarà diverso. Il sistema di controllo che governa la rotazione delle lamelle è collegato alla posizione stagionale del sole e alle condizioni meteorologiche in tempo reale. Una stazione meteorologica è posta sul tetto ed invia segnali al computer. Il sistema di facciata rende superfluo l'uso di un sistema di aria condizionata artificiale nell'edificio. Inoltre, i costi dell'edificio sono ridotti escludendo la necessità di costosi alluminio profili nel rivestimento della facciata.



## 11\_GINZA POLA BUILDING

<b>NOME</b>	Ginza Pola Building
<b>LUOGO</b>	Ginza district, Tokyo, Japan
<b>PROGETTISTA(I)</b>	Hoberman Associates, Yasuda Atelier, Nikken Sekkei
<b>ANNO DI COSTRUZIONE</b>	2009
<b>PREMI</b>	Environment and Building Service System Design Award 2011
<b>FUNZIONE</b>	Showroom
<b>TIPO DI INVOLUCRO</b>	Doppio involucro
<b>ESPOSIZIONE</b>	Fronte principale
<b>FUNZIONE INVOLUCRO</b>	Termico (controllo solare)
<b>ZONA CLIMATICA</b>	Moderato
<b>CLASSIFICAZIONE</b>	Movimento: meccanico - ibrido (pieghevole)



<b>DESCRIZIONE</b>	<p>Lo Showroom ha una facciata dinamica in cui i filtri solari possono essere aperti e chiusi in base alle mutevoli condizioni ambientali. Quando questi sono completamente aperti, può entrare molta luce diurna dal momento che la pelle interna dell'edificio è completamente trasparente. Composto da montanti e traversi in alluminio, è un sistema di facciata continua semplice ma molto efficiente realizzato con pannelli di alluminio perforato controllati elettronicamente. Il controllo elettronico del sistema consente di consentire l'adattamento della struttura da parte degli utenti secondo le loro esigenze individuali per ottimizzare il clima interno.</p>
--------------------	--

## 12\_KIEFER TECHNIC SHOWROOM

<b>NOME</b>	Kiefer Technic Showroom
<b>LUOGO</b>	Bad Gleichenberg, Austria
<b>PROGETTISTA(I)</b>	Ernst Giselbrecht and Partner
<b>ANNO DI COSTRUZIONE</b>	2006-2007
<b>PREMI</b>	Austrian Architecture Award 2008
<b>FUNZIONE</b>	Uffici e spazi espositivi
<b>TIPO DI INVOLUCRO</b>	Curtain wall
<b>ESPOSIZIONE</b>	Tutte
<b>FUNZIONE INVOLUCRO</b>	Termico (guadagno solare), ottico (ingresso luce diurna), flusso d'aria (ventilazione)
<b>ZONA CLIMATICA</b>	Moderato/ subtropicale
<b>CLASSIFICAZIONE</b>	Movimento: meccanico - rotazione Controllo: locale - diretto



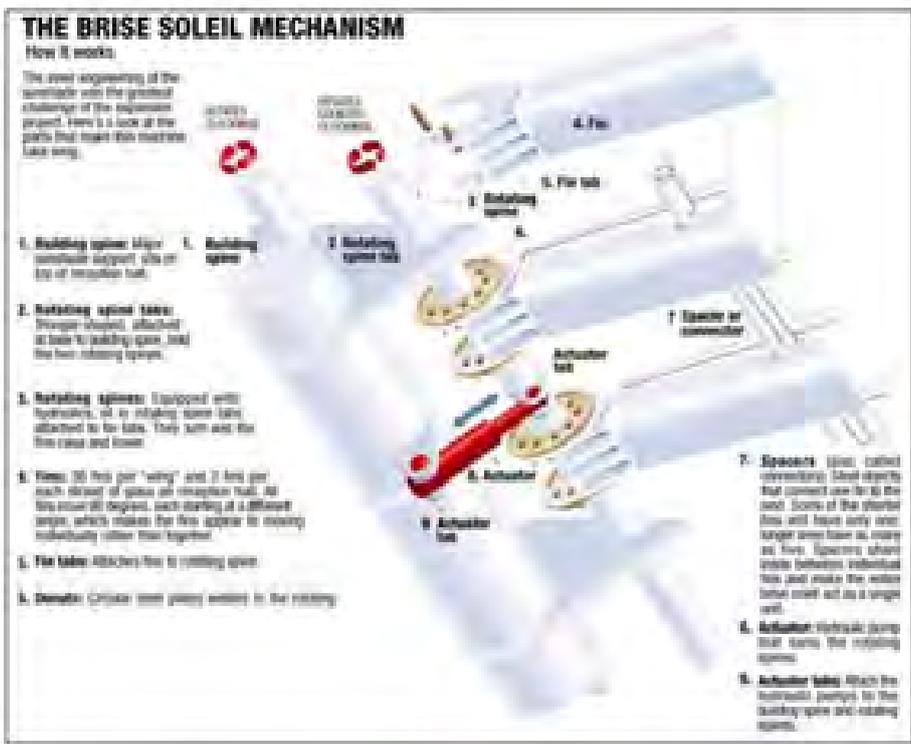
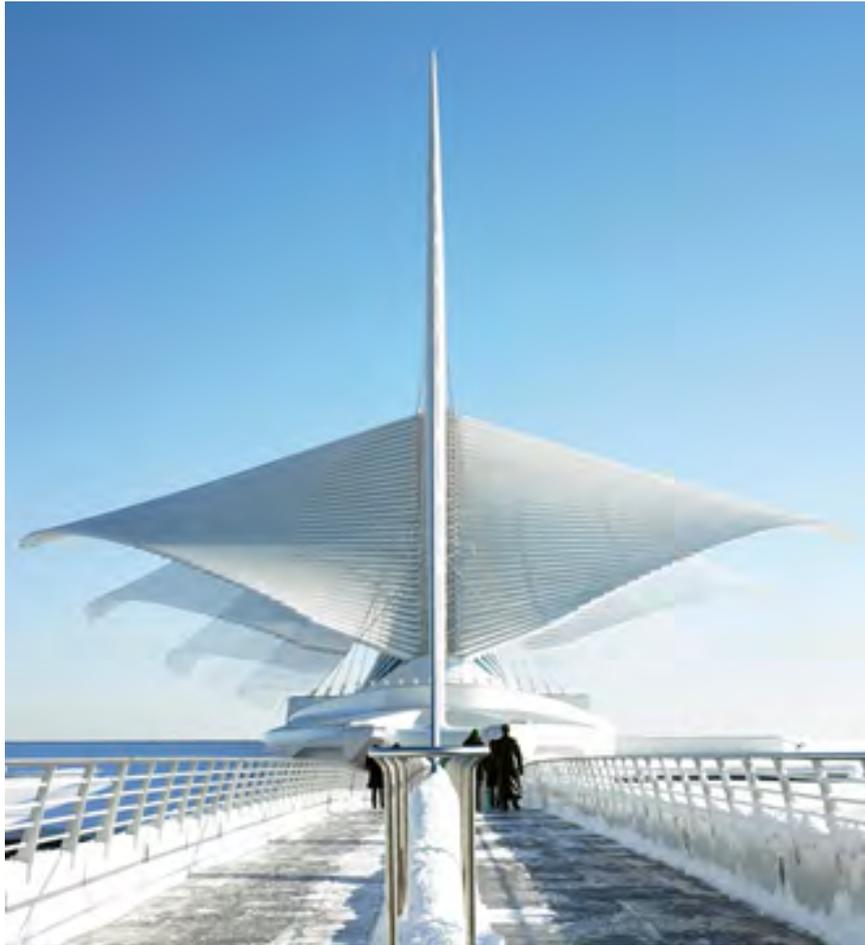
**DESCRIZIONE**

La facciata dello showroom nel quartiere Ginza di Tokyo è stata sviluppata nel 2009 da The Adaptive Building Iniziative in collaborazione con l'architetto del design, Yasuda Atelier e l'architetto Nikken Sekkei. La richiesta è stata fatta da POLA, un produttore giapponese di cosmetici. Il design è a pelle lucida e adattabile che simboleggia gli importanti concetti di "acqua" e "luce" nella vita umana. Il concetto di adattamento è ispirato ai concetti di impianto ed è integrato nella facciata a doppia pelle dell'edificio. La facciata dell'edificio consiste in 185 meccanismi di otturatori controllati individualmente, con dimensione da uno a tre metri. I pannelli sono realizzati con pannelli acrilici curvi e combinati con l'illuminazione a LED che può rendere l'edificio di vari colori, molto visibili di notte. Gli infissi sono controllati individualmente in modo motorizzato. La doppia pelle della facciata dell'edificio favorisce il sistema di ombreggiamento e consente una ventilazione naturale permettendo che l'aria più fredda entri nell'edificio durante la notte per ridurre il carico termico. Inoltre, massimizza la luce naturale che entra nell'edificio durante tutto l'anno e può far aumentare il guadagno solare in inverno.



## 13\_MILWAUKEE ART MUSEUM

<b>NOME</b>	Quadracci Pavilion
<b>LUOGO</b>	Milwaukee, Wisconsin, USA
<b>PROGETTISTA(I)</b>	Santiago Calatrava
<b>ANNO DI COSTRUZIONE</b>	2001
<b>FUNZIONE</b>	Museo
<b>TIPO DI INVOLUCRO</b>	Doppio involucro
<b>ESPOSIZIONE</b>	sud-nord
<b>FUNZIONE INVOLUCRO</b>	Termico (controllo solare)
<b>ZONA CLIMATICA</b>	Temperato
<b>CLASSIFICAZIONE</b>	Movimento: meccanico - rotazione
<b>DESCRIZIONE</b>	<p>Posizionato sopra l'atrio di vetro e acciaio del Quadracci Pavilion, questo involucro presenta due ali molto grandi, ciascuna composta da 36 pinne a tubo rettangolare in acciaio, di una larghezza di sezione costante di 330 mm e variabile in lunghezza, profondità e spessore. Ogni ala è sostenuta da una colonna vertebrale rotante a cui sono collegate tutte le pinne. Le due spine rotanti sono a loro volta supportate dalla colonna vertebrale dell'edificio e 11 coppie di attuatori idraulici ruotano le spine rotanti di 90 gradi per aprire o chiudere completamente la pelle. La più grande sfida nel design di questi brise-soleil dinamici è stata quella di dare risposta circa il comportamento della struttura esposta al carico del vento. Per prevederne gli effetti è stato condotto uno studio tramite un modello aerostatico scala 1:400 inserito in un tunnel del vento.</p>



## 14\_ISTITUTO DEL MONDO ARABO

<b>NOME</b>	Istituto del Mondo Arabo
<b>LUOGO</b>	Paris, Francia
<b>PROGETTISTA(I)</b>	Jean Nouvel, Gilbert Lèzenes, Pierre Soria
<b>ANNO DI COSTRUZIONE</b>	1987
<b>FUNZIONE</b>	Centro di ricerca e informazione sul mondo arabo
<b>PREMI</b>	Aga Khan Award for Architecture 1989, Equirre d'Argent for French architecture 1987
<b>TIPO DI INVOLUCRO</b>	Doppio involucro
<b>ESPOSIZIONE</b>	sud
<b>FUNZIONE INVOLUCRO</b>	Termico (controllo solare)
<b>ZONA CLIMATICA</b>	Moderato
<b>CLASSIFICAZIONE</b>	Movimento: meccanico - rotazione



**DESCRIZIONE**

Un complesso sistema di diaframmi mobili crea la distinzione tra i pannelli vetrati e l'interno dell'edificio sulla facciata sud. L'apertura e la chiusura dei diaframmi si ispira alle figure geometriche (mashrabiya) che provengono dalla cultura araba, già utilizzate per lungo tempo nella cultura araba per fornire privacy e protezione solare. La mobilità dei diaframmi si basa su una "rotazione in piano" che utilizza un sistema di controllo diretto locale. Il controllo è basato sull'uso di una serie di fotocellule sensibili alla luce. I diaframmi si aprono quando le celle (sensori fotosensibili) ricevono meno luce e si chiudono in caso opposto. La facciata sud dell'edificio è costituito da 30.000 diaframmi realizzati in acciaio. Il sistema è in grado di controllare la luce del sole che entra nell'edificio e può ridurre l'uso di energia della costruzione. Il progetto della facciata dell'Istituto del mondo arabo è stato un passo importante per l'evoluzione del design dei sistemi di schermatura solare. Tuttavia, il sistema ha presentato alcuni importanti svantaggi tra cui l'elevato numero di dispositivi meccanici da mantenere, tanto che oggi il sistema non funziona più.



## 15\_3D HOUSING 05

<b>NOME</b>	3D Housing 05
<b>LUOGO</b>	Milano
<b>PROGETTISTA(I)</b>	CLS Architetti con ARUP
<b>ANNO DI COSTRUZIONE</b>	2018
<b>FUNZIONE</b>	Residenza temporanea esposta al Salone del Mobile 2018
<b>PREMI</b>	Best Sustainability Milano Design Award 2018
<b>TIPO DI INVOLUCRO</b>	Portante
<b>ESPOSIZIONE</b>	Temperato
<b>FUNZIONE INVOLUCRO</b>	Tamponatura portante
<b>ZONA CLIMATICA</b>	Temperato
<b>CLASSIFICAZIONE</b>	Tamponatura portante



**DESCRIZIONE**

L'architetto Massimiliano Locatelli ha proposto, in occasione della Milano Design Week 2018, 3D Housing 05, il prototipo di una casa stampata in opera con una macchina 3D, primo esempio europeo del genere. Strutturalmente la casa è antisismica, le pareti stampate in cemento hanno al loro interno un'intercapedine atta ad allocare isolamento e impianti, e può essere ampliata in altezza e di dimensioni.



## 16\_TCB HADID TOWER

<b>NOME</b>	TCB Hadid Tower
<b>LUOGO</b>	Milano
<b>PROGETTISTA(I)</b>	Zaha Hadid
<b>ANNO DI COSTRUZIONE</b>	2018
<b>FUNZIONE</b>	Uffici, commerciale
<b>TIPO DI INVOLUCRO</b>	Curtain wall
<b>ESPOSIZIONE</b>	Tutte
<b>FUNZIONE INVOLUCRO</b>	Termico (controllo solare), flussi d'aria
<b>ZONA CLIMATICA</b>	Temperato
<b>CLASSIFICAZIONE</b>	Facciata ventilata



**DESCRIZIONE**

La pelle esterna segue la forma contorta dell'edificio e quindi richiede vetro piegato a freddo (piegato a caldo o vetro piegato a caldo se richiesto in aree di curvatura estrema) mentre la pelle interna segue una forma sfaccettata che si avvicina di più alla forma esterna che scorre. La facciata è concepita come una facciata a doppia pelle ventilata esternamente in cui la linea termica è impostata per seguire l'impostazione della linea di smaltatura interna. L'uso di una facciata a doppia pelle ventilata esternamente riduce il flusso di calore che altrimenti entrerebbe nell'edificio, mentre la pelle interna è progettata come un sistema di facciata da pavimento a pavimento che consente di realizzare tenute continue dal sistema di facciata alla lastra ad ogni livello e consente ai dettagli delle finiture della cavità di essere meno critici per il tempo e le prestazioni di vapore della facciata. La funzione di impostazione per la torre si traduce in una serie di complessità geometriche che sono state indirizzate come la forma irregolare dei pannelli esterni della pelle, la deformazione, l'offset tra facciata interna ed esterna varia sul piano e in altezza fino all'altezza dell'edificio.



## 17\_TORRE INTESA SAN PAOLO

<b>NOME</b>	Torre Intesa San Paolo
<b>LUOGO</b>	Torino
<b>PROGETTISTA(I)</b>	Renzo Piano Building Workshop
<b>ANNO DI COSTRUZIONE</b>	2015
<b>FUNZIONE</b>	Uffici
<b>TIPO DI INVOLUCRO</b>	Doppio involucro
<b>ESPOSIZIONE</b>	Termico (controllo solare)
<b>FUNZIONE INVOLUCRO</b>	Temperato
<b>ZONA CLIMATICA</b>	Movimento: meccanico - Ibrido
<b>CLASSIFICAZIONE</b>	Controllo: centralizzato
<b>DESCRIZIONE</b>	La facciata in vetro a doppia pelle consente di limitare la perdita di calore in inverno ed è controllata in relazione al calore immesso attraverso un sistema di aperture e schermi solari con alette motorizzate, che controllano l'irradiazione e l'illuminazione nelle aree di lavoro. In estate, l'aria fresca della notte viene convogliata all'interno attraverso le doppie lastre di cemento, assorbendone la freschezza e donandola negli uffici di giorno con l'aiuto di pannelli radianti. Il tutto è controllato da sonde collegate a un BMS tecnologicamente avanzato (Building Management System).



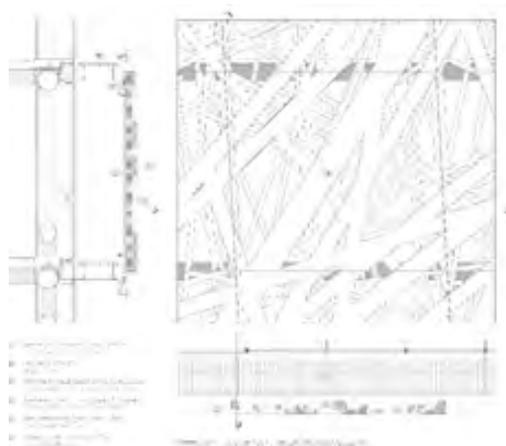
## 18\_PALAZZO ITALIA EXPO 2015

<b>NOME</b>	Palazzo Italia
<b>LUOGO</b>	Milano
<b>PROGETTISTA(I)</b>	Studio Nemesi
<b>ANNO DI COSTRUZIONE</b>	2015
<b>FUNZIONE</b>	Padiglione espositivo
<b>TIPO DI INVOLUCRO</b>	Curtain wall
<b>ESPOSIZIONE</b>	Tutte
<b>FUNZIONE INVOLUCRO</b>	Termico (isolamento) e fotocatalitico
<b>ZONA CLIMATICA</b>	Temperato
<b>CLASSIFICAZIONE</b>	Facciata fotocatalitica



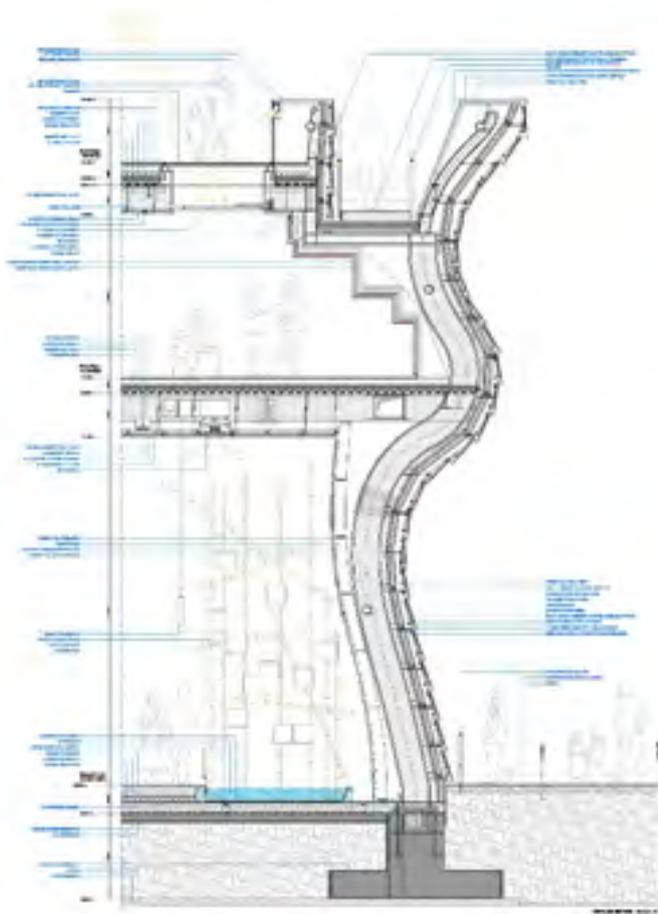
**DESCRIZIONE**

Con oltre 750 pannelli piani e curvi di cemento biodinamico il progetto architettonico dello studio Nemesi & Partners ha previsto la realizzazione di una struttura complessa, che richiama nel suo aspetto esteriore e in alcuni spazi interni le forme di una foresta ramificata. L'intera superficie esterna e parte degli interni sono costituiti da pannelli di cemento biodinamico i.active BIODYNAMIC, realizzati con tecnologia Styl-Comp. La componente "bio" è data dalle proprietà fotocatalitiche del nuovo cemento, ottenute grazie al principio attivo TX Active: a contatto con la luce del sole, il principio attivo presente nel materiale consente di "catturare" alcuni inquinanti presenti nell'aria, trasformandoli in sali inerti e contribuendo così a liberare l'atmosfera dallo smog. La malta, inoltre, prevede l'utilizzo per l'80% di aggregati riciclati, in parte provenienti dagli sfridi di lavorazione del marmo di Carrara, che conferiscono una brillantezza superiore ai cementi bianchi tradizionali. La "dinamicità" è invece una caratteristica propria del nuovo materiale, che presenta una fluidità tale da consentire la realizzazione di forme complesse come quelle che caratterizzano i pannelli di Palazzo Italia. Questo materiale presenta caratteristiche di lavorabilità e resistenza straordinarie se confrontato con le malte classiche. Ha una fluidità iniziale di tre volte maggiore (300 mm contro 100 mm) ed è due volte più resistente alla compressione (oltre 60 MPa a fronte di 30 MPa delle malte classiche) e due volte più resistente alla flessione (oltre 10 MPa a fronte di 5MPa delle malte classiche).



## 19\_PADIGLIONE VANKE EXPO 2015

<b>NOME</b>	Padiglione Vanke
<b>LUOGO</b>	Milano
<b>PROGETTISTA(I)</b>	Daniel Libeskind
<b>ANNO DI COSTRUZIONE</b>	2015
<b>FUNZIONE</b>	Padiglione espositivo
<b>TIPO DI INVOLUCRO</b>	Curtain wall
<b>ESPOSIZIONE</b>	Tutte
<b>FUNZIONE INVOLUCRO</b>	Termico (isolamento) e fotocatalico
<b>ZONA CLIMATICA</b>	Temperato
<b>CLASSIFICAZIONE</b>	Facciata fotocatalitica
<b>DESCRIZIONE</b>	<p>Il padiglione è rivestito da oltre 4.000 lastre metalliche rosse che Libeskind ha progettato con l'azienda italiana Casalgrande Padana. I pannelli geometrici in ceramica non solo creano uno schema espressivo evocativo di una pelle simile a un drago, ma possiedono anche proprietà autopulenti e purificanti dell'aria altamente sostenibili. La superficie tridimensionale è rivestita con una colorazione metallica che cambia con il variare della luce e dei punti di vista. Le lastre di rivestimento della facciata sono installate con un sistema di supporto all'avanguardia che fornisce un modello ritmico e una forma matematica a una forma flessibile.</p>



## 20\_SEDE CENTRALE ARCHIMEDE SOLAR SPA

<b>NOME</b>	Sede Centrale Archimede Solar Spa
<b>LUOGO</b>	Massamartana, Perugia
<b>PROGETTISTA(I)</b>	ARUP
<b>ANNO DI COSTRUZIONE</b>	2013
<b>FUNZIONE</b>	Uffici
<b>TIPO DI INVOLUCRO</b>	Curtain wall
<b>ESPOSIZIONE</b>	Facciata Sud
<b>FUNZIONE INVOLUCRO</b>	Termico (controllo e produzione solare)
<b>ZONA CLIMATICA</b>	Temperato
<b>CLASSIFICAZIONE</b>	Movimento: meccanico - Ibrido Controllo: centralizzato - diretto



<b>DESCRIZIONE</b>	<p>Arup ha sviluppato la progettazione delle strutture, coprendo anche gli aspetti specialistici come gli studi geotecnici e della progettazione della facciata. Arup ha stimato una riduzione complessiva di circa il 50% della domanda di energia termica durante l'estate e dell'80% circa durante l'inverno. Il consumo di calore ed energia primaria è stato ridotto rispettivamente del 60% e del 40%. Una struttura in acciaio e vetro a sud ospita una facciata integrata nel tetto, creando un buffer climatico tra l'interno e l'esterno con l'aiuto del riscaldamento naturale in inverno. La luce solare da sud è massimizzata e un innovativo sistema di raffreddamento ad aria sfrutta lo scambio di calore con il terreno in estate. L'edificio comprende un impianto fotovoltaico e l'uso di biomassa in un impianto di cogenerazione. Questi sistemi contribuiscono alla riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>, stimata a 93 t/anno. Il consumo totale annuo di energia per riscaldamento, ventilazione e acqua calda sanitaria è 3,8 kWh / m<sup>3</sup>.</p>
--------------------	---





## 4 - IL PROCESSO PROGETTUALE DEL SISTEMA DI FACCIATA

### 4.1 - Il Prototipo Digitale di un involucro edilizio

Col progredire dell'apporto scientifico ci si è scontrati con paradigmi spesso antitetici quali progetto contro prodotto, architettura contro costruzione, teoria contro tecnica. Le facciate in questa contrapposizione ideologica devono innegabilmente fare i conti da un lato con una crescente customizzazione estetica e prestazionale che necessita competenze culturali e tecniche sempre più specialistiche, dall'altro con la consueta serialità delle aziende produttrici, sempre attenta al tornaconto del profitto.

Al di là delle ricorrenti contrapposizioni, ampiamente dibattute nella storia dell'architettura intesa come arte del costruire, oggi tutte le parti coinvolte, dall'ideazione del concetto al suo concretarsi, vedono opportunità comuni di dialogo verso gli obiettivi della transizione ecologica e digitale.

Il nesso strategico che li accomuna e che oggi si propone come strumento risolutore è la tecnologia. Secondo la definizione di Maria Voyatzaki<sup>1</sup> *"la tecnologia è spesso confusa con la tecnica e la cosa tecnica (Rahim 2006) sia quando riguarda la macchina come un mezzo con cui la cosa tecnica (l'artefatto) viene prodotto attraverso la tecnica, sia quando riguarda l'artefatto in sé come entità materiale, come materialità. La tecnica oggi riguarda sia l'evoluzione dell'immateriale (programmare, costruire software), sia l'infrastruttura materiale (hardware) della tecnologia, al fine di produrre l'artefatto, primariamente nel tentativo di materializzare un intento."*

Pertanto la tecnologia si afferma in senso lato come un insieme di competenze scientifiche applicate ai processi industriali di trasformazione, capace di spostare avanti il grado di innovazione della materia dimostrandone preventivamente gli effetti all'interno dell'ambiente costruito.

La quarta rivoluzione industriale nella quale oggi ci troviamo rappresenta la combinazione di sistemi cyber-fisici di Big Data, superando i principi perseguiti

<sup>1</sup> Associate professor of architectural design and technology at the School of Architecture of Aristotle, University of Thessaloniki, Greece

con l'era della terza rivoluzione, caratterizzati dalle scoperte sul computer e sull'archiviazione dei dati sempre più a portata di mano.

Qualsiasi sia la diversa configurazione sistemica e materica, la facciata negli



### Navigating the next industrial revolution

Revolution	Year	Information	
	1	1784	Steam, water, mechanical production equipment
	2	1870	Division of labour, electricity, mass production
	3	1969	Electronics, IT, automated production
	4	?	Cyber-physical systems

ARUP (2019), *Digital twin*

ultimi anni risulta una membrana complessa attraverso cui si afferma la qualità osmotica di un processo di scambio di flussi energetici<sup>2</sup> e attraverso cui garantire una somma di prestazioni che vanno dall'uso energetico al comfort termico e visivo, dalle prestazioni strutturali-meccaniche alla durabilità. Questi diversi aspetti sono sottoposti durante la fase progettuale ad analisi di dettaglio dei nodi più critici, e ancora prima a indagini preliminari che guidano le soluzioni e concorrono al raggiungimento delle diverse ipotesi di realizzazione.

In questo senso, l'ausilio indiscutibile che l'innovazione tecnologica maturata fino ad oggi contribuisce a dare agli involucri edilizi colpisce orizzontalmente tutte le fasi di realizzazione del suo sistema e delle sue singole componenti, dalla fase di progettazione con la prototipazione e la customizzazione, alla produzione e al testing avanzato e prima della certificazione finale.

Durante la fase di indirizzo progettuale, la necessità dell'analisi prestazionale degli involucri edilizi ha accelerato un crescente interesse nello sviluppo e nell'utilizzo di strumenti informatici utili a definire forme geometriche plastiche, algoritmiche e parametriche, quindi controllabili in fase esecutiva, differenziate

<sup>2</sup> S. Altomonte, *L'involucro architettonico come interfaccia dinamica: strumenti e criteri operativi per un involucro architettonico bioclimatico e sostenibile*. 2005 Firenze, Editrice Alinea.

all'interno di uno stesso edificio. Basti pensare alle controverse situazioni riscontrabili a diverse quote in una facciata di un edificio di altezza significativa. Il cambiamento epocale della quarta rivoluzione industriale interessa l'edificio in tutte le sue componenti e impegna in particolar modo il mondo della ricerca scientifica in nuove strategie di controllo e simulazioni delle prestazioni attese. Nuove discipline come il Building Information Modelling (BIM) e il Building Performance Simulation (BPS) si fanno sempre più spazio nel processo decisionale di supporto a quello della progettazione di edifici sempre più complessi, in cui l'involucro edilizio gioca un ruolo determinante nell'ottimizzazione dell'apporto energetico naturale e di una conseguente riduzione del consumo energetico globale dell'edificio derivante da combustibili fossili.

Considerate le elevate performance cui oggi la facciata deve rispondere, avanza il ricorso a studi specialistici di settore sulla Facade Engineering, materia che indaga la facciata come entità attiva e dinamica. In tal senso questo innovativo segmento di settore viene inteso come "una disciplina relativamente nuova, che sta acquisendo importanza in un tempo in cui recessione e cambiamento climatico sono fattori che portano a una maggiore attenzione sulla necessità di un approccio integrato alla progettazione e al valore degli edifici".<sup>3</sup>

Con l'avanzare dell'elaborazione di involucri complessi da realizzare, l'Intelligenza Artificiale applicata nel settore dell'architettura conta l'esigenza di mitigare l'imprevedibile e l'indesiderabile<sup>4</sup>, riproducendo un Digital Twin quanto più simile a quello da produrre. Il concetto di Digital Twin, seppur oggi prestato ad altri settori, è stato introdotto nel 2003 da Micheal Grieves e ripreso successivamente per recenti ricerche su aerei da caccia di nuova generazione e veicoli della NASA, Grieves asserì che il flusso di informazioni riferito allo spazio reale fisico poteva essere confrontato e collegato ad uno spazio virtuale parallelo contenente tutti i dati del sistema fisico<sup>5</sup>. A tal proposito i due sistemi avrebbero perciò una rappresentazione reciproca e dinamica durante l'intero ciclo di vita nelle quattro fasi di creazione, produzione, funzionamento e smaltimento. Alla base del suo studio venivano distinti 3 sottosistemi del sistema virtuale:

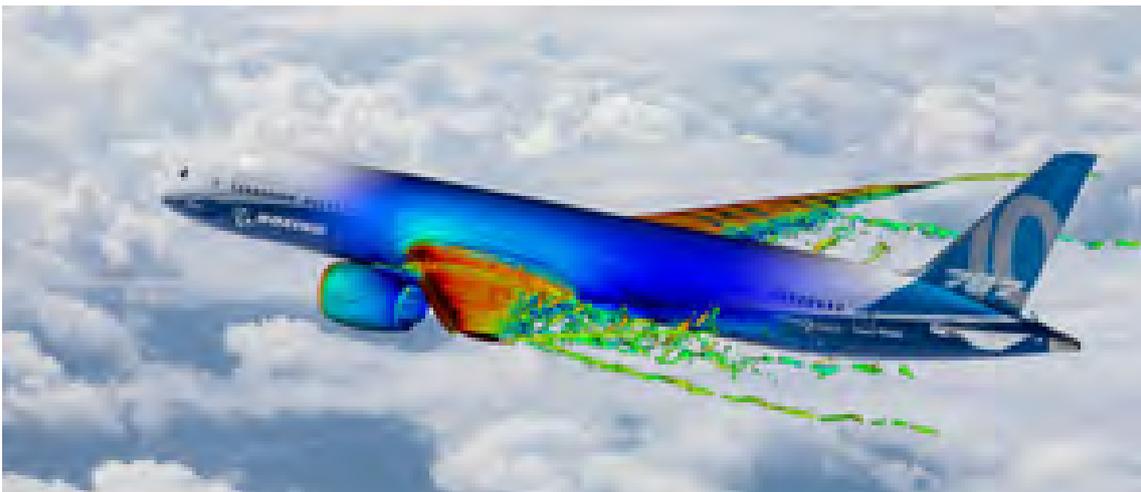
3 Kragh, M., 2010. *Façade engineering and building physics, High performance-low impact. Ingegneria in vetro, Ropemaker Place, Londra, Regno Unito, pagg: 53-59*

4 M. Grieves e J. Vickers. *Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems, 2017*

5 Tuegel, Ingraffea et al. 2011, *Reengineering Aircraft Structural Life Prediction Using a Digital Twin. International Journal of Aerospace Engineering, 2011*



*I fratelli Wilbur e Orville Wright. Sperimentazioni sul loro aliante del 1902*



*Simulazioni CFD condotte da BCA Engineering - Boeing Commercial Airplanes. 15 ottobre 2019, Royal Aeronautical Society Conference on the Aerodynamics Tools and Methods in Aircraft Design*

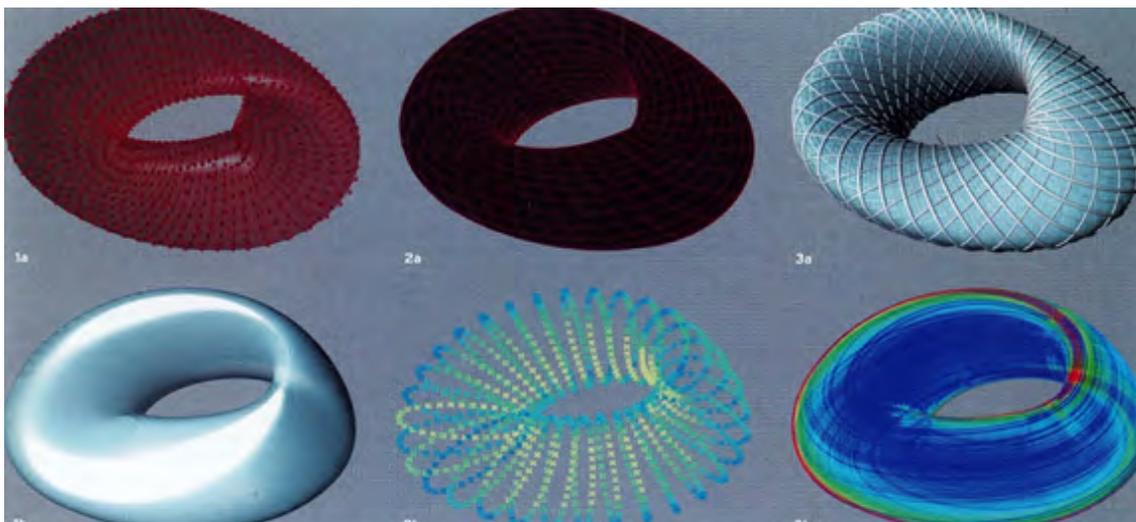
- il Digital Twin Prototype (DTP), corrispondente al prototipo fisico del manufatto e contenente tutte le informazioni materiche e di base del modello.
- Il Digital Twin Instance (DTI), rappresentazione dei processi informativi e operativi del modello nella sua storia. Questo modello contiene le informazioni in uno stato dinamico, costantemente testate durante il loro utilizzo nel tempo mediante sensori.
- Il Digital Twin Aggregate (DTA), somma aggregata di più DTI, che analizza in forma sistemica tutte le informazioni estrapolate dai sensori e consente la continua predizione delle interferenze.

Il Digital Twin Environment (DTE), spazio multi-dominio che incrocia tutti dati riguardanti il modello in termini interrogativi collegando ad esempio quelli dei sensori ai fallimenti dei risultati attesi sul modello con un avviso, ed in termini predittivi con gli effetti e i feedback del modello as-built.

Il Digital Twin Prototype (DTP) è quindi definito come un modello informatizzato, e per quanto attiene il campo dell'architettura e dei processi che la guidano si presenta senza dubbio come alter ego del Digital Mock-Up (DMU), che le ultime sperimentazioni vogliono rivestire di autonomo intelletto e apprendimento. In chiave futura infatti, la reale utilità degli involucri e della loro alta efficienza va ricercata nell'essere parti di un'intelligenza più ampia, che li vede protagonisti della ricezione di dati e della loro condivisione ad ampia scala urbana.

## 4.2 - Le fasi di prototipazione di un mock-up digitale

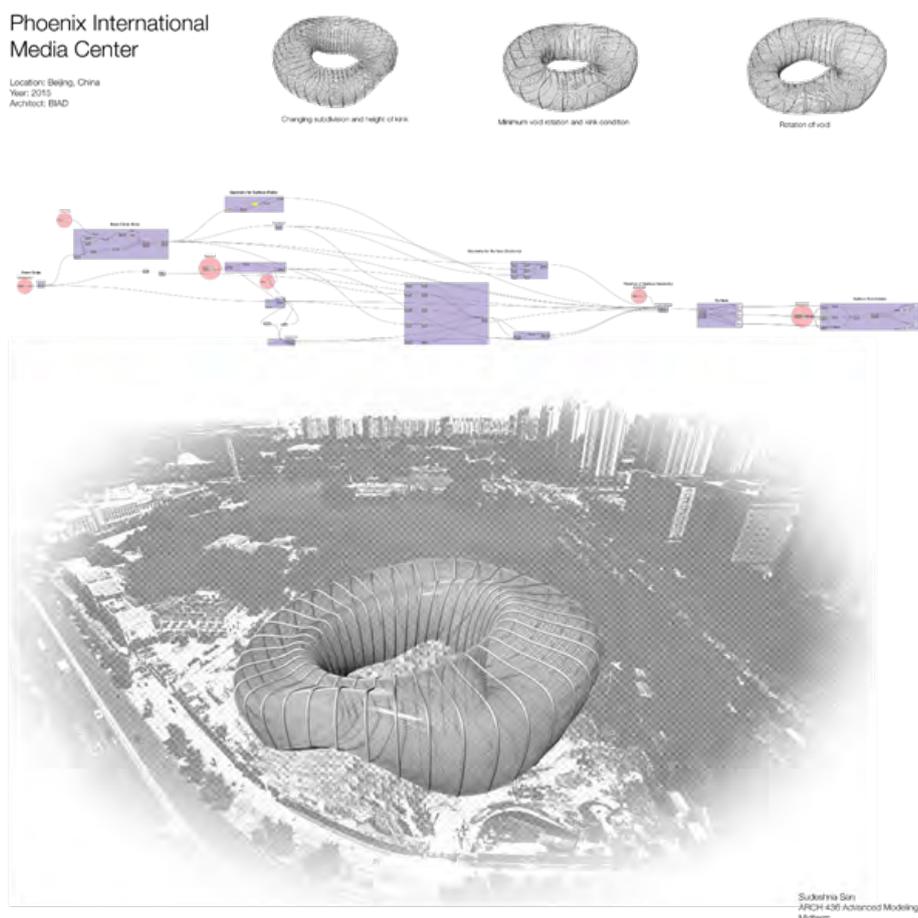
E' interessante sottolineare che il processo di ingegnerizzazione di una facciata sta oggi causando una sconnessione tra l'innovazione del progetto, sempre più orientata a farne oggetto dinamico nello spazio e nel tempo, e il settore della produzione, che viene richiamato a rivedere le sue strategie di fabbricazione, verifiche e certificazione dei propri prodotti. In questa chiave le aziende produttrici hanno intensificato i rapporti di consulenza e ricerca con società leader in campo Facade Engineering, mettendo a fuoco gli studi provenienti da settori profondamente lontani, proponendo analisi e verifiche di processo su Digital Mock-Up (DMU) mediante software opportunamente sviluppati. Volendosi soffermare sulla prototipazione virtuale quale modello per il controllo e l'analisi dei processi di verifica prestazionale dell'involucro edilizio, il processo progettuale che porta allo sviluppo di un mock-up digitale si evolve in distinte fasi, comunque tra loro interconnesse:



*Studi sulla forma per l'involucro del Phoenix International Media Center di Beijing in Cina mediante software di modellazione parametrica. Immagine tratta da Arketipo n.121/2018*

- Studi preliminari: modellazione di masse (volumi) ed analisi del corretto inserimento nell'ambiente costruito

In questa fase si procede allo studio morfologico ricreando il sito di progetto in realtà virtuale e valutando le ricadute in termini energetici sul modello semplificato. Software come Grasshopper, abbinati a CAD come Rhinoceros e Revit favoriscono la progettazione generativa di facciate mediante sequenze di algoritmi basati su trasformazioni logiche progressive non lineari, finalizzate a quella performance di qualità che viene attribuita al progetto. La modellazione numerica ad elementi finiti consente a tal fine un rapido sviluppo di prototipi virtuali utili nella previsione di aspetti di primo piano nella progettazione di un involucro, quali, a titolo di esempio, la sua esposizione ottimale all'interno dell'ambiente circostante, la scelta del sistema costruttivo, il comfort interno all'edificio.

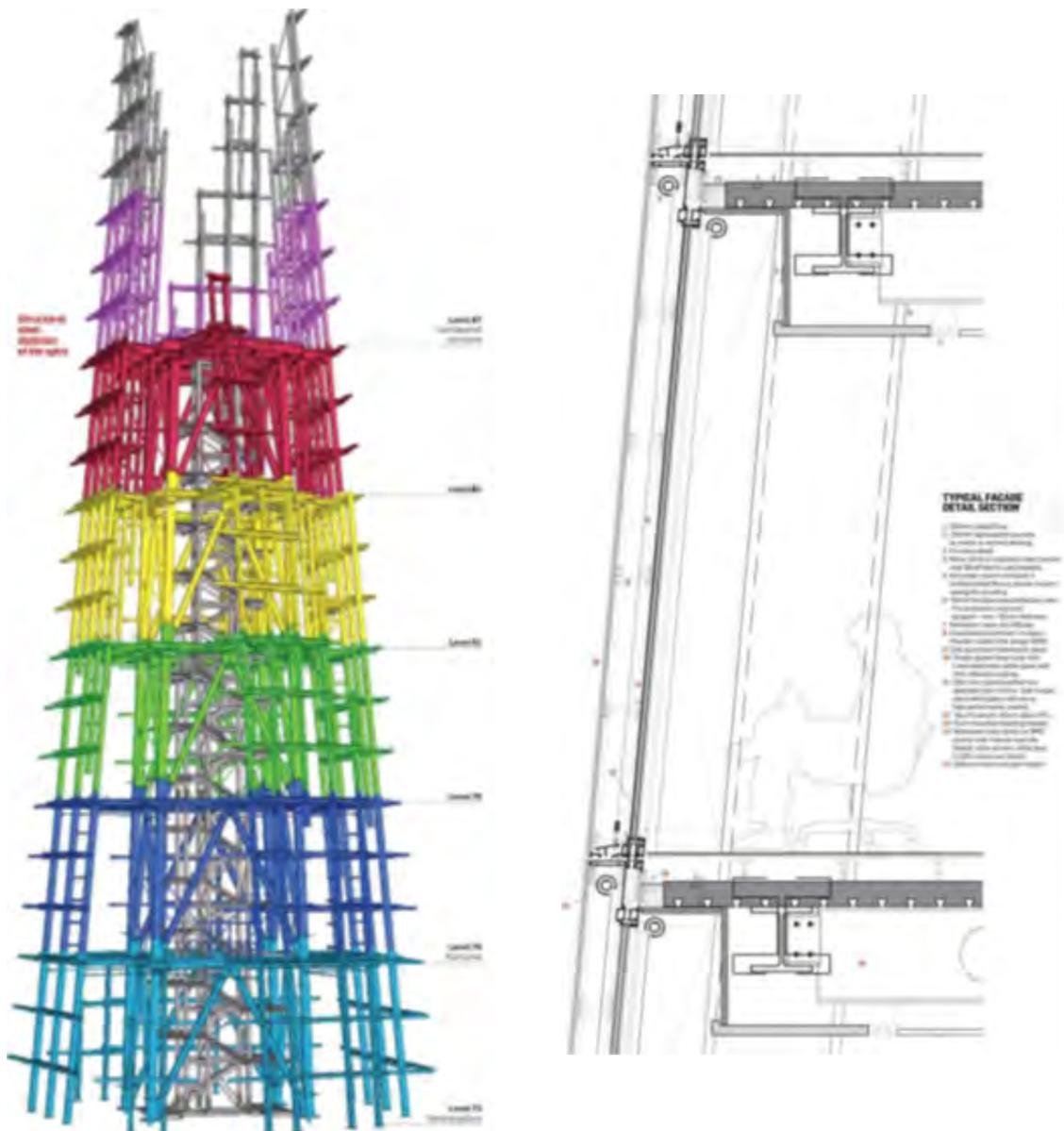


*Prime impostazioni del modello parametrico per l'involucro del Phoenix International Media Center di Beijing in Cina. Immagine tratta da Arketipo n.121/2018*

- Caratterizzazione del sistema di involucro

Dai primi studi del concept si passa alla traduzione esecutiva del progetto, progettando il sistema costruttivo più prestante, "ingegnerizzando" le componenti sulla scorta delle prestazioni preliminarmente individuate.

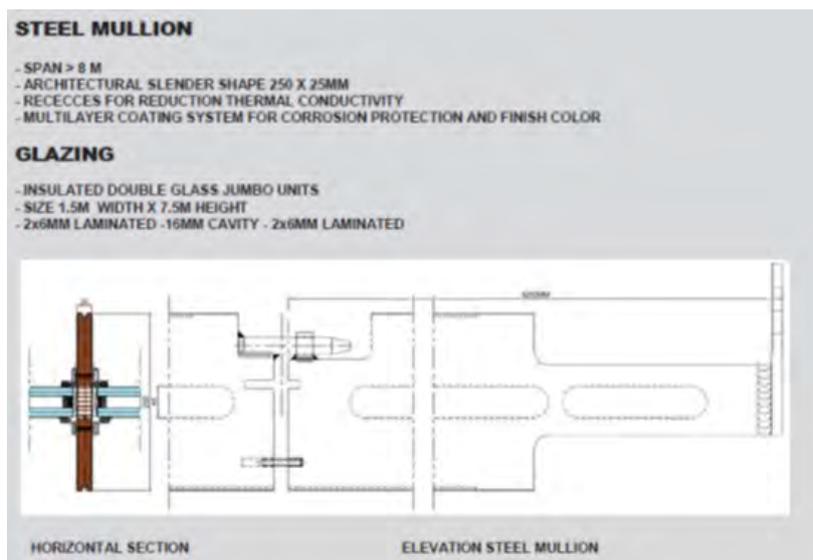
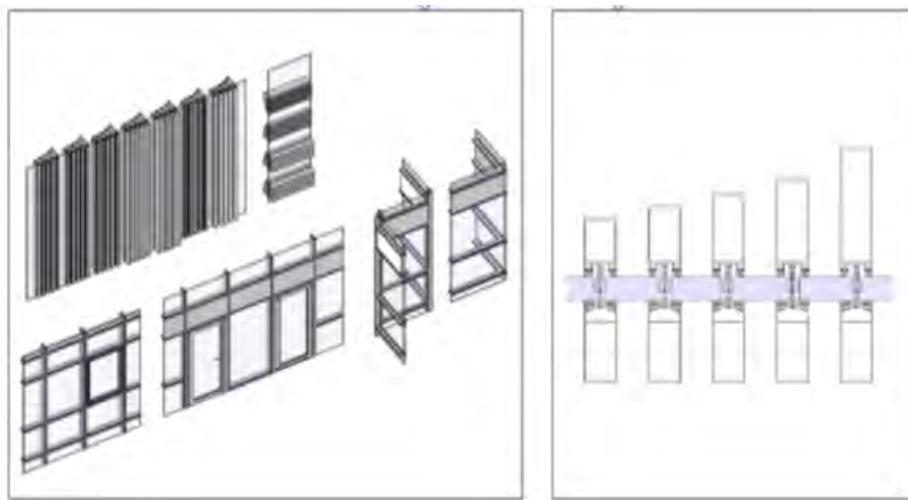
Carichi del vento, design sottile del telaio, movimenti e tolleranze ammesse, vengono ripartite sotto forma di parametri in soluzioni differenziate rispetto a esposizione solare e layout distributivo interno.



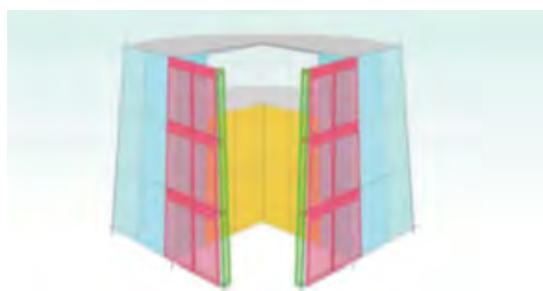
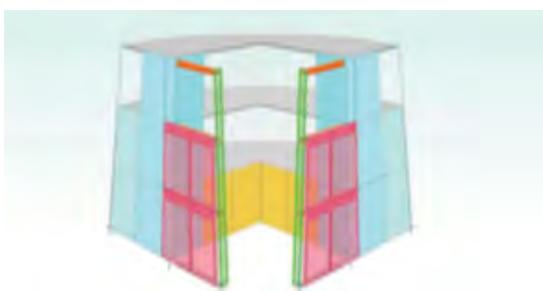
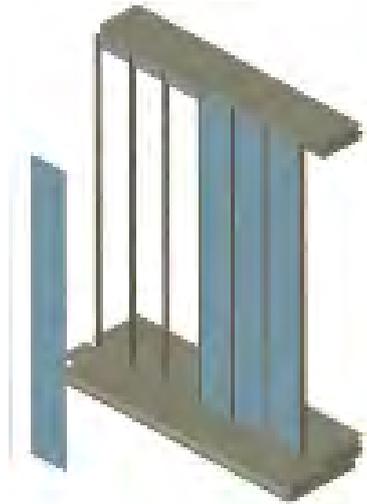
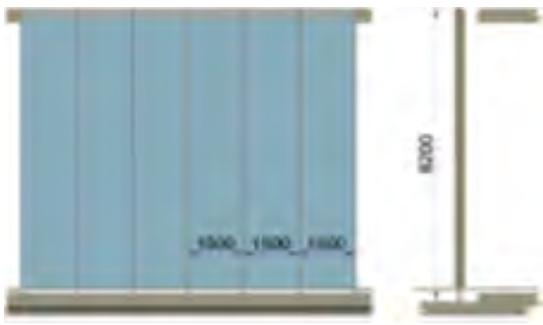
*The Shard at London Bridge. Structure Case Study by L. Tijerina, A. Silvas et al. 2016*

- Modellazione dell'involucro ad adeguato LOD - Level Of Detail/ Development

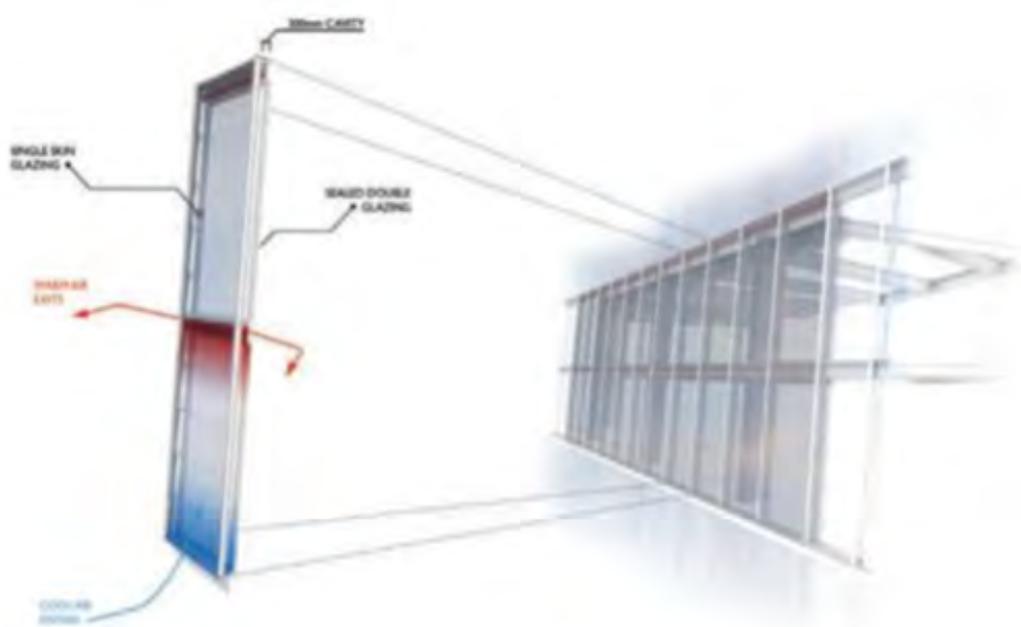
In questa fase il modello virtuale viene arricchito delle informazioni che riguardano tutte le componenti del sistema. Vengono così inserite le proprietà fisiche e prestazionali dei diversi strati: telaio, distanziatori, partizione vetrata, sigillanti, eventuale schermatura. Tra le principali si evidenziano caratteristiche di resistenza meccanica, valori trasmittanza termica del telaio  $U_f(W/m^2K)$  e del vetro  $U_g(W/m^2K)$ , qualità dell'aria, costi, controllo flusso luminoso e acustico.



*The Shard at London Bridge. Structure Case Study by L. Tijerina, A. Silvas et al. 2016*



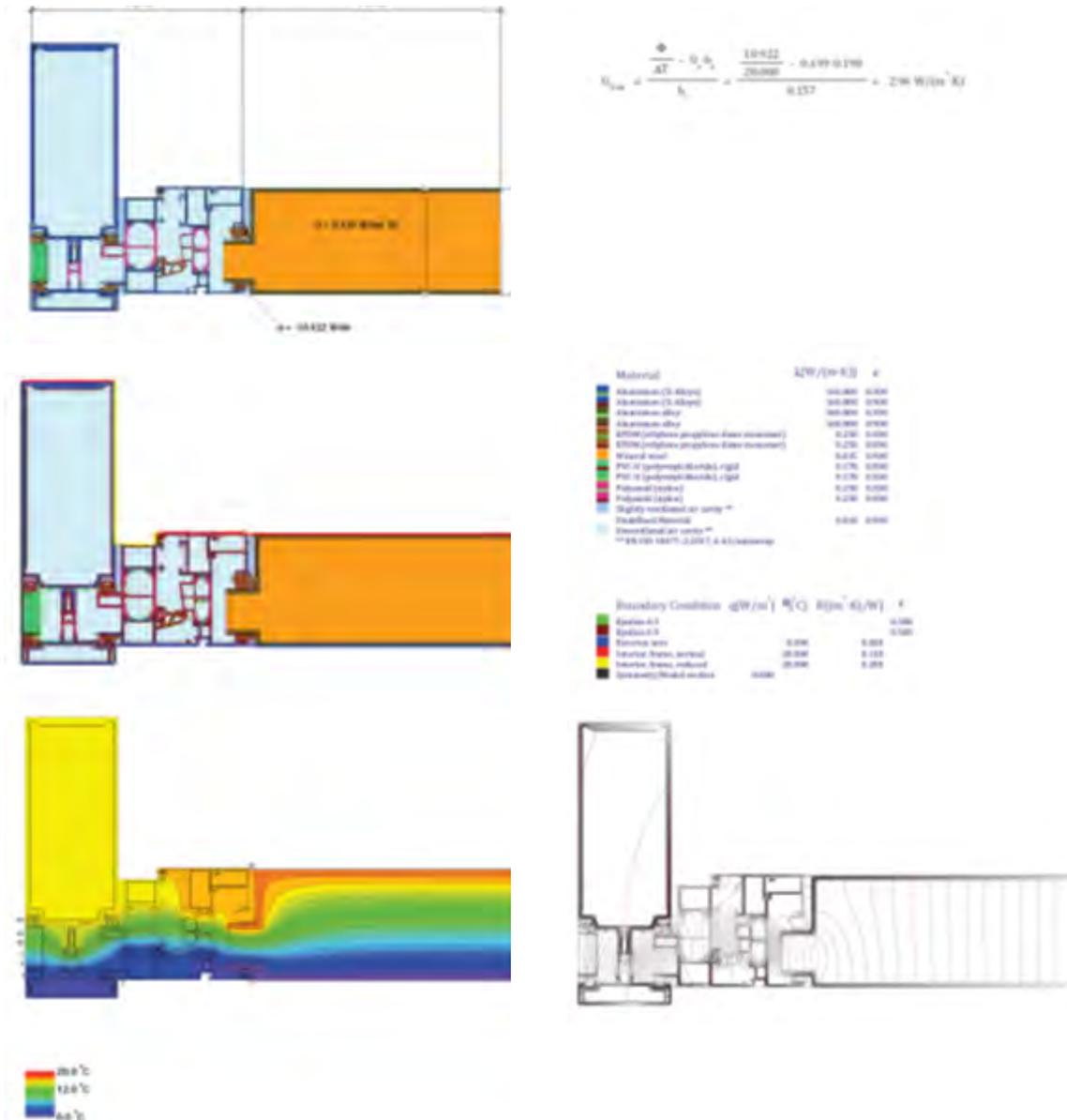
*The Shard of London. A. Mirzada per Scheldebouw, 2012*



*The Shard at London Bridge. Structure Case Study by L. Tijerina, A. Silvas et al. 2016*

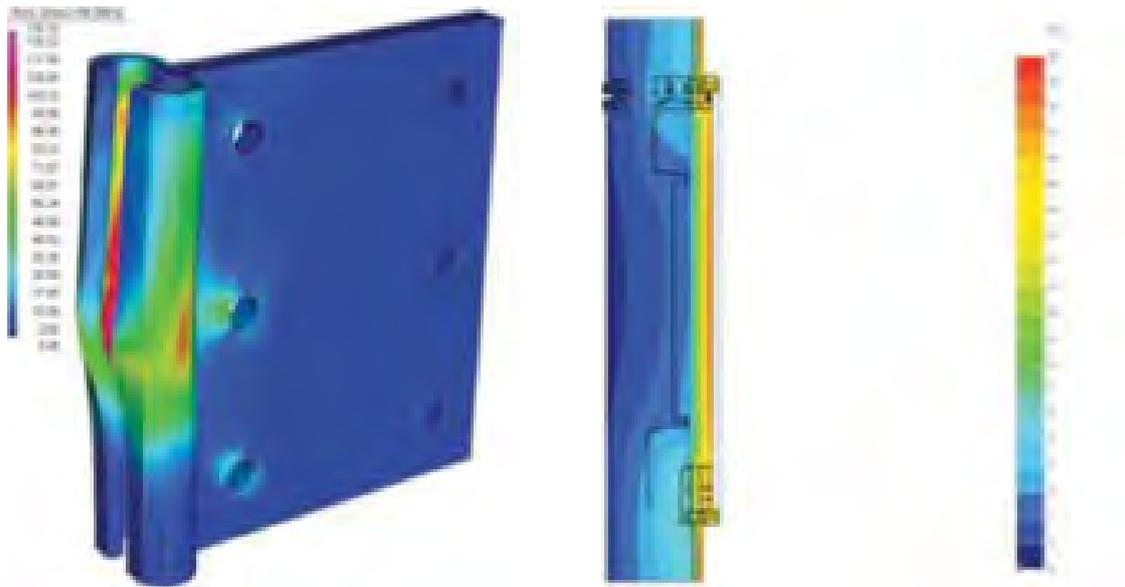
- Simulazioni dei valori prestazionali sul mock-up digitale

Vengono eseguite sul modello virtuale verifiche di calcolo sia nel dettaglio dei nodi critici, sia nella loro relazione sistemica, con riscontro ai carichi del vento e deformazioni, permeabilità all'aria, calcolo termico della trasmittanza e riduzione dei ponti termici, resistenza ad acque a vapore, isolamento acustico, resistenza al fuoco, comfort visivo.



Thermal performance calculation. Facade Engineering and analysis. C. Norton.

<https://www.feaservices.co.uk>



*The Shard of London. A. Mirzada per Scheldebouw, 2012*

La novità che investe negli ultimi anni questa specifica fase è la necessità di affinare sempre più le verifiche di un involucro nel suo tempo di utilizzo, di studiare perciò le sue prestazioni in condizioni variabili. Ciò risulta estremamente complicato perché si tratta di analizzare la facciata non più come filtro statico, separatore tra ambiente esterno ed interno, ma di condurre analisi progettuali di corpi adattivi, mutevoli, cinetici, in condizioni al contorno altrettanto dinamiche e dissimili nel fattore tempo.

## 5 - LA FLUIDODINAMICA COMPUTAZIONALE - *Computational Fluid Dynamics*

### 5.1 - Applicazione della fluidodinamica alla progettazione architettonica

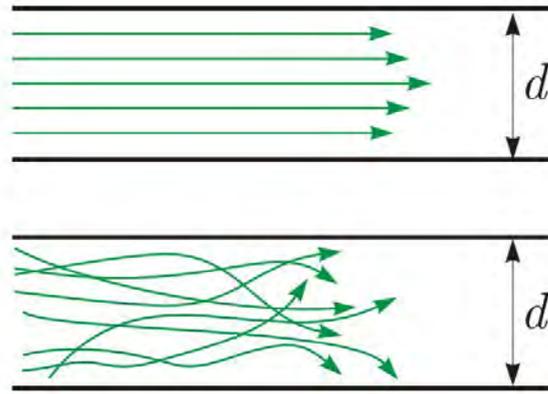
I principi fisici che stanno dietro la dinamica di un fluido, e che in questa fase è opportuno richiamare, consentono di comprendere gli sforzi agenti su ogni punto della massa di cui è costituito e determinarne la velocità puntuale in funzione del tempo. La prima distinzione che possiamo valutare nelle caratteristiche di un fluido è quella della sua incomprimibilità/comprimibilità, cioè la capacità di lasciarsi "schiacciare" in funzione della propria densità. In linea generale, quando una massa di volume del fluido è costante, anche nel caso di gas, i fluidi possono considerarsi comprimibili.



*Esempi di comprimibilità dei fluidi all'interno di una siringa piena d'acqua e d'aria.*

Altra caratteristica possibile dei fluidi è la loro viscosità, la loro resistenza interna chiamata attrito che ne ostacola il moto.

I moti quindi, a seconda delle caratteristiche di viscosità del fluido, si dividono in regime di flusso laminare e turbolento. Il flusso laminare, in occasione di fenomeni contraddistinti da viscosità, si muove come su delle lamine parallele, non prevedendo mescolamento. Il flusso turbolento invece, per effetto della velocità maggiore alla forza di attrito, genera dei vortici di flusso disordinati, causandone una perdita di energia.



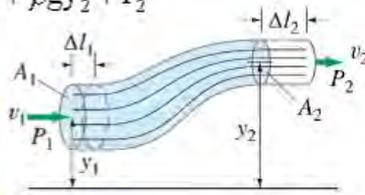
Flusso laminare e flusso turbolento . Schemi di distribuzione

Prendendo in esame i moti d'aria, questi sono sempre indotti da differenza di pressioni, anche in caso di assenza di temperatura e a seconda della densità del fluido attraversato.

Pressioni, densità e velocità del fluido considerato, in condizioni di incomprimibilità e non viscosità dello stesso, quindi di un fluido definito ideale, sono messe in relazione tra loro dal teorema di Bernoulli, derivante dalla legge di conservazione della quantità di moto:

$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g y_1 + P_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g y_2 + P_2$$

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g y + P = \text{costante}$$



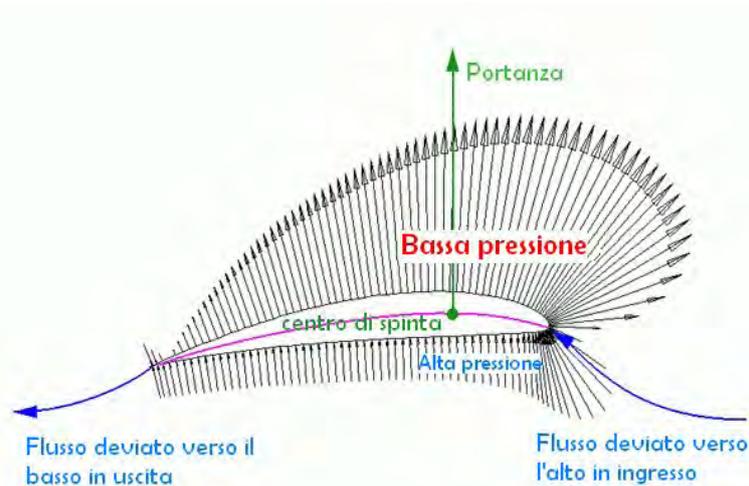
Dove

- p è la pressione [Pa]
- ρ è la densità (costante) del fluido [kg/m<sup>3</sup>]
- v è la velocità ad una determinata altezza h [m/s]
- g è l'accelerazione di gravità

Il teorema afferma che la somma delle componenti Velocità (v), Pressione (p), ad una determinata quota (h), si conserva e rimane costante. Altra considerazione derivante da questa equazione è che è al diminuire della pressione, corrisponderà un aumento del contributo in termini di velocità e quindi di energia cinetica.

Alla base di questo principio, vi è il caso ad esempio di differenze di pressioni

in occasioni di uragani dove la forte velocità del vento e la bassa pressione all'interno delle case provoca un innalzamento della velocità all'interno verso l'alto tale da scoperchiarne i tetti.

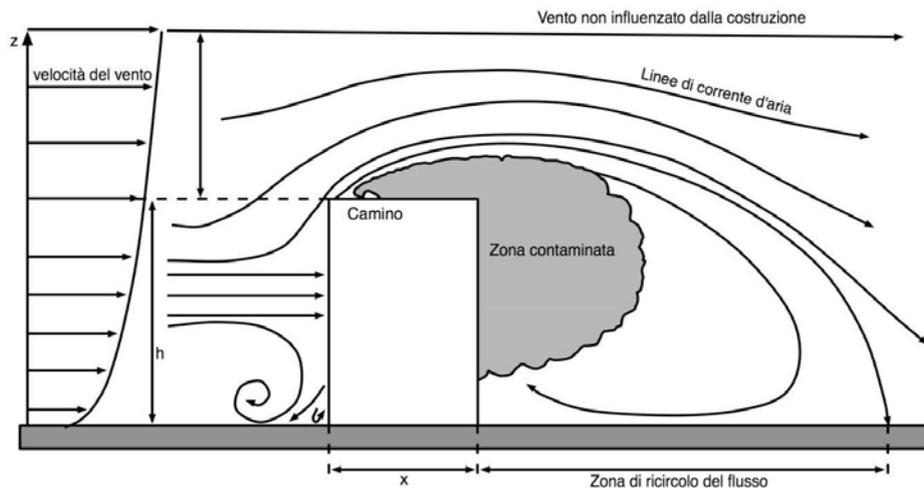


Vettori di pressione e flusso d'aria attorno a un profilo ala e. <https://it.quora.com/>



Tetto di un'abitazione scoperchiato durante un tornado in Lussemburgo nell'agosto del 2019.

Soffermandosi specificatamente sull'azione del vento agente sugli edifici, il moto d'aria è fortemente condizionato dalla forma e dalla presenza nell'ambiente circostante di fattori interferenziali, quali altri edifici, vegetazione fitta, situazioni orografiche varie. Questi fattori rappresentano la rugosità del suolo che è un coefficiente crescente rispetto alla presenza di ostacoli. In assenza di suoli lisci infatti diminuisce la forza di attrito sul suolo e aumenta la velocità verso l'alto.



Il moto d'aria normale all'edificio genera delle zone di maggiore pressione sulla superficie della facciata (superficie sopravvento) e un abbattimento sulla parte retrostante (superficie sottovento), con un flusso accelerato in corrispondenza degli spigoli e del rimbalzo sul suolo creando ricircoli tanto davanti la parte dell'edificio esposta, quanto nella zona retrostante. La pressione impressa sulla superficie sopravvento e quella sulla sottovento, in occasione di aperture predisposte, avvantaggerà il cosiddetto effetto camino all'interno dell'edificio. La pressione al centro della parete sottovento, vista l' assenza di ostacoli quindi di una pressione incontrastata risulterà risolvibile mediante l'equazione di Bernoulli su indicata. Allontanandosi dal centro della parete in corrispondenza del suolo e degli spigoli, sarà necessario introdurre all'equazione il coefficiente di pressione in funzione del punto preciso misurato nelle tre direzioni.

$$\Delta p = \frac{1}{2} \cdot C_p(x, y, z) \cdot \rho \cdot v^2$$

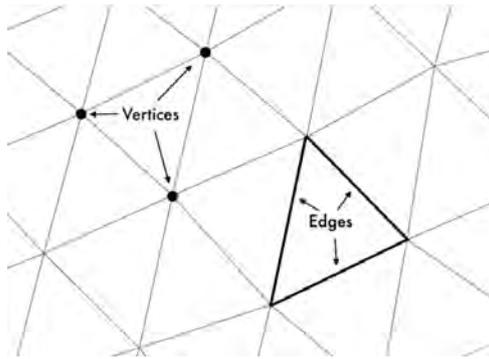
Ciò implica che per misurare in maniera accurata l'effettiva pressione agente su un edificio, occorre necessariamente simularne gli effetti in un tunnel del vento, allo stato attuale utilizzato principalmente per prove di progetti aeromobilistici e aerospaziali dai costi elevati. In Italia si conta una sola galleria del vento presso il Politecnico di Milano dove effettuare test su modelli in scala reale e ridotta. Un metodo alternativo, agevolato dall'evoluzione dei calcolatori e dei software di calcolo, è quello di sfruttare il metodo computazionale CFD.



Studi di gorghi d'acqua. Leonardo Da Vinci, 1508-1510

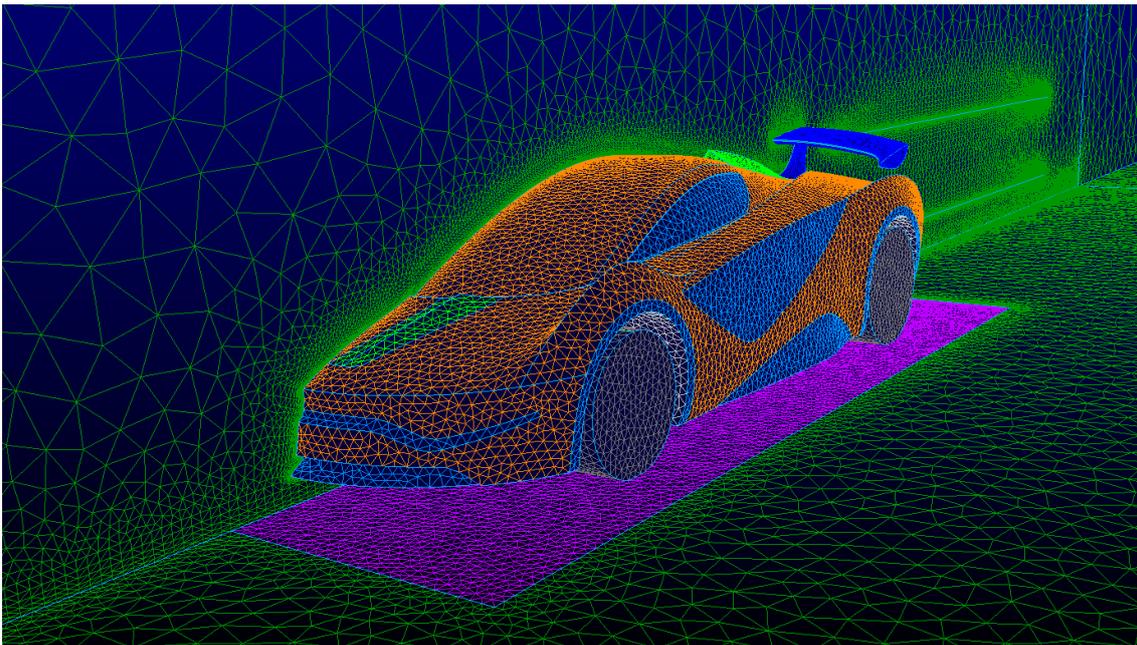
A lato: Tappe significative nello studio della fluidodinamica La fluidodinamica in architettura. V. Cecafofso, 2017

17° sec.	Invenzione del barometro e dell'anemometro
18° sec.	Studio della fluidodinamica, teorie di Bernoulli ed Eulero
1821	Pubblicazione delle equazioni di governo del fluido di Navier
1845	Pubblicazione delle teorie sulla frizione inerziale nel moto dei fluidi
1893	Costruzione della prima galleria del vento da parte di Irminger
1895	Viene fondata "American Society of Heating & Ventilation Engineers (ASHEVE)
1919	La ASHAVE definisce il diagramma di comfort che ne quantifica i determinanti ambientali
1938	Rathdun effettua misurazioni in scala dell'Empire State Building
1947	Kopal usò per primo le equazioni di Navier-Stokes ed uno dei primi computer per compilare tabelle di flusso d'aria
1951	James B. Dick enuncia i principi chiave dell'analisi macroscopica dei flussi d'aria
1954	ASHAVE cambia il nome in American Society of Heating & Air Condition Engineers (ASHAE)
1959	L'ASHAE diventa "American Society of Heating & Air Condition Engineer" (ASHARE)
1963	Baines e Vickery pubblicano i risultati di studi relativi alle pressioni sulle facciate degli edifici e alle caratteristiche del flusso intorno agli edifici, e sviluppano la galleria del vento a strato limite
1963	Prima conferenza internazionale sugli effetti del vento sull'edificio e sulle strutture a Teddington, Inghilterra
1970-80	Introduzione dei modelli multizona
1973	ASHARE propone la modifica dei primi codici sulla ventilazione pubblicando Standard 62-73 per la ventilazione naturale e meccanica
1973	Il dipartimento di energia sviluppa le procedure di calcolo per il consumo energetico
1976	US Army Construction Engineering Research Laboratory sviluppa BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics)
1978	Lawrence Berkeley National Laboratory sviluppa DOE-2 un programma di analisi energetici
1980-90	Modelli multizona sono sviluppati e utilizzati come strumento di ricerca e di progetto per la distribuzione dell'aria, il controllo del fumo, ecc.



*A lato: Mesh triangolari*

*<https://knowledge.autodesk.com/>*



*Meshing di un'automobile da corsa da sottoporre a calcolo CFD.*

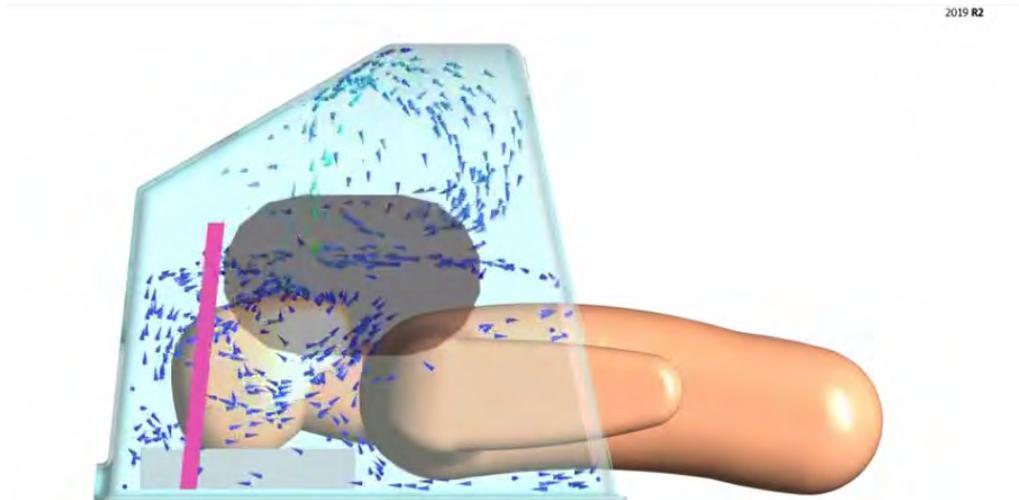
*<https://www.cfd-online.com/>*

La Fluidodinamica Computazionale - CFD Computational Fluid Dynamics, è la scienza che studia il comportamento dei fluidi basata su regole algoritmiche e complesse equazioni differenziali risolte mediante l'utilizzo del computer.

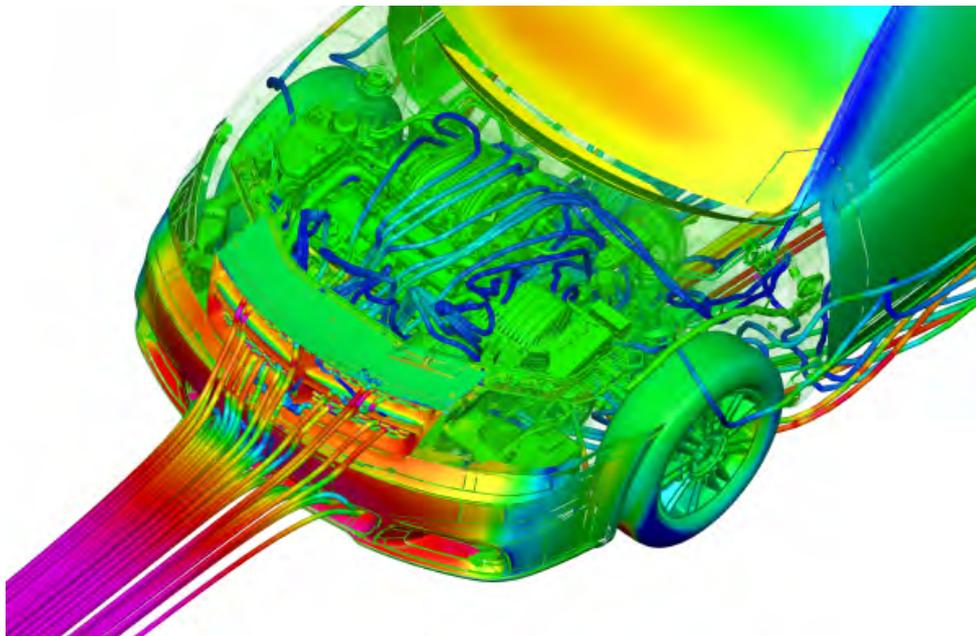
Alla base della fluidodinamica vi è un sistema matematico di equazioni alle derivate parziali condotto nel 1821 da Claude-Louis Navier e George Stokes sulla meccanica dei fluidi viscosi.

La modellazione della turbolenza ed il calcolo delle equazioni di bilancio studiate dalle equazioni differenziali alle derivate parziali di Navier-Stokes vengono oggi semplificati e agevolati dal metodo dei volumi finiti che attraverso potenti processori di calcolo risolvono il calcolo in metodi numerici parzializzando in mesh l'elemento indagato. Il campo di applicazione attuale dell'approccio CFD è ampio: dalle simulazioni nel campo della progettazione

ingegneristica aerospaziale, navale e automobilistica a quelle in campo medico per quanto concerne flussi sanguigni e flussi d'aria nei polmoni, fino all'ausilio nella progettazione di sistemi e soluzioni artificiali per la scienza biomedica. Nel campo delle infrastrutture il CFD contribuisce a valutare gli effetti delle correnti meteomarine o di potenti venti e perciò ne favorisce notevolmente la progettazione.



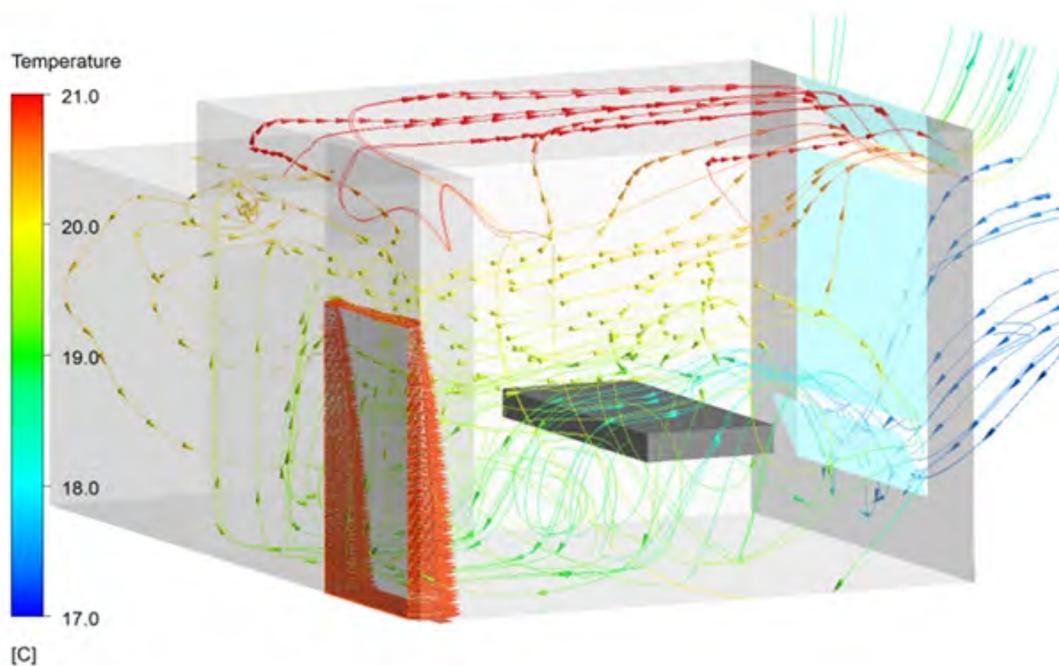
*Studi CFD di ARUP per valutare la distribuzione di particelle Covid-19 in una stanza con la presenza del casco AGP (Aerosol Generating Procedure). 2021*



*Test virtuale per l'analisi del sistema di gestione termica sotto il cofano del veicolo.*  
<https://aerodyne.co.in/>

Nel campo dell'architettura, valutare le dinamiche del vento su un edificio significa sia captarne i flussi e trasformarli in risorsa, minimizzando gli sprechi energetici derivanti da sistemi meccanizzati, sia assicurare la tenuta all'aria e all'acqua, che sono tra le più significative cause di infiltrazioni e perciò rapido deterioramento degli involucri nel tempo. La simulazione delle performance cui l'involucro è chiamato a rispondere è fondata su accurate analisi e valutazioni degli effetti riscontrabili sugli occupanti in termini di comfort. Edifici sempre più alti comportano facciate sempre più esposte ai carichi del vento e maggiori variabili da intercettare preventivamente.

Le attuali capacità di calcolo dei software sono in grado di effettuare test sulle dispersioni termiche, sui carichi sismici, di propagazione dell'aria esterna e interna, del suono e dei fumi per la sicurezza antincendio, ecc. In seguito all'epidemia da Covid-19, le applicazioni di ARUP in chiave CFD si sono concentrate fintanto sulla qualità dell'aria negli ambienti indoor degli edifici, per tracciare in modo corretto l'andamento del moto dell'aria e degli agenti patogeni e mitigare perciò i rischi infettivi negli spazi progettati.

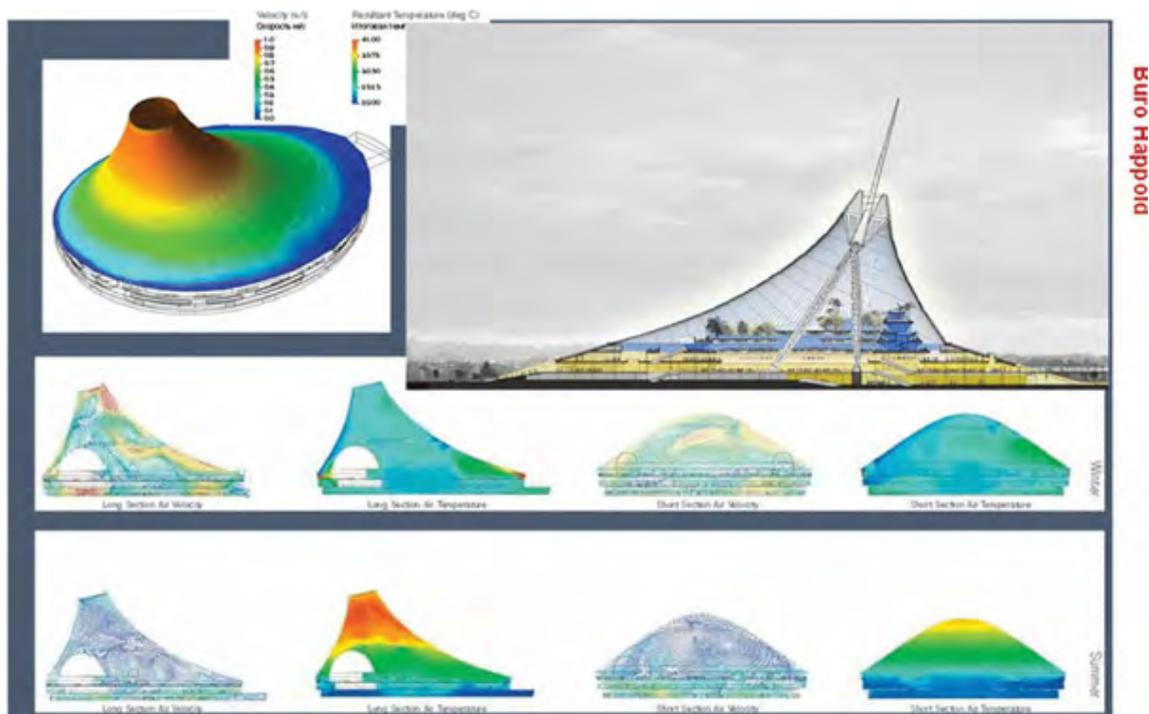


Modello fluidodinamico computazionale che mostra il flusso d'aria dettagliato.

*Modello CFD di ARUP di studio dei moti d'aria all'interno di una stanza dopo la pandemia da Covid-19. 2021*

Negli ultimi decenni le tecniche di modellazione hanno comportato una facilità nello sviluppo di mock-up digitali utili per le simulazioni prestazionali di involucri complessi. Si possono distinguere diverse categorie di modelli computazionali, tra cui Building Energy Simulation (BES), modelli di trasferimento calore-aria-umidità dell'involucro dell'edificio (BE-HAM) e fluidodinamica computazionale (CFD).<sup>1</sup>

Paragonato ai tradizionali modelli di calcolo, il CFD consente di analizzare ogni singolo punto di geometrie anche complesse altrimenti difficili da risolvere e di settare i parametri di flusso e delle condizioni al contorno del modello istantaneamente, riducendo notevolmente la necessità dei testing sui prototipi, che comporterebbero un aumento in termini di costi e tempo.<sup>2</sup>



*Simulazioni di Buro Happold del Centro di intrattenimento in Kazakistan 2010, Architects Foster + Partners. Un'istantanea di CFD modellazione mostra le condizioni predominanti statiche in un giorno estivo e invernale scelto. N. Hamza e P. DeWilde. November 2013, Journal of Building Performance Simulation*

1 *Applicazione di CFD nella simulazione delle prestazioni degli edifici per l'ambiente esterno: una panoramica. Bert Blocken*

2 *V. Cecafosso. La fluidodinamica in architettura, 2017, Altralinea edizioni*

Il CFD negli ultimi anni è diventata una disciplina imprescindibile per grosse società consulenti di servizi di progettazione che indagano i comportamenti del vento sull'ambiente costruito e in progetti di infrastrutture ed edifici dagli involucri complessi, tanto su quelli statici quanto su quelli adattivi e dinamici. ARUP, a titolo di esempio, ha dedicato una specifica unit di Computational Wind Engineering (CWE). Nel progetto di rigenerazione dei magazzini industriali dei Docklands a Dublino si è occupata di analizzare puntualmente la pressione del vento sulle torri e i ricircoli che possono generarsi nell'ambiente costruito mettendo in pericolo i pedoni. Dal tali studi è stato accuratamente mitigato il vento derivante da ponente mediante un'apposita schermatura.



Figure 3. Sketchup Geometry

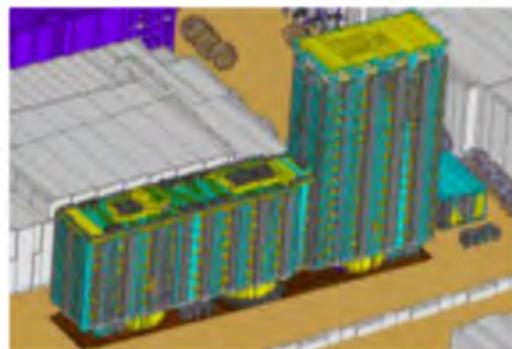


Figure 4. CFD model

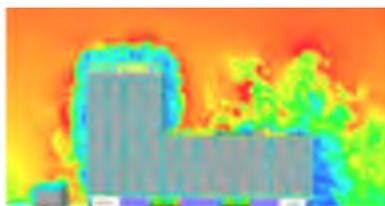


Figure 5. Distress Criteria. Wind from the West, Minimum values in blue (0m/s), Maximum values in red (20m/s)

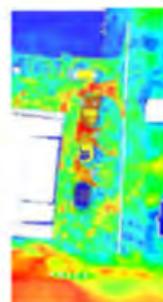


Figure 6. Distress Criteria. Wind from the West, Minimum values in blue (0m/s), Maximum values in red (20m/s)

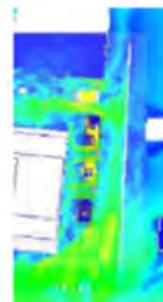


Figure 7. Distress Criteria. Wind from the East, Minimum values in blue (0m/s), Maximum values in red (20m/s)

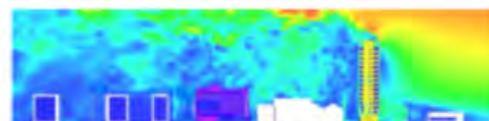
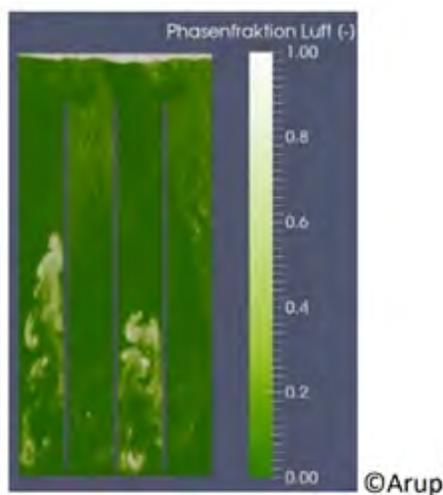


Figure 8. Distress Criteria. Wind from the East, Minimum values in blue (0m/s), Maximum values in red (20m/s)

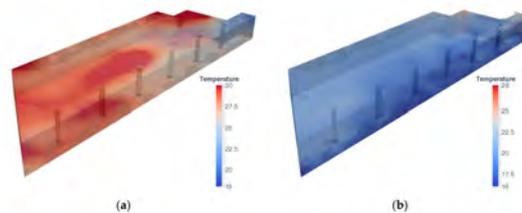
*An Overview of Arup Computational Fluid Dynamics Projects, Jennifer Keenan, Cristina Paduano, Réamonn Mac Réamoinn, Arup, 50 Ringsend Road, Dublin 4, Ireland*

Anche nel progetto sperimentale di una facciata bioenergetica presentato nel 2013 al Salone dell'Edilizia di Amburgo, integrata con un sistema solare termico con il quale vengono coltivate microalghe per assorbire CO2 e accumulare biomassa, è stata utilizzata la metodologia CFD per creare le condizioni ottimali per far crescere le alghe.

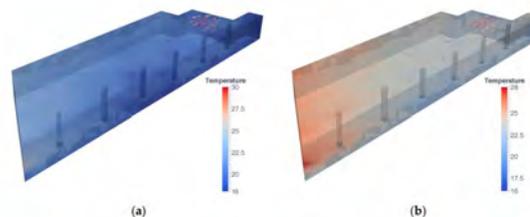


*An Overview of Arup Computational Fluid Dynamics Projects, J. Keenahan, C. Paduano, R. Mac Réamoinn, ARUP. 50 Ringsend Road, Dublin 4, Ireland*

Il contributo del CFD in architettura può essere sperimentato per valutare i consumi energetici degli edifici esistenti. A tal fine si ritiene interessante citare lo studio<sup>1</sup> proposto nel 2018 riguardo una simulazione prestazionale sui dormitori della Cité de Refuge di Parigi progettata da Le Corbusier per fornire una risposta di efficientamento dell'edificio mediante l'utilizzo di ATF - Active Transparent Facade. Altri casi simili di utilizzo sperimentale del CFD hanno riscontrato buoni risultati su facciate a doppia pelle (DSF - Double Skin Surface), dove è utile controllare la dinamica dell'aria nella cavità per ridurre il surriscaldamento. Tuttavia, è necessario riportare che se negli ultimi anni cresce l'impiego del CFD per studiare i flussi sulle DSF, difficilmente viene valutata la qualità dell'aria interna nell'azione combinata con la ventilazione meccanica.



Caso 1: *Ipotesi Le Corbusier. Restituzione 3D della distribuzione della temperatura alle ore 00:00 del secondo giorno di calcolo. a) inverno; (b) estate.*



Caso 2: *Soluzione proposta di efficientamento energetico. Restituzione 3D della distribuzione della temperatura alle ore 00:00 del secondo giorno di calcolo. a) inverno; (b) estate senza sistema di raffreddamento.*

1 C. Ramírez-Balas, E. Fernández-Nieto et al. *Thermal 3D CFD Simulation with Active Transparent Façade in Buildings*

*Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción conjuntamente al Departamento de Matemática Aplicada I, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Sevilla*

## 5.2 - I software per la simulazione della fluidodinamica computazionale

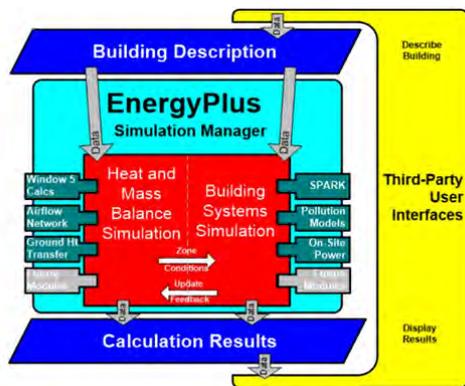
Modellare in CFD significa costruire un modello geometrico tridimensionale ad alta precisione da sottoporre a "meshing", cioè a una parzializzazione del dominio in piccole celle da risolvere in equazioni RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations), mediate secondo modelli di turbolenza e mettendo a sistema le variabili e le caratteristiche fisiche, termiche e le condizioni al contorno impostate. Per risolvere tali equazioni, la risposta dell'informatica negli anni è stata quella di potenziare enormemente gli strumenti di calcolo. Tuttavia, se da un lato infatti l'utilizzo di questi software risulta essere di maggiore facilità e chiarezza dei risultati, dall'altro è frenato dalle stesse software-house, che ne limitano spesso l'interoperabilità tra programmi di differenti case-madri e ne affinano i software direttamente sulle esigenze delle grosse aziende di consulenza. E' da considerare inoltre che la gran parte di questi strumenti provengono da tutt'altri settori e che sono stati prestati all'architettura e al Facade Engineering solo successivamente, pertanto la loro stessa programmazione dovrà necessariamente prevedere una maggiore compatibilità con i comuni software di modellazione architettonici.

La maggior parte degli strumenti derivano da un'epoca in cui l'adattabilità dei componenti edilizi non era una considerazione primaria<sup>1,2</sup>. Attualmente è da registrare comunque un'accelerazione dello sviluppo della diffusione di questi strumenti di simulazione per far fronte ad una crescente richiesta da parte del mercato.

1 Ayres e Stamper ,1995. *Historical development of building energy calculations.* (Oh e Haberl 2015)

2 S. Oh, J.S. Haberl, 2016. *Origins of analysis methods used to design high-performance commercial buildings: whole-building energy simulation*

## EnergyPlus



Modello di funzionamento Energy-Plus

EnergyPlus è un software di simulazione energetica in stato dinamico dell'intero edificio, concepito come un foglio di calcolo avanzato per la convalida di più modelli come bilancio termico, modello combinato di trasferimento di calore e massa, modello integrato di sistema HVAC e sistema di controllo illuminotecnico. Il vantaggio principale è la possibilità di dialogo con facciate dinamiche, tramite sistema di gestione dell'energia-Energy Management System (EMS) basato su regole algoritmiche collegate a sensori e attuatori applicati alla facciata.

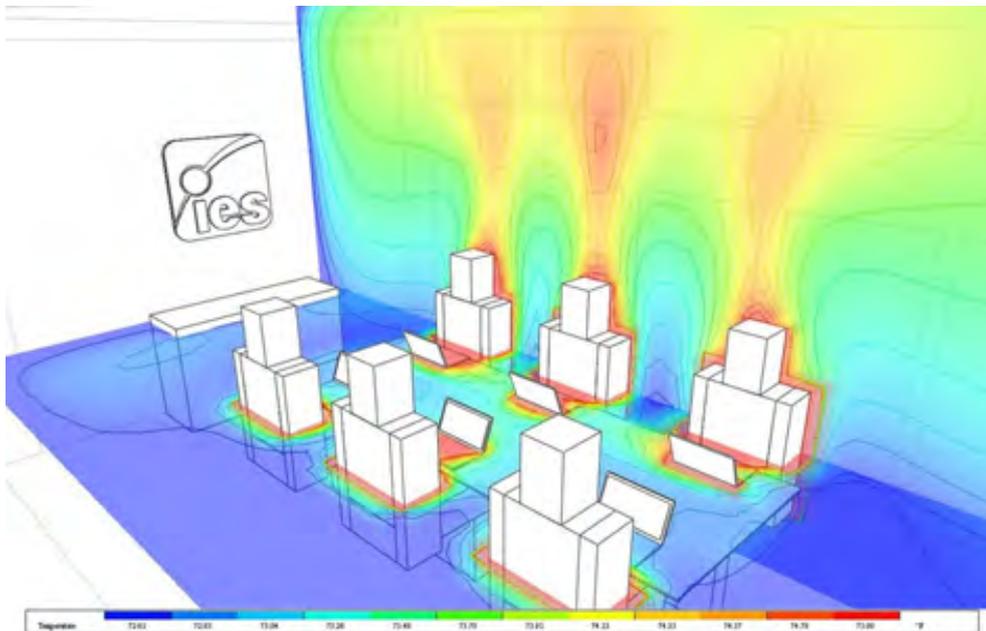
## ESP-r

ESP-r è uno strumento di simulazione delle prestazioni energetiche dell'edificio per riprodurre modelli multi-dominio di fluidodinamica computazionale CFD per supportare valutazioni di comfort e qualità dell'aria, flussi di calore, aria, umidità, luce ed energia elettrica. Inoltre è possibile simulare i collegamenti termodinamici dell'edificio con gli impianti. Il principale vantaggio di ESP-r è quello di lavorare in roaming e considerare quindi condizioni di umidità o esposizione solare variabili nel caso di involucri dinamici. E' compatibile con gran parte dei software di modellazione.



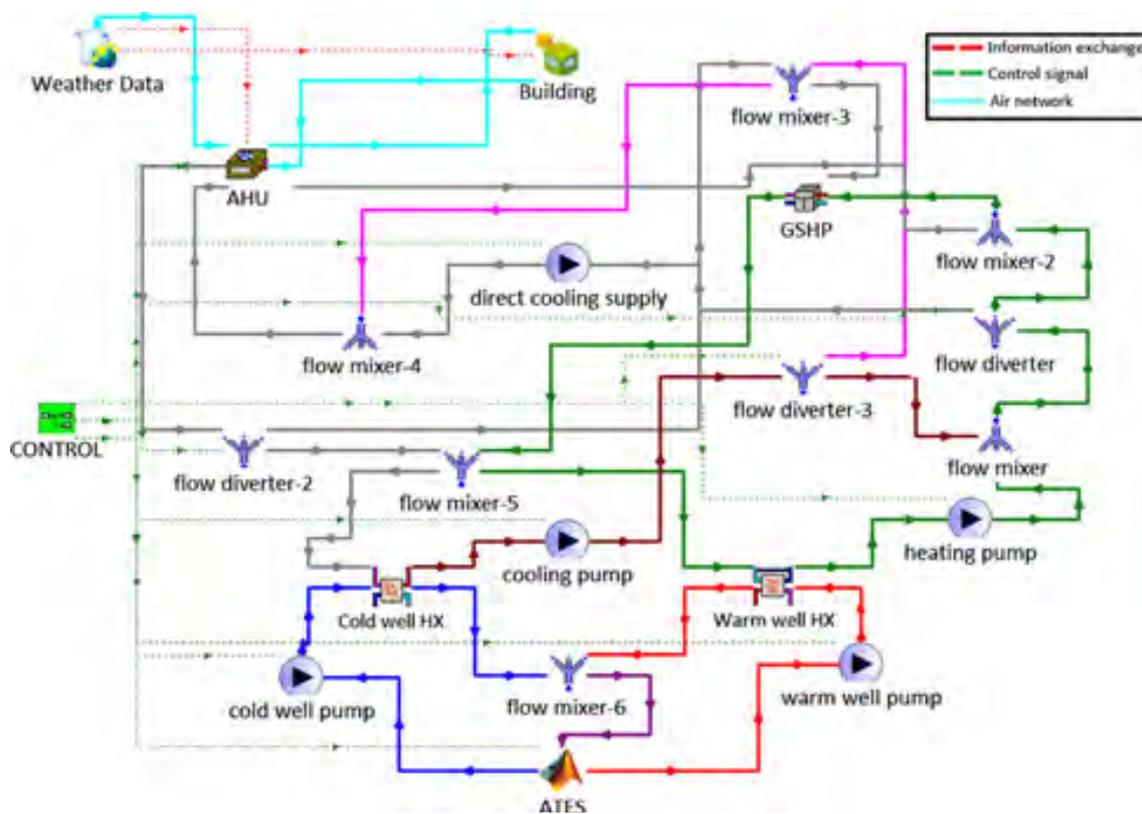
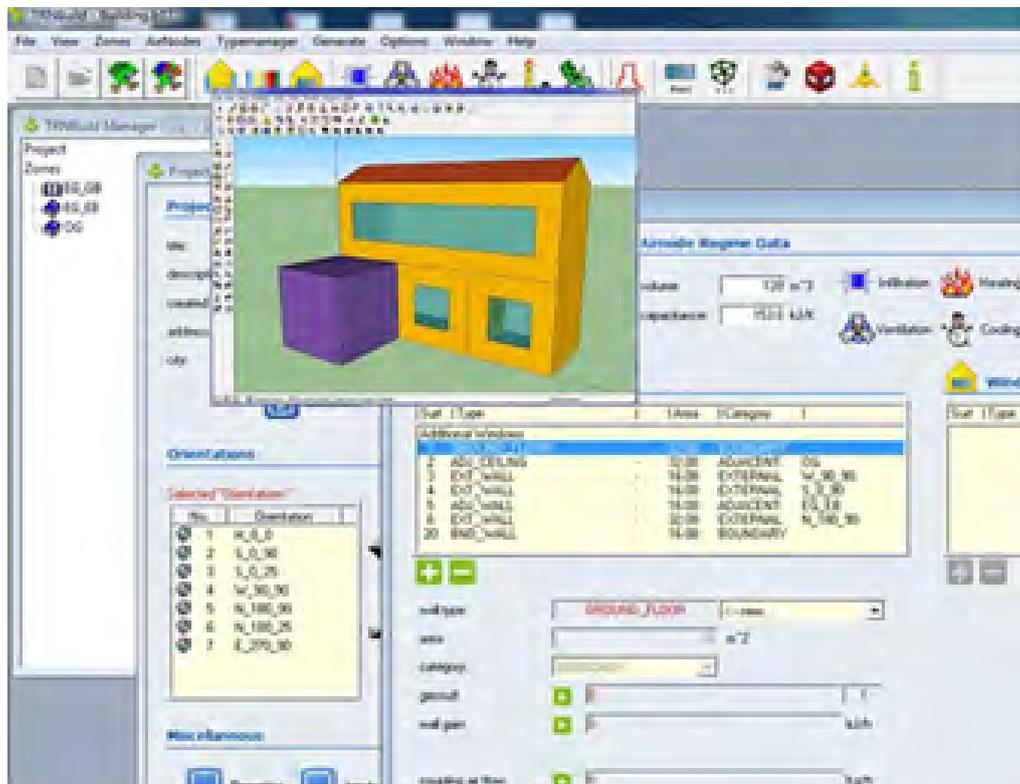
## **IES VE**

IES VE -Integrated Environment Solutions Virtual Environment è uno strumento di simulazione per l'analisi termodinamica e fluidodinamica, sfruttando i risultati dell'analisi termica come condizioni al contorno per il modulo CFD. E' presente un sottomodulo del software - MicroFlo per il controllo specifico del CFD, simulando il flusso termico sia interno che esterno attorno agli edifici, tenendo conto delle condizioni al contorno importabili da ApacheSim o impostabili dall'interfaccia interno come clima, fonti energetiche interne e sistemi HVAC per valutare le più idonee strategie di ventilazione sia naturale che mista.



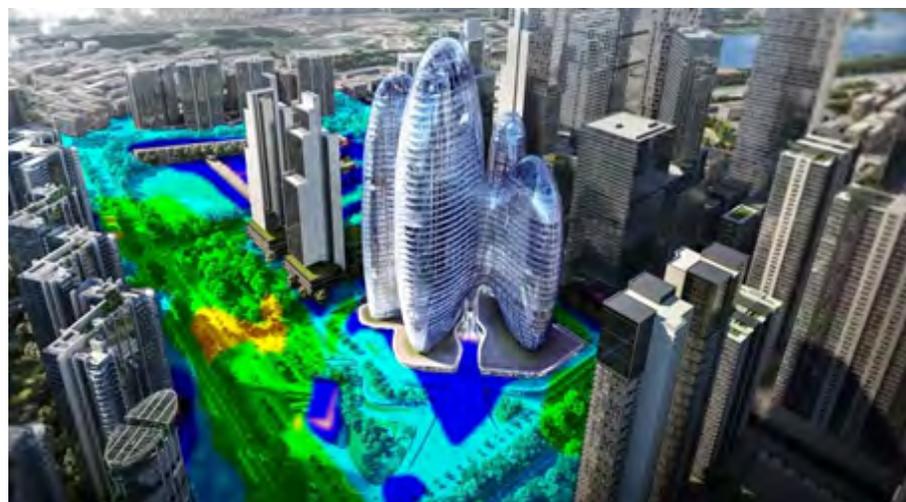
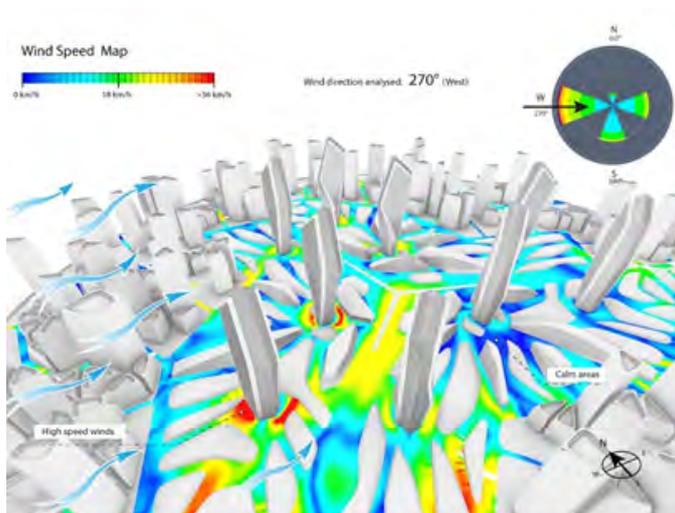
## **TRNSYS**

TRNSYS è un software di simulazione dall'interfaccia semplificato grazie alla compatibilità con Simulation Studio che consente di evitare la scrittura del file input basata su testo. E' provvisto di una suite di strumenti abili a modellare edifici multizona e importare la geometria da altri moduli interni. TRNBuild ad esempio consente di impostare in modo flessibile parametri dei materiali di parete e della sua stratigrafia, inserire gli occupanti delle zone per la verifica del comfort interno. Lo svantaggio rispetto ad altri programmi è che non è possibile modificare le caratteristiche dell'involucro quando la simulazione è in atto, dovendo perciò rimandare il calcolo una volta modificati i parametri.



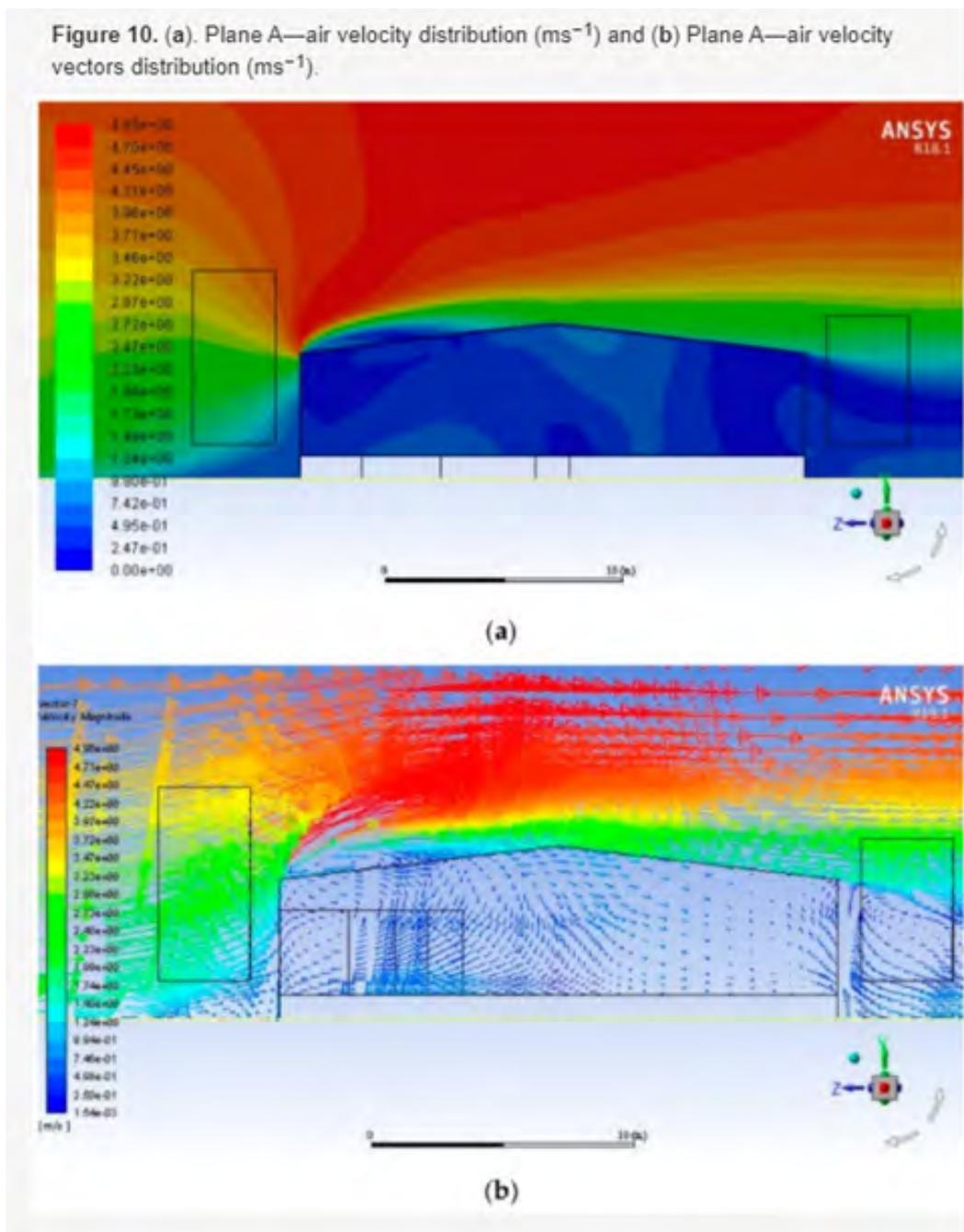
## **SIMSCALE**

Simscale è un programma a piattaforma CAE (Computer-aided engineering) collaborativo in cloud per testare le prestazioni dell'edificio e calcoli fluidodinamici relativi a flussi laminari e turbolenti, fluidi comprimibili e incomprimibili, trasferimenti di calore in maniera intuitiva ma avanzata tanto da essere utilizzato per test di dettaglio di componenti di veicoli aerodinamici. E' utile tanto nella progettazione di involucri edilizi quanto in quella di sistemi HVAC secondo ASHRAE 55 o ISO 7730 per la simulazione della qualità della performance dell'aria all'interno degli edifici. E' software partner dello Studio Zaha Hadid Architects con il quale condivide nel dettaglio strategie di validazione dei propri progetti, in particolare nell'attenzione al vento all'interno dell'ambiente costruito per il comfort dei pedoni.



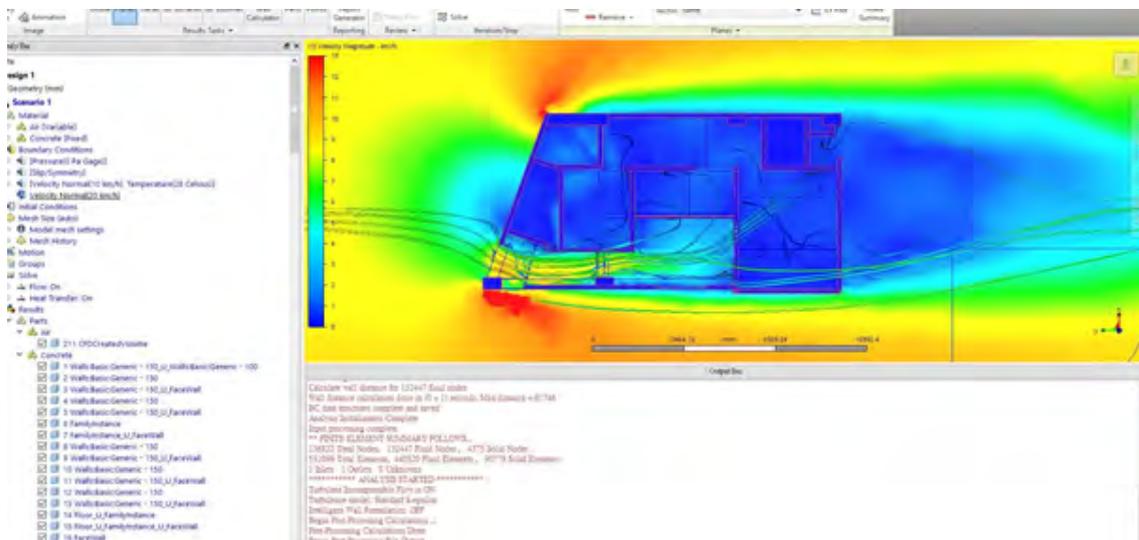
## ANSYS FLUENT

Ansys Fluent è un software dotato di un potente risolutore per il calcolo dei flussi, turbolenze, trasferimento di calore, utilizzato in svariati settori industriali e in svariate applicazioni. E' un programma intuitivo e flessibile, infatti è consentito interrompere la simulazione per valutare istantaneamente gli effetti del calcolo.



## AUTODESK CFD

Autodesk CFD è un potente software di simulazione fluidodinamica computazionale interoperabile col BIM nei progetti AEC e MEP di sistemi HVAC per testare il comfort degli occupanti. Ha un risolutore ottimizzato per mesh complesse che riescono a condurre analisi dello scambio termico e della fluidodinamica. Rispetto agli altri programmi menzionati risulta avere una maggiore compatibilità con i programmi comuni della stessa casa madre (Autocad - Revit).





## 6 - IN CAMPO AZIENDALE



### 6.1 - L'esperienza in AluK

L'ambito di ricerca inquadrato da questo studio è stato condotto, come dichiarato in premessa, in partnership con l'azienda ALUK, leader internazionale nel settore della produzione di sistemi di facciata continua e serramenti in alluminio.

Aluk è un'azienda nata nel 1969 a San Giovanni Lupatoto (VR) e originariamente costituita come impresa pressoché familiare. Dopo essersi imposta nel settore per innovativi profili in alluminio a taglio termico, nel 1988 nasce ALUK Engineering S.p.A. aprendosi al mercato del Middle East e Cina cui esporta accessori per serramenti.

Successivamente a varie fusioni per incorporazione dei magazzini commerciali viene fondato AluK Group nel 2005 e nel 2011 viene acquisita dal gruppo francese Valfidus con sede in Lussemburgo che ne diventa socio finanziario, mantenendo in ogni caso le sedi operative storiche italiane ed espandendosi attraverso acquisizione di altre aziende storiche del settore in Europa e nel Mondo.

La collaborazione nella ricerca presentata ha riguardato un solido rapporto con il dipartimento dArTe dell'Università di Reggio Calabria e con il BFL - Building Future Lab quale scenario dei test di laboratorio di numerosi prodotti. L'esperienza della ricerca rappresentata è il frutto di un periodo di formazione e partecipazione alle attività aziendali presso la sede operativa di San Giovanni Lupatoto (VR) e dello Aluk Studio Design di Milano, situato all'interno di Bovisatech e nelle immediate vicinanze del PoliHub del Politecnico di Milano,



*Profili in alluminio piegati presso l'impianto Aluk di Isola della Scala (VR)*



La sede Aluk di San Giovanni Lupatoto (VR)



*La sede Aluk di Aluk Design Studio a Milano presso il Bovisa Tech di via Durando (MI)*

a testimoniare l'importanza che l'azienda intende dare al proprio comparto del R&D.

Durante il periodo in presenza all'interno della sezione R&D dell'azienda si è portato avanti un intenso studio delle metodologie BIM dei profili in alluminio e delle possibili interazioni che questi hanno con i testing pre-produzione realizzati con i metodi computazionali. Il nodo centrale del lavoro è stato quello di tracciare possibili vie innovative nelle linee di produzione aziendali dei prodotti, dall'ideazione progettuale alla commercializzazione, le quali attualmente vengono sviluppate secondo le seguenti fasi:

- FASE 1: Ideazione progettuale

Sulla scorta delle richieste del mercato e del mondo della progettazione vengono disegnati ed ingegnerizzati i profili ed accessori per la realizzazione dei sistemi di facciata venduti sotto forma di kit. Laddove le richieste della committenza dovessero riguardare progetti più specifici che richiedono particolari schemi di facciata si innesca una customizzazione dei profili.

- FASE 2: Verifica prestazionale

Progettato il sistema di profilati si prosegue con un'indagine prestazionale dei nodi nella combinazione tra i vari profili e con possibili vetrazioni da installare. Viene quindi eseguita la verifica dei calcoli della trasmittanza termica nei nodi con software FLixò nelle varie configurazioni di abbinamento con pannello vetro-vetro, pannello-pannello, sporgere-sporgere, vetro-sporgere, vetro-pannello, pannello sporgere per ogni profilo (es. per i profili di montante K730-K731-K732, ecc. a seconda della diversa profondità per la serie SL50), rispetto alla tipologia di canalina prevista (tradizionale o di tipo "warm edge"). Vengono eseguite inoltre delle verifiche statiche mediante dei fogli di calcolo rispondenti alle NTC 2018 e secondo le EN di settore (EN 13830, EN 1999-1-1:2014) descrivendo i carichi (vento, neve, laddove il sistema per facciata venga utilizzato in copertura, ecc), le caratteristiche geometriche e dimensionali di progetto, (interasse dei montanti, interasse dei solai, modulo elastico di resistenza, Momento di inerzia, Limite spostamento elastico, ecc.). Con queste analisi vengono opportunamente verificate per ogni singolo montante e traverso le possibili deformazioni nella condizione limite di esercizio con particolare riguardo allo spostamento elastico e allo stato limite ultimo riguardo alla resistenza.

- FASE 3: Prototipazione del profilo

Dopo avere eseguito le suddette analisi prestazionali si mette in produzione un mock-up appositamente realizzato (PMU - Performance Mock-Up).



*Profili in alluminio anco a da tagliare presso l'impianto di estrusione Anodall di Trevenzuolo (VR)*



*A lato: Impianto automatico verticale di verniciatura in polvere dei profili di sponibile presso l'impianto Anodall di Trevenzuolo (VR)*



*L'impianto di produzione Aluk di Isola della Scala (VR). Vista dell'impianto di sublimazione effetto legno.*



*Matrici di estrusione presso l'impianto di estrusione Anodall, Trevenzuolo (VR)*



*Vasche per ossidazione anodica dell'alluminio presso l'impianto Anodall di Trevenzuolo (VR)*

Vengono create delle matrici utilizzate dall' estrusore per la produzione della campionatura del profilato di alluminio. Tale campionatura poi viene sottoposta ad un'ispezione visiva e dimensionale di verifica della conformità al disegno.

- FASE 4: Test preliminari su mock-up

Viene quindi realizzato un primo mock-up in un laboratorio interno all'azienda dove viene testato preliminarmente per la validazione delle soluzioni tecniche adottate-

- FASE 5: Certificazione dei profili e del sistema di facciata

Successivamente all'esito positivo di queste prove si procede al testing avanzato in laboratorio esterno o in condizioni di witness testing presso il laboratorio aziendale per la certificazione in conformità alle normative di settore a vari livelli. Il testing riguarderà sia la struttura in alluminio prodotta dall'azienda sia le possibili combinazioni e con le tipologie di tamponamento comunemente applicabili.

- FASE 6: Produzione

In questa fase viene messa in campo la produzione dei profilati estrusi del sistemasecondo linee di produzione seriali e relativi trattamenti superficiali rispetto alle esigenze funzionali/ estetiche (es. ossidazione previa spazzolatura, verniciatura, ecc) agli accessori necessari ed alle guarnizioni.

- FASE 7: Commercializzazione

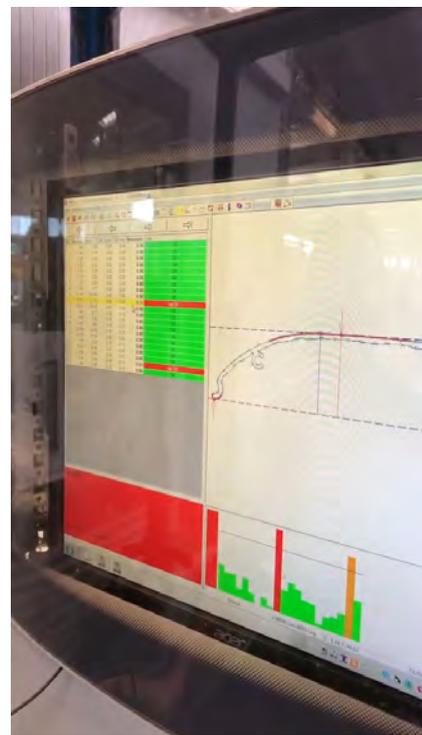
Ogni singolo componente di facciata viene introdotto sul mercato rispetto alla domanda offrendo un continuo dialogo con clienti, progettisti e serramentisti.

# PROCESSO **ALUK**





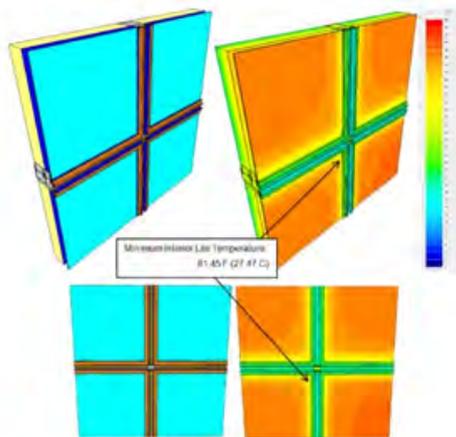
*Impianto Aluk di Isola della Scala (VR)*



*Verifiche delle tolle anze geometriche dei profili estrusi presso l'impianto Anodall di Trevenzuolo (VR)*

## 6.2 - Le altre realtà aziendali

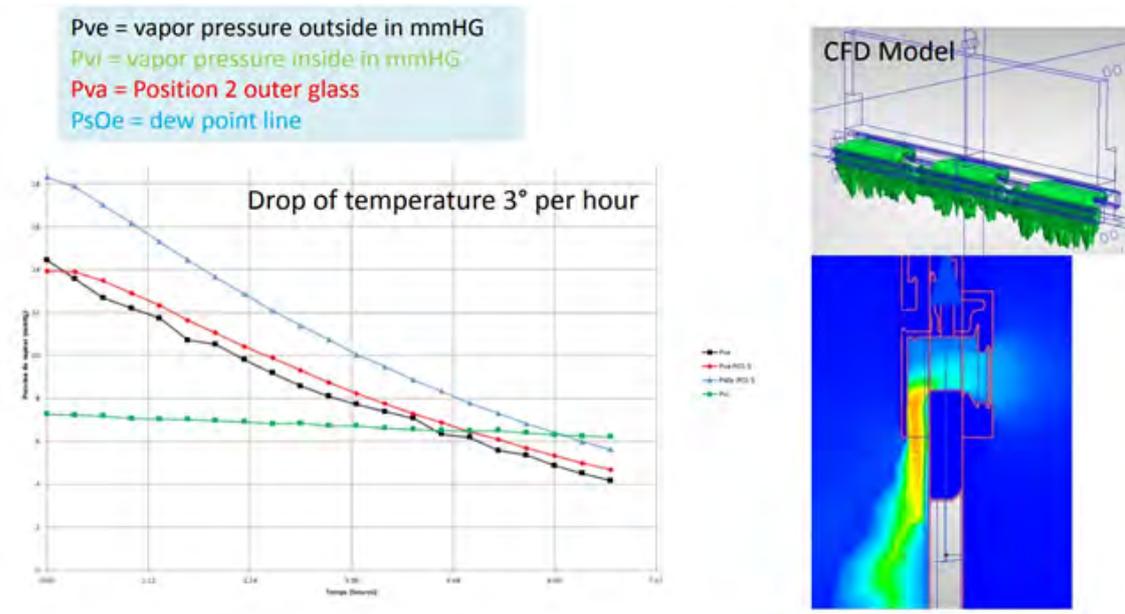
Per citare alcune realtà concorrenti ad Aluk e i loro avanzamenti in campo Building Performance Simulation, Permasteelisa ha attivato con la software-house Physibel delle simulazioni in fase progettuale delle facciate in vetro e alluminio realizzate per 1717 Broadway e Hardrock 217 West 57th Street a New York, simulando le azioni di una hotbox (metodo della camera calda per telai).



*Calcoli del flusso termico per 1717 G anite Broadway, NY*

L'interesse per l'argomento di ricerca è stato ribadito da Permasteelisa con una ricerca<sup>1</sup> condotta con il Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università degli Studi di Cagliari su una DSF - Double Skin Facade per stimare il bilancio energetico della facciata.

Wicona utilizza il CFD per verificare l'effetto della condensa sui propri serramenti.



Anche Schueco nel 2008 dimostrava<sup>2</sup> di intraprendere l'uso della metodologia CFD per sperimentare il giusto equilibrio di flusso termico e solare su alcuni pannelli fotovoltaici di sua produzione, utilizzando il software Flovent.



1 R. Fuliotto. PhD Thesis, 2008 "Experimental and Numerical Analysis of Heat Transfer and Airflow on an Inte active Building Facade".

2 From September 2008 High Frequency Electronics Copyright © 2008 Summit Technical Media, LLC

Nel 2009 si può rintracciare una ricerca sperimentale<sup>1</sup> di applicazione del CFD comparandolo con un test indoor al fine di indagare l'influenza della radiazione solare sul flusso d'aria e del trasferimento di calore su una facciata vetrata con pale frangisole esterne realizzata da Reynaers Aluminium.

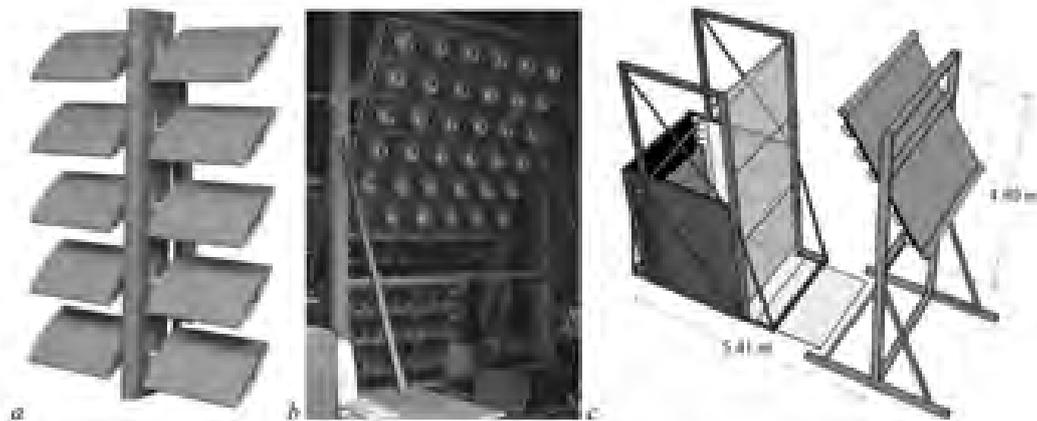
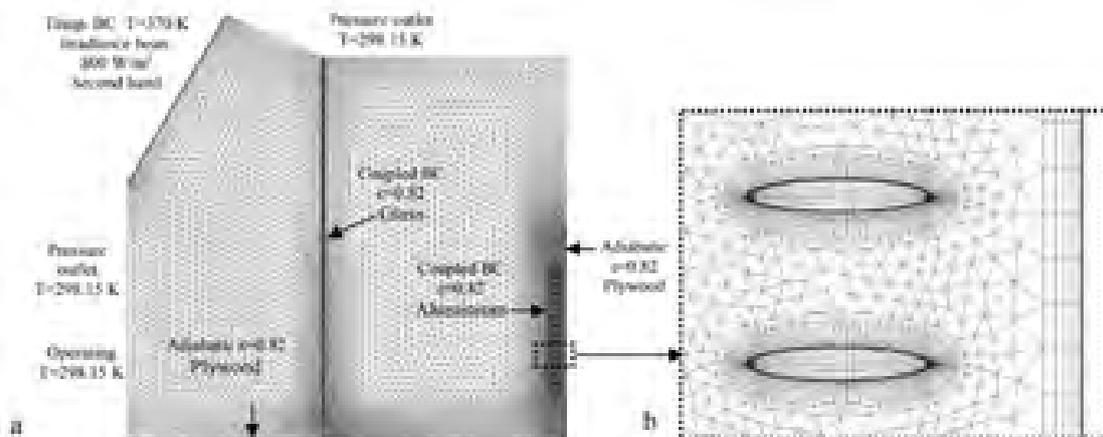


Fig. 1. a: Elliptical louver, b: Solar simulator and c: Schematic 3D view of the test set-up and its position in front of the solar simulator.



1 A. Tablada, J. Carmeliet, M. Baelmans. 2009, Modelling airflow and heat transfer on an experimental facade with external louvers

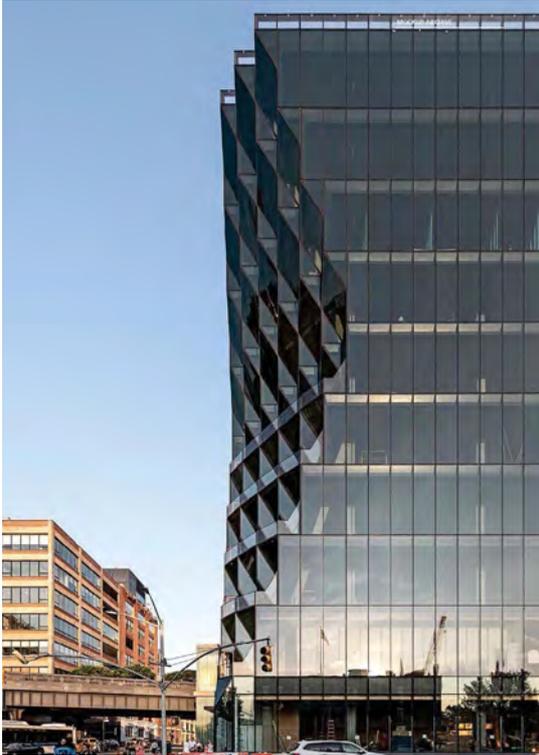
## 7 - IL TESTING AVANZATO

La qualità prestazionale attesa negli ultimi anni nella progettazione degli involucri edilizi in termini di controllo dell'energia e di gestione dei flussi ha evidenziato la necessità di verifiche da riscontrare nella fase di prefabbricazione, e cioè quella contraddistinta dalla prototipazione del prodotto, le cui caratteristiche progettate vanno necessariamente certificate nel loro stato simulato. A tal fine, le infrastrutture di testing delle facciate presenti sul mercato rivestono oggi il ruolo di garanti della performance, attestando il livello di feedback della fase progettuale ed allertando possibili criticità da risolvere. La spinta dell'innovazione sugli involucri edilizi ha costretto i laboratori di prova a perfezionare le metodologie di simulazione delle prestazioni in differenti condizioni al contorno e perciò dinamiche nel tempo e nello spazio di utilizzo. Progettare queste strutture significa concepire realtà complesse ma allo stesso tempo adattabili, per poter condurre un'ampia selezione di test diagnostici senza tuttavia perdere di vista l'affidabilità dei risultati. In ragione delle prove da sostenere è perciò necessario costruire la struttura della tipologia più idonea ove sottoporre i test su PMU - Performance Mock-Up appositamente prodotti. Queste strutture, a seconda delle proprie caratteristiche, possono essere inquadrare in 3 diverse categorie<sup>1</sup>:

- strutture di prova all'aperto in scala reale (con possibile presenza degli utenti all'interno)

In questo caso il test viene effettuato su un edificio costruito per sperimentare modelli in scala 1:1. Queste strutture, grazie alla loro dimensione, che possono essere progettate per fornire risultati circa l'efficacia in termini di comfort degli utenti occupanti, restituiscono risultati più veritieri e consentono di condurre testing su scambio termico, prove di resistenza sismica, permeabilità all'aria

<sup>1</sup> G. Cattarin, F. Causone, A. Kindinis, L. Pagliano. 2016, *Outdoor test cells for building envelope experimental characterisation - A literature review*



*40 Tenth Avenue, Solar Carve Tower,  
New York*

*Focchi 2021, Performance Mock-Up  
(PMU) sottoposto a test di laboratorio  
per il progetto in 40 Tenth Avenue, NY.*



e all'acqua tanto in condizione statica quanto in quella dinamica. In caso di strategie di simulazione dei moti di ventilazione è utile abbinarlo a software di CFD - Fluidodinamica Computazionale.

Da un lato appunto la struttura deve essere dotata di strumentazione avanzata che consenta di governare i processi di indagine sui campioni in scala reale, dall'altro richiede una spesa maggiore di operatori abilitati e specializzati ad una costante manutenzione e controllo dell'edificio. Altro limite rintracciabile in questa categoria di strutture è che nella gran parte dei casi queste sono direttamente esposte alle condizioni meteorologiche esterne, e la minimizzazione dell'esposizione mediante strumentazione digitale riesce a sopperire solo parzialmente questa problematica.

- strutture interne di laboratorio

Le strutture interne vengono eseguite mediante macchinari che consentono di testare i prototipi sottoponendoli a condizioni stazionarie. Questo è il caso ad esempio di test di flusso termico e termo-igrometrico o test di misurazione della radiazione solare sui sistemi di involucro. Tra gli svantaggi di queste apparecchiature rientrano i costi elevati per effettuare le prove e la difficoltà di interazione dei test con gli occupanti. Inoltre, se da una parte i test sviluppati in strutture interne di laboratorio restituiscono risultati precisi, dall'altra proprio questa precisione risulta poco affidabile rispetto alle prove condotte all'esterno, perché non tiene in considerazione l'azione variabile delle condizioni climatiche.

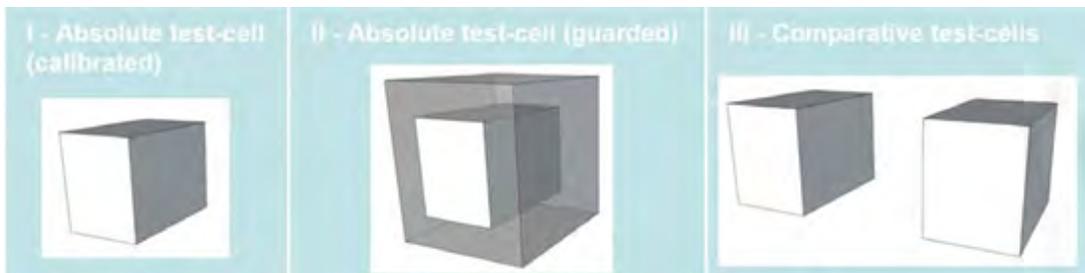
- celle di prova all'aperto

Questa tipologia di struttura fornisce indubbiamente un approccio più realistico rispetto alle altre due metodologie menzionate. Infatti il prototipo viene testato con variabili condizioni al contorno riproducendo le specifiche modalità di utilizzo. Queste possono rappresentare un giusto equilibrio tra il testing a scala reale, che necessita di elevate spese di realizzazione del prodotto "così come sarà", e quelle dei testing indoor effettuate in condizioni stazionarie. La dimensione del prototipo contenuta infatti concede di concentrare maggiore attrezzatura di rilevamento e di governare più nel dettaglio gli esiti del testing. In aggiunta, bisogna tener conto che le prove su indicate non sono alternative, bensì possono essere affiancate per dimostrare l'affidabilità del risultato.

Le strutture di prova esterne possono essere a loro volta distinte in:

- Assolute: vengono utilizzate per effettuare prove in termini assoluti senza confronti diretti con altri componenti o indici di prestazione similari;

- Calibrate: quando si isolano le pareti laterali della struttura e si sottopone a test la specifica faccia ospitante il campione di prova. Spesso queste celle sono direttamente esposte alle condizioni meteorologiche esterne;
- Protette, quando si riduce maggiormente la dispersione del flusso di calore mediante una zona termica "di guardia", cioè ulteriormente protetta dalle dirette condizioni meteo esterne;
- Comparative, quando il testing viene confrontato con i risultati derivanti da un elemento gemello già posto in esame.



Main Categories	Sub-categories	Standard protocol
Tests in controlled laboratories	Guarded and calibrated Hot-box	ISO 8990
	Climate facilities	Other
Outdoor real-scale facilities	With occupancy	IPMVP, Comfort survey panels
	Without occupancy	Other, Qub, Isabele
	Test cells for comparative measurement	Other
	Guarded test cells for absolute measurement	Other
Outdoor test cells	Comparative & Guarded test cells for absolute measurement	Other
	Calibrated test cells for absolute measurement	PaSSYS - PaSLINK
	Outdoor test boxes	Other

*Mapping of Test facilities to evaluate key performances of Adaptive Façade Components.*

*M. Doya, F. Goia. Building Performance Simulation and Characterisation of Adaptive Facades. Adaptive Façade Network*

## 7.1- Il Building Future Lab

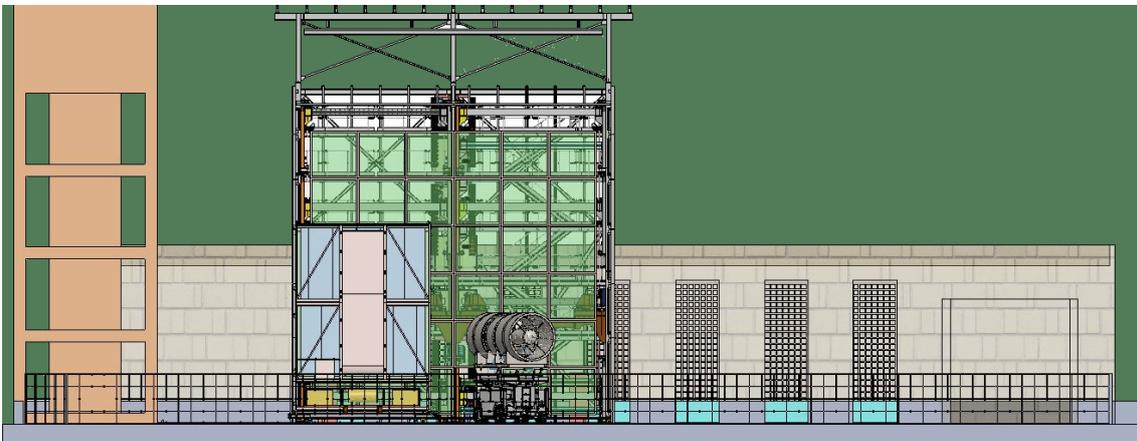
In linea con le strategie comunitarie e nazionali di ricerca sull'innovazione e l'evoluzione prestazionale che guardano all'involucro edilizio come driver energetico, l'Università Mediterranea di Reggio Calabria ha proposto, tramite il progetto "Building Future Lab", un laboratorio permanente di ricerca applicata, realizzato mediante un finanziamento di 8.600.000 € ottenuto con fondi PON 2007-2013. Il ruolo cardine del BFL è quello di essere un luogo sperimentale interdisciplinare di continuo confronto tra protagonisti del mondo accademico e di ricerca, aziende produttrici, imprese e professionisti del settore, nell'intento di esigere dall'elemento involucro continue risposte in termini di performance. Il suo approccio deriva quindi dalla profonda convinzione di offrire servizi orientati al controllo del progetto piuttosto che alle pretese dell'industria. A pochi anni dalla sua inaugurazione, il BFL punta ad affermarsi come leader internazionale nel settore TIC - Testing, Inspection and Certification, contando su un core business dal doppio indirizzo. Il primo, certamente quello più sperimentale, è quello della ricerca applicata, svolta analiticamente nello sviluppo di DMU (Digital Mock-Up) e tramite attività di studio di nuovi materiali e sistemi costruttivi di involucro, fornendo soluzioni customizzate. Il secondo grado di operatività del BFL è quello di essere strutturato in più sezioni di testing di differente tipologia che puntano alle certificazioni dei prodotti in



osservanza ai protocolli previsti dalle norme di settore (UNI, EN, AAMA, ASTM). In particolare la sezione TCLab, specifica sui sistemi di involucro, si avvale della presenza di tre strutture di prova TestLab, TestCell, Test Room.

Il TestLab è una struttura di prova di tipo outdoor realizzata con un'ossatura in acciaio delle dimensioni di h 18.20 x l 16.80 x 4 m, chiusa a tenuta stagna su tre lati e capace di ospitare sul lato anteriore prototipi di facciate continue in scala reale del tipo curtain wall. In virtù della sua attenta progettazione consente di effettuare delle prove sismiche mediante tre travi sismiche che simulano l'azione dei carichi per misurare gli spostamenti e l'equilibrio elastico del sistema assemblato. Alla struttura è connesso un carroponete teleguidato per la movimentazione orizzontale e verticale dei mock-up. Sul campione installato vengono condotti test di Permeabilità all'aria (EN 12152/ 12153); Tenuta all'acqua (in regime statico EN 12154/12155); Tenuta all'acqua (in regime dinamico AAMA 501.1/CWCT 7); Tenuta al vento (EN 12179/13116); Resistenza all'urto (EN 14019). Queste prove possono essere effettuate anche mediante azione combinata di un potente ventilatore assiale a capacità variabile capace di simulare il moto d'aria generato da un uragano fino alla velocità di 200 km/h e spruzzatori d'acqua per la verifica di tenuta all'acqua in regime dinamico riproducendo condizioni estreme. Oltre alle attrezzature dette è presente una camera termica capace di mantenere costante la temperatura dell'aria per cicli termici estremi (+88 C° <> - 18 C°, 1/5h).

La Test Cell rappresenta una camera di prova indoor per misurare i flussi termici con l'ausilio di una Hot-Box, secondo il metodo della piastra calda con anello di guardia e con uno speciale rivestimento interno per valutare l'irraggiamento solare simulando il percorso annuo del sole. E' costituita da una semi-cella fissa realizzata con profili in alluminio e pannelli di chiusura in polistirene espanso rivestito in materiale melaminico, un vano che ospita i mock-up da testare delle



dimensioni massime di 1,65m larghezza x 1,44 e spessore max 0,40 m, posto su un carrello rotante per effettuare prove dinamiche di irraggiamento solare sul campione, ed in ultimo una cella mobile che può trasformare la struttura in una camera outdoor esposta alle condizioni esterne. I test hanno come obiettivo quello di testare la trasmissione termica delle chiusure opache e trasparenti, oltre che analizzare e ridurre i ponti termici. In entrambe le celle si può ricreare una condizione termica stazionaria o in regime ciclica, cioè a temperatura (da -10° a +60° C) e velocità variabile (5-10m/s) in max 24h di simulazione.

La TestRoom (in corso di realizzazione) è la riproduzione di una vera e propria stanza dove eseguire prove adiabatiche e analisi fluidodinamiche in uno spazio di prova confinato e collegato a numerosi dispositivi di sensoristica, tra cui una stazione meteorologica e impianti di tipo HVAC e VOC per il controllo qualitativo dell'aria indoor. Presenta una parete direttamente a contatto con lo spazio esterno per misurare temperatura di facciata e dell'ambiente interno al fine di eseguire le seguenti prove: conduttività termica dei materiali (UNI EN 12664; 12667); trasmittanza termica strutture opache e chiusure (UNI EN 1745, 10077 e 13947); calcolo ponti termici (UNI EN ISO 10211). Trasmittanza termica delle murature e di vetrate, in hot box (UNI EN ISO 8990, 673/674). Determinazione dell'emissività normale ed emisferica di superfici speculari (UNI EN 12898 ; ASTM C1371). Caratterizzazione solare delle chiusure trasparenti, oscuranti e opache (UNI EN 410, 14501, 13363).



## 7.2 - Altre strutture di prova nel contesto europeo

Al fine di dare risposta alla complessità e alla diversità dei test da eseguire, sono sorti negli ultimi anni numerosi centri di prova in tutto il mondo e quelli sperimentali esistenti hanno implementato la loro dotazione strumentale. La difficoltà nel progettare una struttura di prova risiede nel prevedere un uso flessibile e all'avanguardia che sappia dialogare con la ricerca sperimentale, per quanto concerne ad esempio facciate innovative contraddistinte da automatismi e dinamismi integrati a sensori, ma al contempo in grado di certificare i prodotti secondo i protocolli normati previsti a vario livello. In forza di ciò è possibile distinguere le strutture di prova in Strutture TIC - Testing, Inspection and Certification accreditate e strutture di prova sperimentale.

Gli istituti accreditati in Europa per il rilascio di certificazioni sulle prestazioni delle facciate continue sono strutture realizzate in conformità ai criteri dettati dal CPR - Regolamento Prodotti da Costruzione n. 305/2011 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 9 marzo 2011, che fissa condizioni armonizzate per la commercializzazione dei prodotti da costruzione. In UE risultano 96 strutture diffuse negli stati membri, di cui 13 in Italia<sup>1</sup>:

MTIC InterCert S.r.l,

ISTITUTO GIORDANO S.P.A.,

RINA Services S.P.A.,

CSI SPA,

ISTEDIL SPA - ISTITUTO SPERIMENTALE PER L'EDILIZIA,

ITC-CNR ISTITUTO PER LE TECNOLOGIE DELLA COSTRUZIONE,

LAPI LABORATORIO PREVENZIONE INCENDI SPA,

TECNO PIEMONTE SPA,

t2i - trasferimento tecnologico e innovazione s.c. a r.l.,

EXPERIMENTATIONS S.r.l.,

Istituto di Ricerca e Certificazione per le Costruzioni Sostenibili S.r.l.,

CONTROL S.r.l., CNR IBE - Istituto per la BioEconomia,

L.S. Fire Testing Institute Srl.

<sup>1</sup> fonte: <https://ec.europa.eu/>

I Laboratori di testing sono strutture dove svolgere protocolli di prove codificate e sperimentali finalizzate a validare le performance e l'innovazione attese dei prodotti. Il vero punto di forza è svolgere il ruolo di incubatore per nuovi prototipi, da configurare e monitorare mediante l'uso di software CFD e BES, affiancando l'uso di sensori attivi sugli elementi a flussi di gestione dei dati.

DENOMINAZIONE	POSIZIONE	TIPOLOGIA
The Cube	Aalborg, DK	OTC with guarded volume
ESTP outdoor test cell	Cachan, F	OTC with and without guarded volume
TWINS facility	Torino, I	Two comparative OTC
ZEB Test Cells Laboratory	Trondheim, N	Two comparative OTC with two independent guarded volumes
Tipee testing facility	La Rochelle, F	Five OTC (two comparative) with guarded
LECE Building Component Energy Test Laboratory	Tabernas, ES	Four OTC fully exposed to outdoor. OTC for roofs. Single solar chimney. Monozone building.
PIV Particle Image Velocimetry	Madrid, ES	Indoor laboratory
PSE ARFRISOL Research Energy Demonstrator Office Building Prototypes	Tabernas, Almería, ES	Outdoor Real-scale Building Prototypes
GESLAB, Global Energy and Sustainable Laboratory in Building	Pozuelo de Alarcón, Madrid, ES	Eight OTC fully exposed to outdoor. Five Real-scale Building Prototypes
Multilab	Bolzano, I	Two comparative OTC with guarded volume
TRIUMF Laboratory	Aalborg, DENMARK	Two comparative OTC with guarded volume
Labimed Test-cell	Florence, I	OTC fully exposed to outdoor
Building Future Lab	Reggio Calabria, I	Indoor laboratory
Building Envelope and Solar Technologies Laboratory	Moret-Loing-et-Orvanne, F	Twelve OTC (four comparative) with guarded
Large Scale Vertical Building Envelope Climate Simulator	Trondheim, N	Indoor laboratory
NA Climate simulator		
Dual Air Vented Thermal Box	Milano, I	Indoor laboratory
MATELab	Cambridge, UK	Outdoor real-scale Room
ZEB Living Lab	Milano, I	Outdoor real-scale Building
HCU Studio for Room Comfort	Hamburg, GE	Outdoor real-scale test room
PS Test Façade	Eindhoven, NL	Outdoor real-scale test room
Multifunctional Façade Lab	Bolzano, I	Indoor laboratory

*Elaborazione tratta da M. Doya, F. Goia. Building Performance Simulation and Characterisation of Adaptive Facades. Adaptive Façade Network*

## **7.3 - Il quadro normativo per le certificazioni delle prove sulle Facciate continue**

Le performance delle facciate necessitano di una validazione affidabile e di un collaudo in modo da consentire una garanzia prestazionale ai prodotti, tanto a quelli circolanti in UE quanto a quelli di matrice americana. Le procedure standardizzate sono il frutto di normative che gli stati a vario livello hanno sottoscritto per uniformare requisiti e caratteristiche tecniche in termini di resistenza meccanica e stabilità, sicurezza in caso di incendio, igiene, salute e ambiente, sicurezza d'uso, protezione dal rumore, energia economia e ritenzione del calore, aspetti della durabilità e facilità di manutenzione. La marcatura CE in Europa innesca la certificazione di questi requisiti e traccia il percorso di controlli interni prima e, presso enti certificati poi, che i prodotti devono subire prima della loro commercializzazione.

Di seguito si evidenziano le principali prove in conformità alle normative UNI EN riferite agli standard di prodotto europei e ASTM e AAMA riguardo a quelli made in USA.

### **UNI EN**

Norma di prodotto [in obbligatorietà di marcatura CE]

UNI EN 13830 Facciate continue

In relazione alla terminologia:

UNI EN 13119 Facciate continue - Terminologia

UNI 8369-2 Edilizia. Pareti perimetrali verticali. Classificazione e terminologia.

In relazione ai requisiti:

UNI EN 12152 Facciate continue - Permeabilità all'aria - Requisiti prestazionali e classificazione

UNI EN 12154 Facciate continue - Impermeabilità - Requisiti prestazionali e

classificazione

UNI EN 13116 Facciate continue - Resistenza al carico del vento - Requisiti prestazionali

UNI EN 14019 Facciate continue - Resistenza agli urti - Requisiti prestazionali

Per prove e calcoli:

UNI EN 12153 Facciate continue - Permeabilità all'aria - Metodo di prova

UNI EN 12155 Facciate continue - Impermeabilità - Prova di laboratorio sotto pressione statica

UNI EN 12179 Facciate continue - Resistenza al carico del vento - Metodo di prova

UNI EN 12600 Vetro per edilizia - Prova del pendolo - Metodo di prova d'urto e classificazione del vetro piano

UNI EN ISO 12631 Prestazione termica delle facciate continue-Calcolo della trasmittanza termica (sostituisce la UNI EN 13947)

UNI EN 13501-1 Classificazione al fuoco dei prodotti da costruzione e degli elementi da costruzione - Parte 1: Classificazione utilizzando i dati di prova dalle prove di reazione al fuoco

UNI EN 13501-2 Classificazione al fuoco dei prodotti da costruzione e degli elementi da costruzione - Parte 2: Classificazione utilizzando i dati delle prove di resistenza al fuoco, esclusi i servizi di ventilazione

UNI EN 13947 Prestazioni termiche delle facciate continue - Calcolo della trasmittanza termica - Metodo semplificato (sostituita dalla UNI EN 12631)

UNI EN ISO 140-3 Acustica - Misurazione dell'isolamento acustico negli edifici e di elementi da costruzione - Misurazioni di laboratorio dell'isolamento acustico per via aerea di elementi da costruzione

UNI EN ISO 717-1 Acustica - Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 1: Isolamento acustico per via aerea

UNI EN ISO 717-2 Acustica - Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 2: Isolamento dal rumore di calpestio

UNI EN 12865 Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia - Determinazione della resistenza alla pioggia battente dei sistemi di pareti esterne sotto pressione di aria pulsante

UNI EN ISO 12572 Prestazione igrotermica dei materiali e dei prodotti per edilizia - Determinazione delle proprietà di trasmissione del vapore d'acqua

UNI ISO 7892 Edilizia. Prove di resistenza agli urti. Corpi per urti e metodi di prova

### **AAMA - ASTM**

AAMA 501.1 Metodi di test per pareti esterne - Test dinamico (laboratorio)

AAMA 501.2 - pareti esterne - Test di tubi

AAMA 501.4 e 501.6 - in regime statico per la valutazione di sistemi di facciate continue e di negozi soggetti a derive interstory indotte dal vento e sismiche e metodo di test dinamico consigliato per determinare la deriva sismica che causa la caduta del vetro da un sistema a parete

AAMA 501.5 - il ciclo termico di pareti esterne

ASTM E1105 - determinazione sul campo della penetrazione dell'acqua di finestre esterne, lucernari, porte e facciate continue, mediante differenza di pressione atmosferica statica uniforme o ciclica

ASTM E331-Permeabilità all'acqua di lucernari, porte e facciate continue in campo statico a differenza di pressione

ASTM E283 - Permeabilità all'aria attraverso finestre esterne, facciate continue e porte in presenza di differenze di pressione specificate sul campione

ASTM C 1521 - valutazione dell'adesione dei giunti sigillanti resistenti agli agenti atmosferici.



## 8 - TESTING SUL PERFORMANCE MOCK-UP

### 8.1 - Esperienza di testing avanzato presso il Building Future Lab di Reggio Calabria

La cooperazione tra l'Università Mediterranea di Reggio Calabria tramite il suo laboratorio BFL - Building Future Lab e l'azienda AluK ha portato ad una serie di test condotti su un campione di facciata continua della serie SL50 della misura complessiva di 6025x8820 mm (lxh), costituito da:

- n. 20 parti fisse vetrate della misura di 1195x1335 mm;
- n.8 parti vetrate fisse della misura di 1195x1700 mm;
- n.1 anta apribile a sporgere misura 1195x1700 mm;
- n.1 anta apribile ad anta-ribalta da 1195x1700 mm.

Sono stati scelti per la combinazione montanti/traversi dei profili relativi alla struttura montante fissa il K760 (montante) e il K745 (traverso). Per gli elementi apribili sono stati selezionati riguardo la finestra a sporgere il K794 per stipite e K792 per battente e per la finestra anta a ribalta il K2098 stipite e K2097 battente. I vetri utilizzati sono stati un vetrocamera 4.4/16/3.3 (e/c/i) nelle ante fisse e nell'apribile a ribalta e una lastra aggiuntiva sfalsata interna di 22 mm nel pannello a sporgere. Si è provveduto a installare le guarnizioni di tenuta di tutte le ante e a staffare la facciata in linea nell'asse inferiore, mediano e superiore. Gli accessori quali maniglie e cremonesi sono state interamente prodotte e montate da AluK.



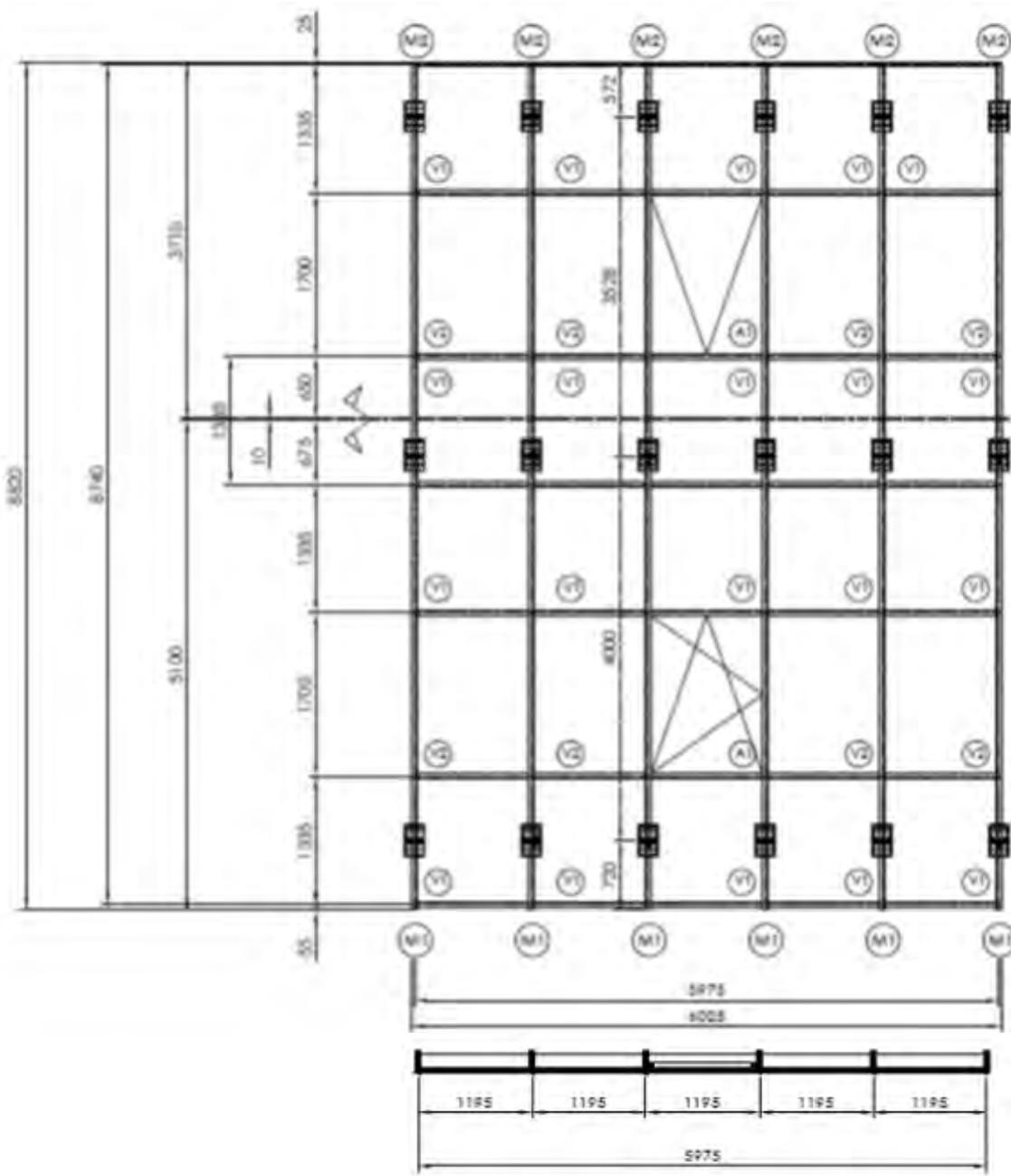
#### SL50

Sistema da 50mm a montanti e traversi studiato per poter realizzare facciate continue verticali e inclinate, a sviluppo piano o poligonale e semplici wintergarden



L'apparecchiatura impiegata per le prove eseguite, in conformità ai requisiti sopra citati, è stata composta da:

- una camera con apertura nella quale posizionare il campione di prova, dotata degli adeguati supporti strutturali rappresentativi a cui fissare il campione in conformità alle condizioni d'uso nelle opere;
- una struttura rigida in acciaio sulla quale vincolare il campione di prova;
- un dispositivo che permette di applicare al provino pressioni di prova negative e positive controllate;
- un dispositivo mediante il quale cambiamenti controllati rapidamente di pressioni di prova negative e positive possono essere prodotti entro limiti definiti;
- uno strumento per la misurazione delle pressioni di prova negative e positive applicate, fisse o fluttuanti, entro un'accuratezza del  $\pm 5\%$ ;
- uno strumento per la misurazione del flusso d'aria nella camera con accuratezza del  $\pm 5\%$  al fine di consentire la valutazione della quantità di permeabilità all'aria attraverso il provino con un'accuratezza del 10% della permeabilità all'aria ammessa attraverso il provino;
- un mezzo temporaneo di sigillatura dei giunti del provino;
- un sistema per creare uno strato continuo e costante di acqua sulla superficie esterna del campione con flusso pari a 3,4 l/m<sup>2</sup>min.;
- uno strumento che permette di controllare la quantità d'acqua proiettata con accuratezza del 10%;
- strumenti per la misurazione degli spostamenti con un'accuratezza di almeno  $\pm 0,1$  mm;
- un sistema di scolo per l'acqua proiettata che non interferisce con il drenaggio del campione;
- uno strumento per la misura di temperatura ed umidità relativa dell'ambiente;
- uno strumento per la misura della pressione atmosferica dell'ambiente.
- un'apparecchiatura per la produzione di aria calda e fredda, costituita da lampade ad infrarossi per scaldare il campione tramite irraggiamento e da un sistema di refrigerazione con aero-evaporatore;
- attuatori oleodinamici per gli spostamenti nel piano e fuori dal piano della facciata;
- un sistema di gestione, controllo degli impianti e acquisizione di tutti i parametri di prova.



Schema di facciata del mock-up AluK serie SL50

<b>COLLAUDI PRESTAZIONALI</b>	
<b>PROVE DI TENUTA – TIGHTNESS TEST</b>	
 <p>3940 x 7180</p>	
<b>Permeabilità all'aria</b> <i>Air permeability</i> <b>EN 12153 EN 12152</b>	<b>A4</b>
<b>Permeabilità all'aria elementi apribili</b> <i>Air permeability of openable parts</i> <b>EN 12207</b>	<b>4</b>
<b>Tenuta all'acqua</b> <i>Watertightness</i> <b>EN 12155 EN 12154</b>	<i>RE<sub>1500</sub></i>
<b>Resistenza al carico di vento di progetto</b> <i>Resistance to design wind load</i> <b>EN 12179 EN 13116</b>	<b>2000 Pa</b>
<b>Resistenza al carico di vento di sicurezza</b> <i>Resistance to safety wind load</i> <b>EN 12179 EN 13116</b>	<b>3000 Pa</b>
<b>Laboratorio e No. certificato</b> <i>Lab and test report No.</i>	<b>ITC-CNR 0970-CPD-RP0326</b> del 08.11.07

Collaudi prestazionali da catalogo AluK della serie SL50

Dalla relazione tecnica 0001/RT/19, rilasciata il 15/10/2019, a firma del Prof. Arch. Martino Milardi<sup>1</sup> quale responsabile della sezione TCLab del BFL, alla luce dei test su descritti, emergono i seguenti risultati:

#### APERTURA/ CHIUSURA

ASTM E283-04 (2012)

Standard Test Method for Determining Rate of Air Leakage Through Exterior Windows, Curtain Walls, and Doors Under Specified Pressure Differences Across the Specimen.

N. 5 cicli di parziale apertura/chiusura per rilascio delle guarnizioni

Test superato

#### PRECARICO

ASTM E330-02 (2010)

Standard Test Method for Structural Performance of Exterior Windows, Doors, Skylights and Curtain Walls by Uniform Static Air Pressure Difference.

Resistenza al vento con pressioni positive/negative al 50% del carico di vento di progetto (25,06 lbf/ft<sup>2</sup>, 1200 Pa)

Test superato

#### PERMEABILITA' ALL'ARIA

(pressione positiva e negativa)

ASTM E283-04 (2012)

Standard Test Method for Determining Rate of Air Leakage Through Exterior Windows, Curtain Walls, and Doors Under Specified Pressure Differences Across the Specimen.

Permeabilità con pressioni positive/negative (6.24 lbf/ft<sup>2</sup>, 299 pascal) dopo aver determinato le perdite del sistema

#### PARTI FISSE

Pressione:

0,00 < 0,06 CFM x ft<sup>2</sup>

Depressione: 0,01 < 0,06 CFM x ft<sup>2</sup>

#### ELEMENTI APRIBILI

<sup>1</sup> Martino Milardi. Professore Associato presso l'Università Mediterranea di Reggio Calabria, Italy

Pressione serramento A:  $0,06 < 0,10 \text{ CFM} \times \text{ft}^2$

Pressione serramento B:  $0,10 = 0,10 \text{ CFM} \times \text{ft}^2$

Depressione serramento A:  $0,08 < 0,10 \text{ CFM} \times \text{ft}^2$

Depressione serramento B:  $0,06 < 0,10 \text{ CFM} \times \text{ft}^2$

Test superato

#### TENUTA ALL'ACQUA SOTTO PRESSIONE STATICA

ASTM E331-00 (2009)

Standard Test Method for Water Penetration of Exterior Windows, Skylights, Doors, and Curtain Walls by Uniform Static Air Pressure Difference.

Applicazione sul campione per 15 minuti di una pressione statica di  $12 \text{ lbf/ft}^2$  (pounds per square foot),  $575 \text{ Pa}$  e una quantità di acqua pari a 5

U.S. gallons per square foot in an hour (=  $3.4 \text{ l/min m}^2$ )\*

Nessuna infiltrazione d'acqua

Test superato

#### TENUTA ALL'ACQUA IN CONDIZIONI DINAMICHE

AAMA 501.1-05-00

(2007)

Standard Test for Water Penetration Of Windows, Curtain Walls and Doors Using Dynamic Pressure.

Applicazione sul campione per 15 minuti di una pressione dinamica pari a  $31,5$



lbf/ft<sup>2</sup> (pounds per square foot), 1508 Pa e una quantità d'acqua pari a 5 U.S. gallons per square foot in an hour (= 3.4 l/min m<sup>2</sup>)

Nessuna infiltrazione d'acqua

Test superato

#### PRESTAZIONE STRUTTURALE

ASTM E330 - 02 (2010)

Standard Test Method for Structural Performance of Exterior Windows, Doors, Skylights and Curtain Walls by Uniform Static Air Pressure Difference.

Applicazione del carico con pressioni positive/negative al 50% e 100% del carico di vento di progetto ( $\pm 25,06$  lbf/ft<sup>2</sup>,

$\pm 1200$  Pa -  $\pm 50,12$  lbf/ft<sup>2</sup>,

$\pm 2400$  Pa) MONTANTI

Montante A (I solaio):

P. positiva L/265 < L/175

P. negativa L/260 < L/175 Montante A (II solaio):

P. positiva L/240 < L/175

P. negativa L/268 < L/175 Montante B (I solaio):

P. positiva L/258 < L/175

P. negativa L/258 < L/175 Montante B (II solaio):

P. positiva L/259 < L/175

P. negativa L/263 < L/175

#### TRAVERSO

P. positiva L/2762 < L/254

P. negativa L/1726 < L/254

Test superato

#### CICLI TERMICI AAMA 501.5-07

Test Method for Thermal Cycling of Exterior Walls. n. 3 cicli sono stati condotti ad una

temperatura compresa tra - 15 ° C and + 80 ° C

Test superato



"RACKING TEST" SU CAMPIONE IN SCALA REALE AAMA 501.4-00 -  
Recommended Static Testing Method for Evaluating Curtain Wall and Storefront  
Systems Subjected to Seismic and Wind Induced Interstory Drift.

n. 3 cicli sono stati condotti con un'ampiezza di spostamento pari a  $\pm$   
1,97 in ( $\pm$ 50 mm)

Test superato

RIPETIZIONE APERTURA/ CHIUSURA

ASTM E283-04 (2012) N. 5 cicli di parziale apertura/chiusura per rilascio  
delle guarnizioni

Test superato

RIPETIZIONE PRECARICO

ASTM E330-02 (2010)

Resistenza al vento con pressioni positive/negative al 50% del carico di vento  
di progetto (25,06 lbf/ft<sup>2</sup>, 1200 Pa)

Test superato

RIPETIZIONE PERMEABILITA' ALL'ARIA

(pressione positiva e negativa)

ASTM E283-04 (2012)

Permeabilità con pressioni positive/negative (6.24 lbf/ft<sup>2</sup>, 299 pascal) dopo  
aver determinato le perdite del sistema

PARTI FISSE

Pressione:

$0,00 < 0,06 \text{ CFM} \times \text{ft}^2$

Depressione:

$0,01 < 0,06 \text{ CFM} \times \text{ft}^2$

ELEMENTI APRIBILI

Pressione serramento A:  $0,06 < 0,10 \text{ CFM} \times \text{ft}^2$

Pressione serramento B:  $0,08 < 0,10 \text{ CFM} \times \text{ft}^2$

Depressione serramento A:  $0,10 = 0,10 \text{ CFM} \times \text{ft}^2$

Depressione serramento B:  $0,06 < 0,10 \text{ CFM} \times \text{ft}^2$

Test superato

RIPETIZIONE TENUTA ALL'ACQUA SOTTO PRESSIONE STATICA

ASTM E331-00 (2009) Applicazione sul campione per 15 minuti di una pressione statica di 12 lbf/ft<sup>2</sup> (pounds per square foot), 575 Pa e una quantità di acqua pari a 5

U.S. gallons per square foot in an hour (= 3.4 l/min m<sup>2</sup>)\*

Nessuna infiltrazione d'acqua

Test superato

RIPETIZIONE TENUTA ALL'ACQUA IN CONDIZIONI DINAMICHE

AAMA 501.1-05-00

(2007) Applicazione sul campione per 15 minuti di una pressione dinamica pari a 31,5 lbf/ft<sup>2</sup> (pounds per square foot), 1508 Pa e una quantità d'acqua pari a 5 U.S. gallons per square foot in an hour (= 3.4 l/min

m<sup>2</sup>)

Nessuna infiltrazione d'acqua

Test superato

PRESTAZIONE STRUTTURALE IN CONDIZIONI DI CARICO DI VENTO DI PROGETTO E CARICO DI VENTO AUMENTATO

ASTM E330 - 02 (2010) Applicazione del carico con pressioni positive/negative al 100% e 150% del carico di vento di progetto ( $\pm 50,12$  lbf/ft<sup>2</sup>,  $\pm 2400$  Pa -  $\pm 75,18$  lbf/ft<sup>2</sup>,

$\pm 3600$  Pa)

Test superato

"CRESCENDO TEST" SU CAMPIONE IN SCALA REALE

AAMA 501.6-01 -

Recommended Dynamic Test Method for Determining the Seismic Drift Causing Glass Fallout from a Wall System.

"Crescendo Test" con ampiezza di spostamento pari a

$\pm 4,72$  in ( $\pm 120$  mm)

Alla fine del test, i componenti del campione quali i pannelli di tamponamento, fermavetri e copertine decorative sono rimasti saldamente agganciati, alcune guarnizioni sono fuoriuscite dalla sede per porzioni limitate

Test superato



## 9 - TESTING SUL DIGITAL MOCK-UP

Lo studio proposto ha raggiunto la necessità di una modellazione digitale al fine di sviluppare un DMU Digital Mock-Up del campione fisico sottoposto ai test di laboratorio. E' stato pertanto creato un modello digitale mediante una versione di prova del software di modellazione REVIT Autodesk. Quest'ultimo è stato scelto per la propria compatibilità con il software utilizzato successivamente per le specifiche prove CFD.

Modellare una facciata con software parametrici quale REVIT dà la possibilità al progettista di creare modelli BIM adattabili e ricchi di informazioni tanto geometriche quanto prestazionali. Ciò ha consentito nel caso in esame di selezionare rapidamente i tipi di montanti e traversi tra le "famiglie BIM" della serie AluK SL50. La gamma di modelli BIM digitali di AluK contengono le caratteristiche meccaniche e fisiche dell'alluminio realmente utilizzato e rappresentano un ausilio nella redazione di progetti più o meno complessi di facciate di questo tipo. Successivamente alla fase di modellazione della geometria della facciata, il modello è stato portato su CFD Autodesk, software per la simulazione degli effetti della fluidodinamica sullo stesso.

In particolare i casi seguenti sono riferibili a test eseguiti mediante la ricostruzione digitale di una galleria del vento, per analizzare la distribuzione delle pressioni sulla facciata e il comportamento dei moti d'aria generati intorno alla stessa.

Il caso in esame A ha riguardato la simulazione di un vento ad una velocità di 30 km/h, corrispondente alla classe 4 della scala di Beaufort (pagine seguente). Il caso B invece è riferibile ad un vento superiore alla classe 12 ed equiparabile a quello di un uragano americano di 200 km/h.

Lo sviluppo di questa sperimentazione può articolarsi perciò in fasi distinte:

- MODELLAZIONE BIM DELLA SERIE SL50 PRODOTTA DA ALUK
- MODELLAZIONE ED ELABORAZIONE CFD
- RISULTATI CFD

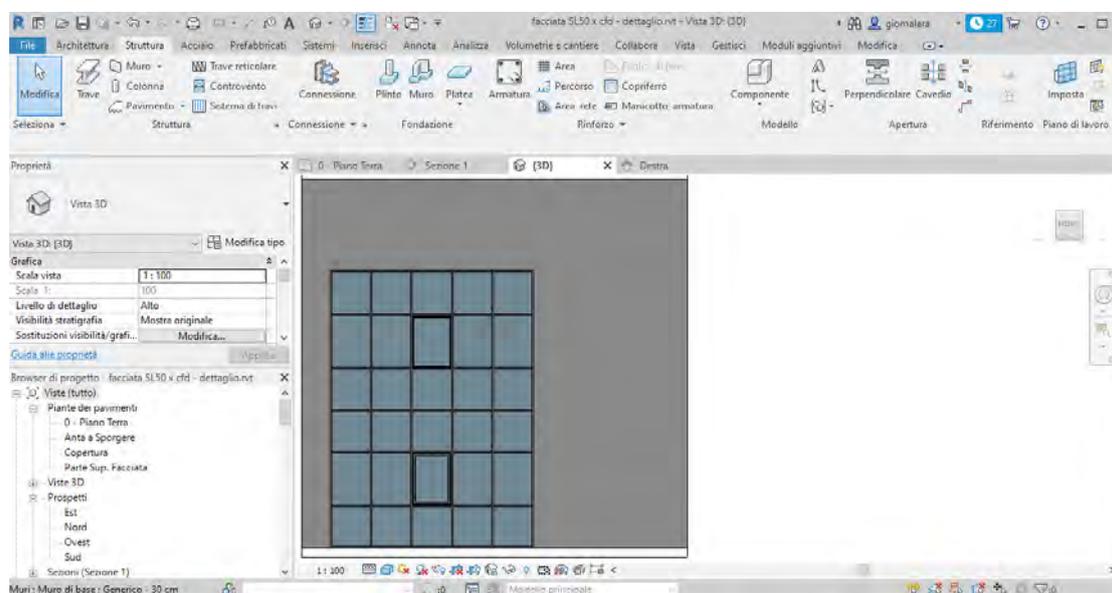
Scala Beaufort	Velocità del vento		Pressione	
	km/ore	m/secondi	kgf/m <sup>2</sup>	Pascal (N/m <sup>2</sup> )
4	30	8.3	4.3	42
5	35	9.7	5.9	58
6	45	12.5	9.5	93
7	55	15.3	14.5	142
8	65	18.1	20.5	200
9	80	22.2	31.0	304
10	95	26.4	43.5	426
11	110	30.3	57.5	563
12	120	33.3	69.0	676
	130	36.1	81.0	793
	140	38.9	94.5	926
	150	41.6	108.0	1058
	160	44.4	123.0	1200
	170	47.2	139.0	1362
	180	50.0	156.0	1528
	190	52.8	174.0	1705
	200	55.5	193.0	1891
	210	58.2	212.0	2080
	220	61.1	228.0	2295
	230	63.9	256.0	2510
	240	66.7	278.0	2730
	250	69.4	310.0	2950

*Classificazione del vento e conversione in pressioni dinamiche secondo la scala Beaufort.*

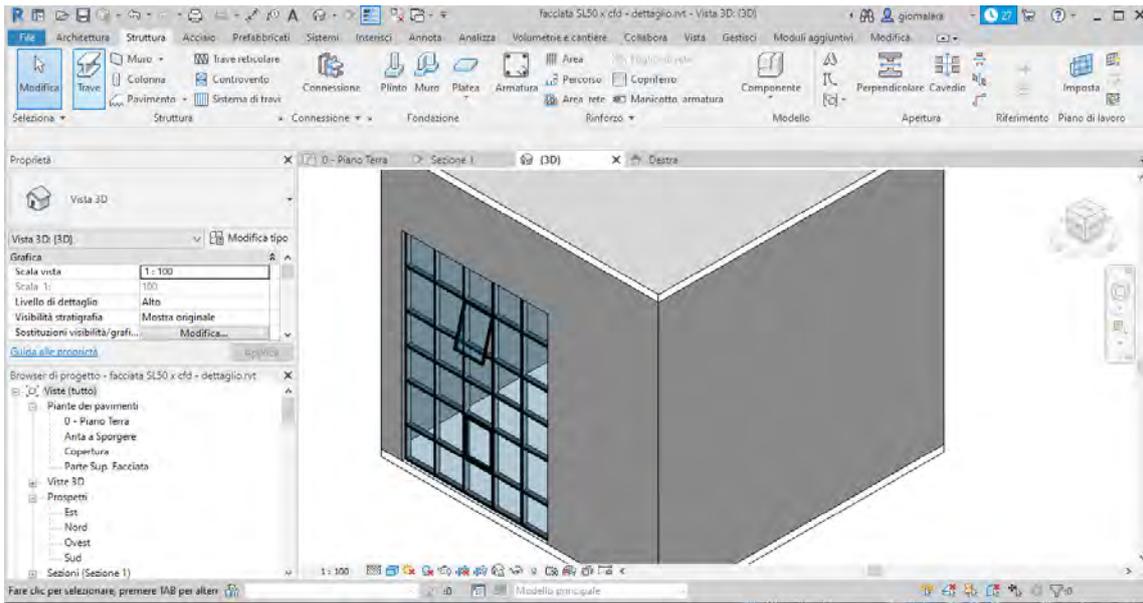
## 9.1 - Modellazione BIM della facciata AluK SL50

Tramite il software REVIT Autodesk si è realizzato un modello digitale parametrico della facciata tipo montanti/traversi della serie AluK SL50. Come detto, il vero valore aggiunto di software capaci di modellazione BIM come questo, risiede nella capacità di creare famiglie di prodotti, informatizzate e parametriche. Dal catalogo tecnico della serie prodotta dall'azienda, è stato ricreato un modello as-built con le medesime condizioni di tipo geometriche e materiche della facciata testata presso il BFL.

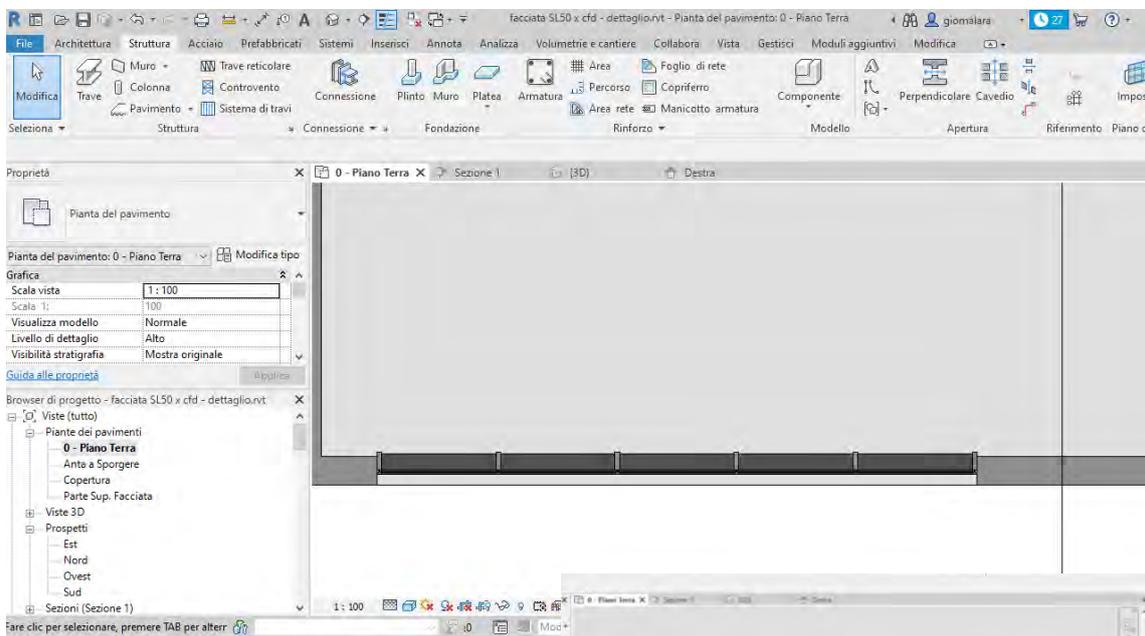
Si è modellato pertanto un sistema di facciata composto da n. 20 ante fisse della misura di 1195x1335 mm, n. 8 ante fisse da 1195x1700 mm, n. 1 anta apribile a sporgere da 1195x1700 mm, n.1 anta-ribalta da 1195x1700 mm.



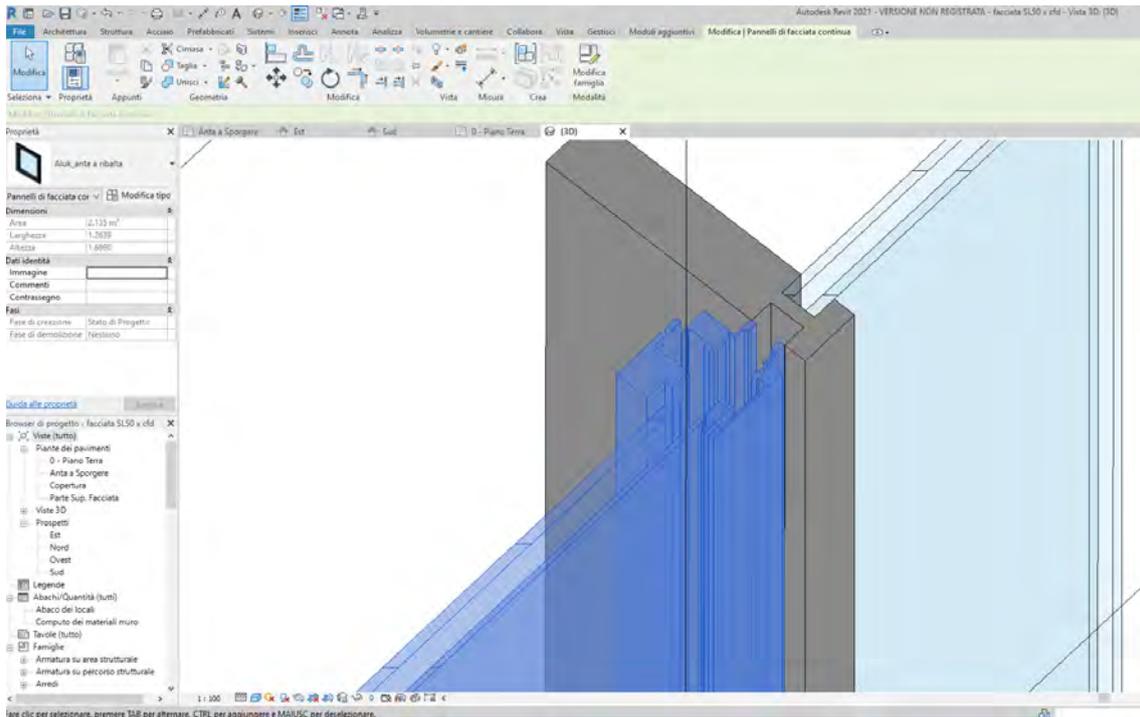
*Prospetto frontale del modello in esame. Immagine dell'autore*



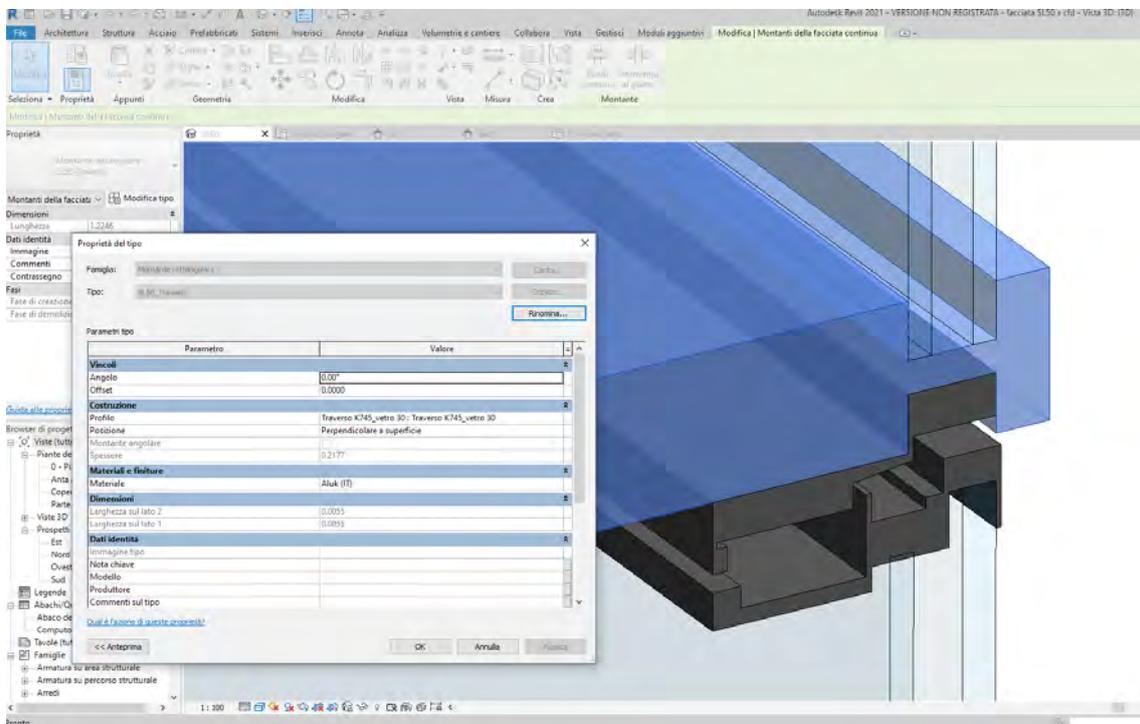
*Vista assometrica del modello in esame. Immagine dell'autore*



*Vista di pianta del modello e dettaglio del vetrocamera. Immagine dell'autore*

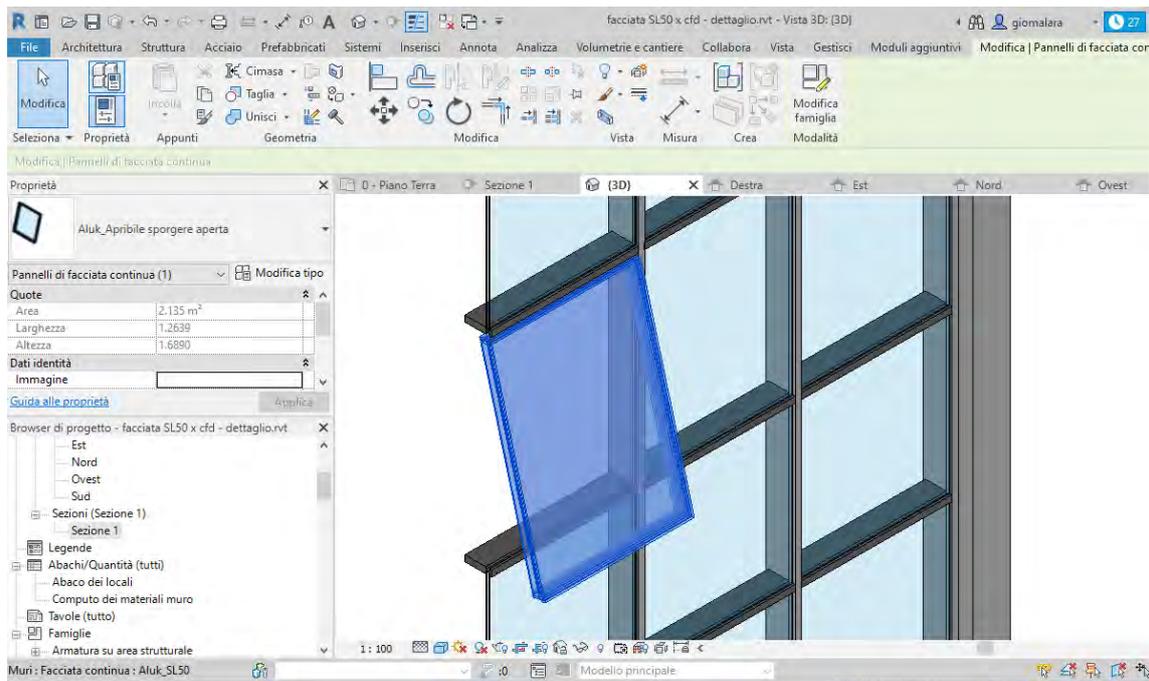


Modellazione dell'anta-ribalta. Vista di sezione assometrica orizzontale in dettaglio.  
Immagine dell'autore



Modellazione dell'anta a sporgere chiusa. Vista di sezione assometrica verticale.  
Vista dei settaggi relativi ai parametri geometrici e materici inseriti nel modello.

La facciata su descritta è stata genericamente modellata su una parete delle dimensioni di 12x12 m, ed è stata volutamente modellata con l'anta apribile a sporgere aperta di 15° per valutarne le dinamiche di distribuzione e di calcolo del flusso nella fase successiva CFD.

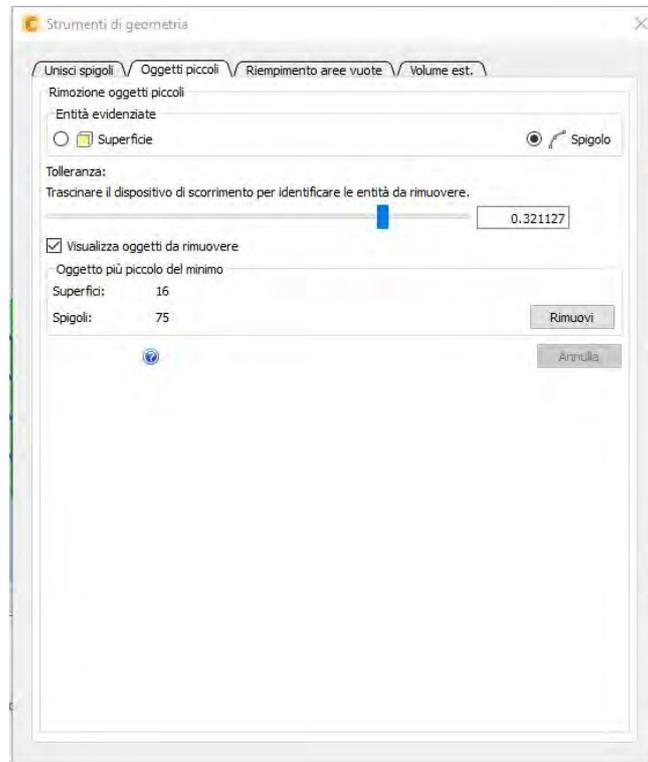


*Modellazione dell'anta a sporgere aperta. Vista di sezione assometrica verticale.  
Immagine dell'autore*

## 9.2 - Modellazione ed elaborazione CFD

La seconda fase ha riguardato il trasferimento del modello dal software di modellazione a quello di calcolo CFD per le simulazioni previste, eseguite tramite CFD Autodesk con licenza studenti. Il passaggio tra i due software, stante siano della stessa software-house, ha rivelato alcuni limiti. Il primo è quello che i due software non dialogano in formato \*.ifc, neanche con dei plug-in specifici. Per questa ragione il file è stato esportato da Revit in formato \*ACIS e importato così nel CFD. La seconda problematica rilevata durante l'esportazione è che non è possibile nel CFD ruotare l'UCS, perciò è servito ribaltare l'oggetto dal programma di modellazione per giustificare il sistema di coordinate cartesiane sul corretto orientamento. Al di là di queste limitazioni di compatibilità, superabili con l'avvento di nuove versioni e mediante software più idonei alla modellazione di componenti meccaniche come Inventor, l'incapacità di lettura di file \*.ifc (lo standard BIM) annulla il trasferimento delle informazioni materiche e fisiche impostate sul modello operativo. Per la simulazione oggetto del presente studio si è scelto di condurre il test dapprima su una facciata applicata ad un edificio tipo, dalla forma cubica delle dimensioni di 12 x12x12 m. In seguito si è eseguito un test approfondito escludendo le pareti, in modo da verificarne gli effetti sulla sola facciata.

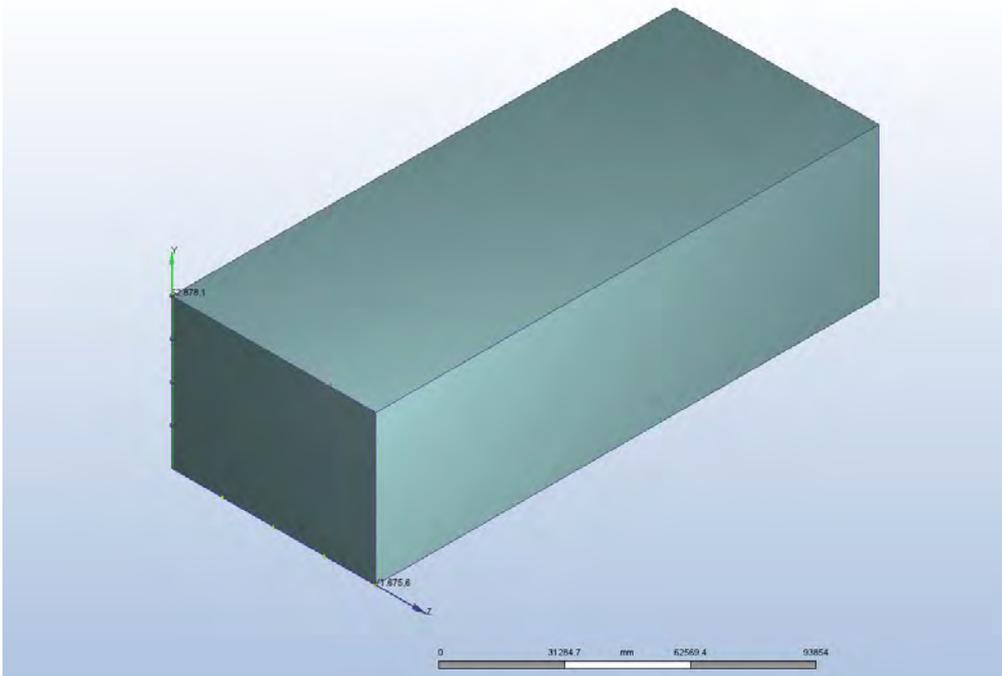
Importato il file sul software CFD è stato fatto un controllo automatico della conversione del file e della corretta modellazione in virtù di possibili interferenze. Vengono infatti individuati spigoli e geometrie da eliminare causate da sovrapposizioni di volumi o eventuali disallineamenti.



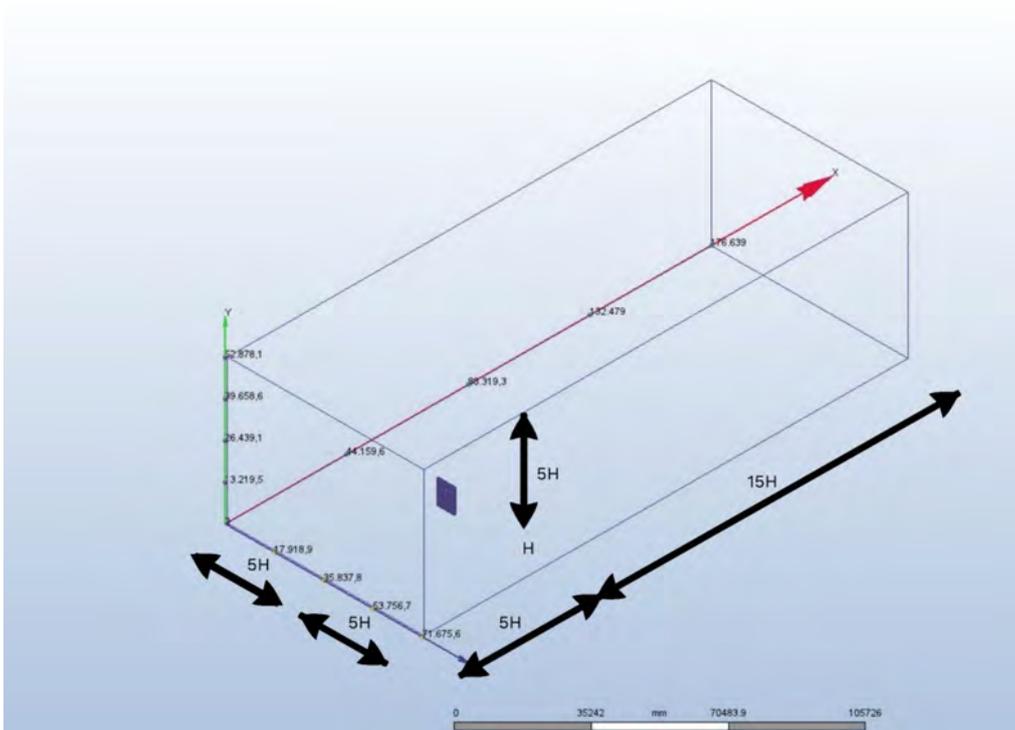
Impostazioni di importazione della geometria su Autodesk CFD. Immagine dell'autore

Successivamente a questo passaggio si è creato un volume esterno che rappresenterà il campo di esame della prova. Il dimensionamento del volume di dominio computazionale è stato costruito con una profondità dall'oggetto di 15 volte  $h$ , una distanza anteriore e in entrambi i lati dell'oggetto di  $5h$ , ed un'altezza complessiva di  $6h$ .<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Si veda Lukiantchuki M.A., Shimomura A.P., et al. (2018). Evaluation of CFD simulations with wind tunnel experiments: pressure coefficients at openings in sawtooth building. Acta Scientiarum. Technology, vol. 40

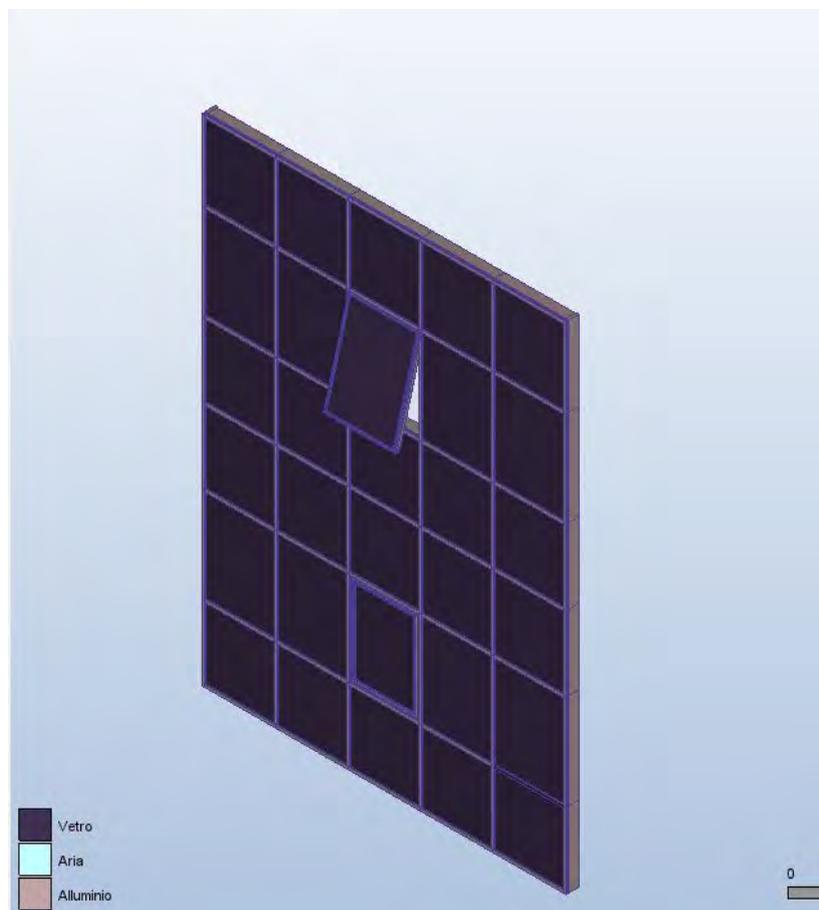


Costruzione del volume esterno al modello su Autodesk CFD. Immagine dell'autore



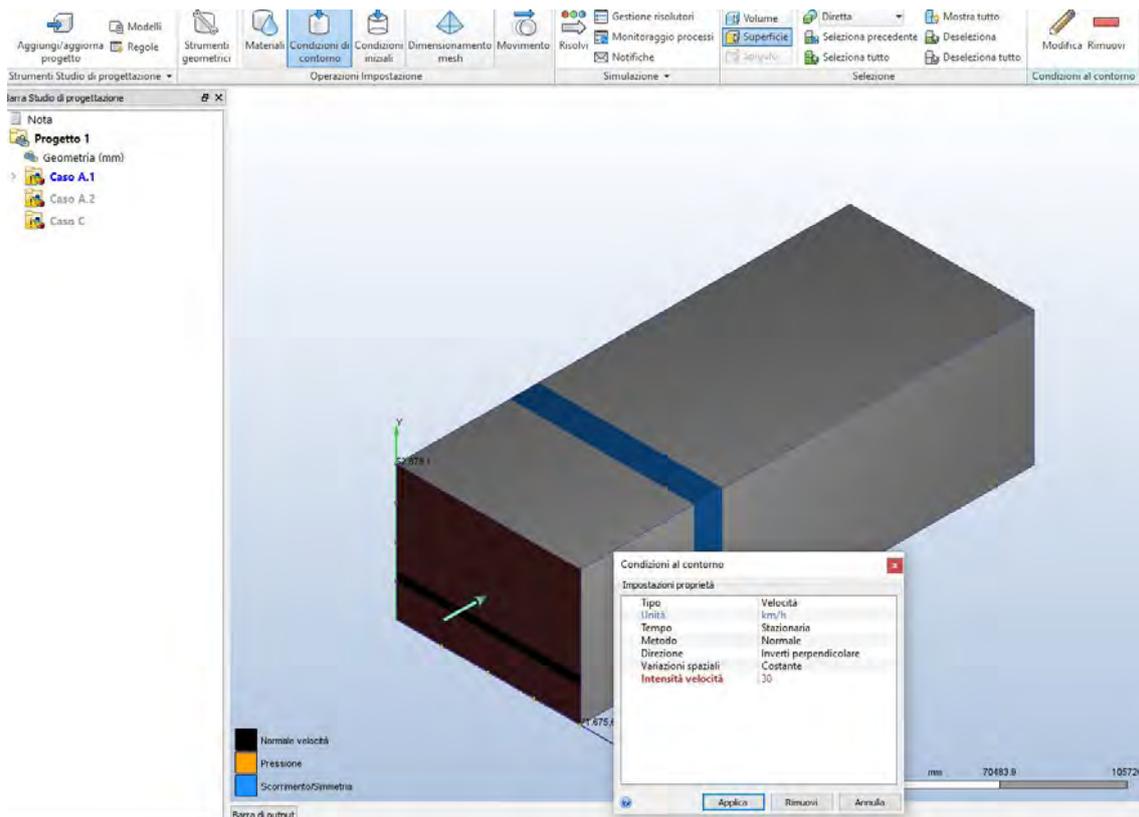
Dimensionamento del volume esterno al modello su Autodesk CFD. Immagine dell'autore

In seguito, come anticipato, sono stati applicati i materiali alle parti della facciata ed in particolare è stato conferito al volume esterno un materiale di tipo fluido d'aria con le caratteristiche dell'ambiente scenario, e cioè una pressione atmosferica di 99,8 kPa e una temperatura ambientale di 12,1 °C, riportando così i medesimi dati ambientali constatati nei giorni delle prove eseguite al Building Future Lab sul mock-up fisico. Si è proceduto impostando i materiali sugli altri volumi, raggruppando in "Telaio alluminio" montanti, traversi, e telaio delle parti apribili, e in "pannelli vetrati" i vetrocamera, assegnando rispettivamente il materiale alluminio ai primi e vetro ai secondi. Si precisa che per le caratteristiche dei materiali assegnati in termini di conducibilità termica sono state lasciate genericamente quelle di default.



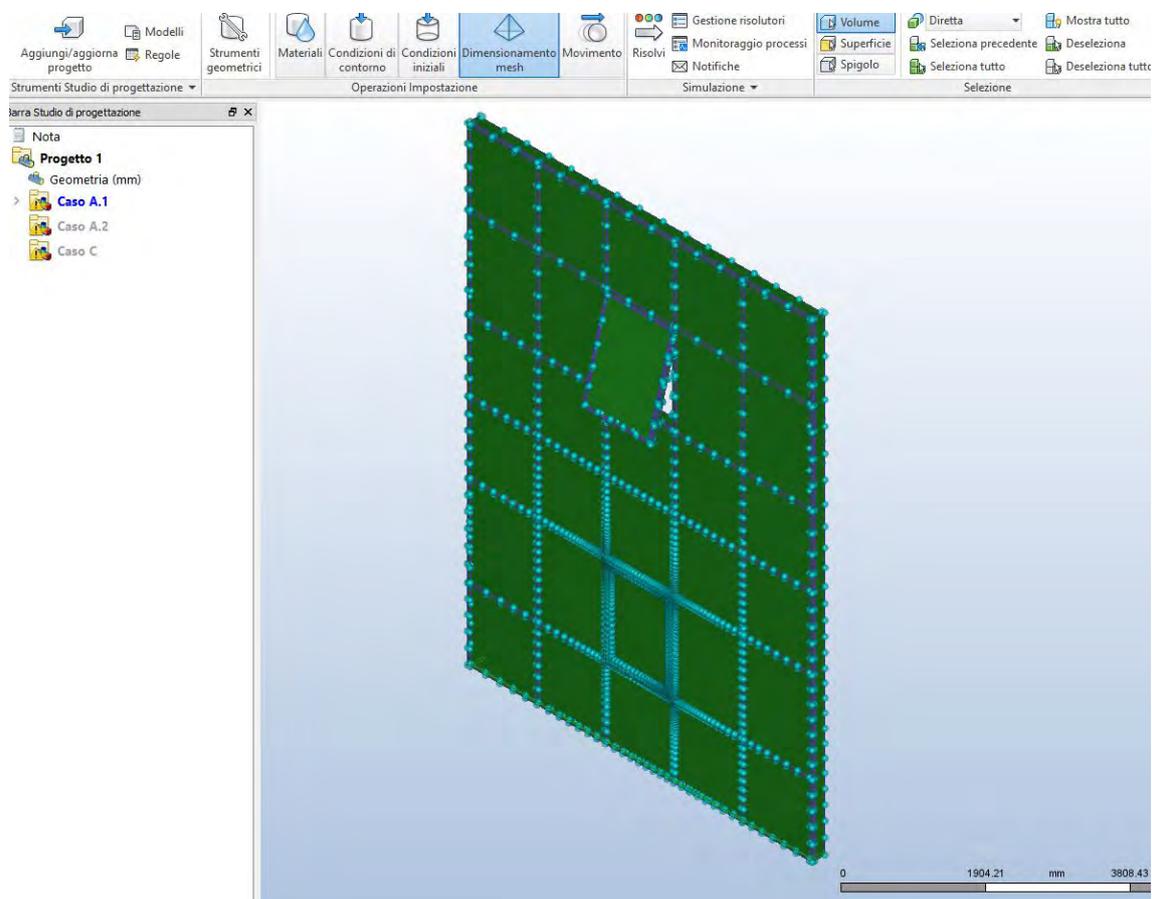
*Attribuzione dei materiali agli elementi del modello su Autodesk CFD. Immagine dell'autore*

Assegnati i parametri materiali alle parti del modello, sono state definite le condizioni al contorno, imponendo una velocità di 30 km/h per il caso A e 200 km/h in relazione al caso B, parallele al fronte della facciata ed una pressione di 0 Pa relativa sul lato opposto in entrambi i casi. Alle superfici laterali e a quella superiore è stata definita una condizione al contorno di simmetria/scorrimento.



*Definizione delle condizioni al contorno applicate su Autodesk CFD. Immagine dell'autore*

Il passaggio successivo è stato quello della meshing, cioè una divisione del dominio di interesse del flusso in piccole regioni di controllo, unite così tramite nodi. Il software auto-dimensiona queste celle e ridefinisce alla luce di ciò le superfici discretizzando il campo di flusso e risolvendo le risultanti del sistema di equazioni algebriche in ciascun nodo. Quello del dimensionamento delle mesh è un passo cruciale in quanto più sono precise e quindi piccole più il calcolo sarà dispendioso in termini temporali. In casi di calcoli di geometrie complesse, ad esempio quelle curve, è suggerito semplificare il dimensionamento delle mesh o affidarsi all'auto-dimensionamento.



*Meshing della facciata su Autodesk CFD. Immagine dell'autore*

Definite quindi le condizioni di progetto e di prova relative al nostro caso, si è proceduto con il calcolo computazionale, selezionando la prova in regime stazionario, non individuando un arco temporale preciso della simulazione. Riguardo al modello di turbolenza è stato selezionato il **K-omega SST**, ritenuto comunemente il più affidabile per l'analisi di questo tipo di geometrie<sup>1</sup>. A questo punto è stata attivata la risoluzione del calcolo da eseguire in 600 iterazioni.

<sup>1</sup> F.R. Menter, (1994). *Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications*, in *AIAA Journal*, vol. 32

## 9.3 - Risultati CFD

### CASO A

Il caso A è stato sperimentato in regime stazionario imponendo una velocità del vento a 30 km/h, corrispondenti a 42 Pa di pressione dinamica.

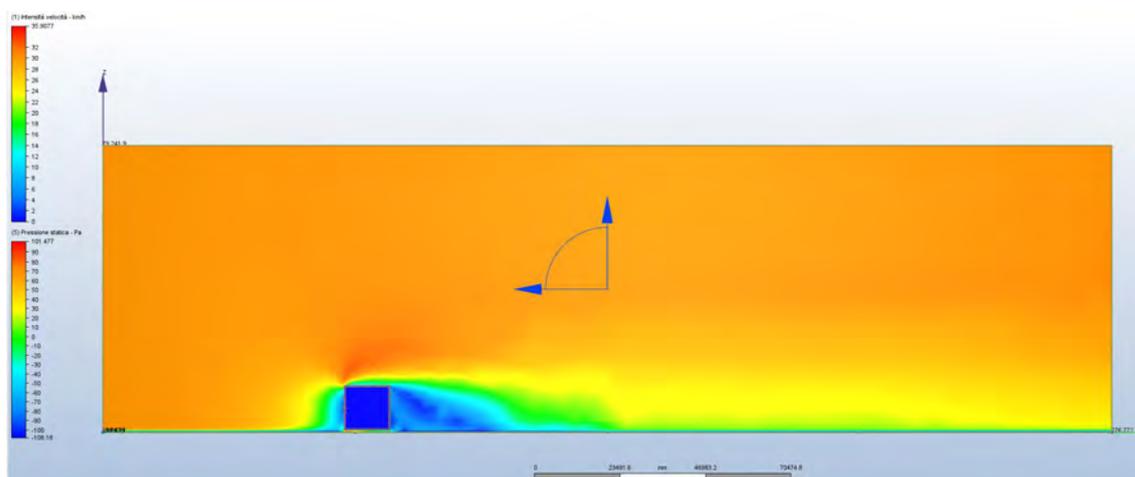


Fig. 1. Intensità della velocità attorno all'edifici . Sezione longitudinale del modello in corrispondenza dell'anta a sporgere. Immagine dell'autore

L'immagine proposta restituisce la simulazione dell'edificio inserito nel tunnel del vento virtuale. Come si può notare il vento a 30 km/h in direzione tangente alla facciata genera dal lato opposto all'edificio delle turbolenze che quasi azzerano il flusso d'aria. Il moto d'aria, in generale, ha una perdita di velocità attorno all'edificio che continua sul lato sottovento fino ad una distanza di oltre 15 volte la sua altezza. Come evidenziato in figura invece si ha un picco di accelerazione max di oltre 35 km/h in corrispondenza dello spigolo superiore del cubo, in direzione sopravvento, dovuto appunto all'impatto con il volume. Si nota che la pressione in facciata tende ad aumentare allontanandosi dal centro verso gli angoli, dove vi è un carico di pressione max superiore di circa 3 volte di quello nella media.

E' possibile misurare la pressione misurata sulla facciata in modo puntuale. La figura 2 dimostra che su un traverso selezionato la pressione media tot. è di 41,

63 Pa.

Le forze agenti nelle 3 direzioni rilevate dal software sono:

- Fx: -0,00012 Newton
- Fy: 2,55 Newton
- Fz: -0,00086 Newton

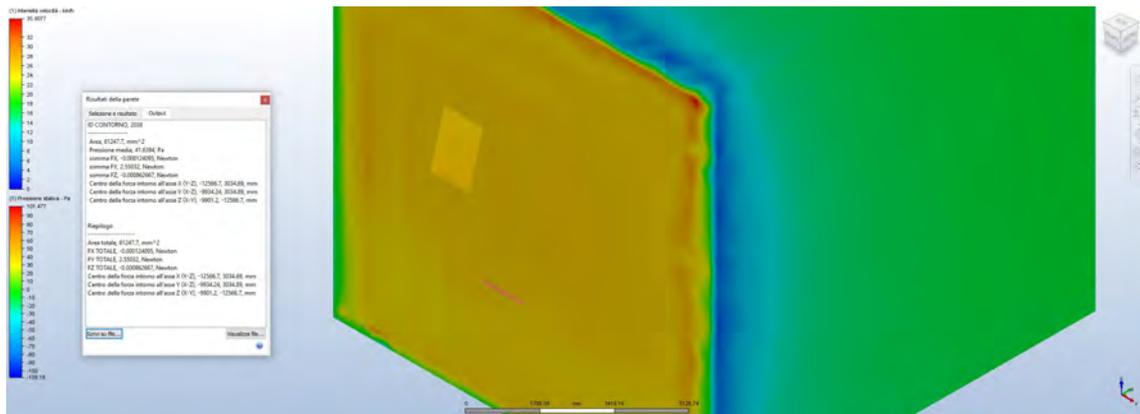


Fig. 2. Calcolo della pressione sulla superficie dell' edificio e selezione di un avverso. Vista assometrica. Immagine dell'autore



Fig. 3. Risultati di calcolo della pressione sul solo telaio in alluminio. Immagine dell'autore

Isolando le pareti ed esaminando la sola facciata, è stato condotto uno studio dei flussi d'aria più approfondito. Nel pannello a sporgere aperto l'aria entra ad una velocità tra 24 e 28 km/h (figg. 4 e 5), mentre la fig. 3 dimostra come il vento arrivi a circa 12 km/h in corrispondenza degli altri pannelli della facciata.

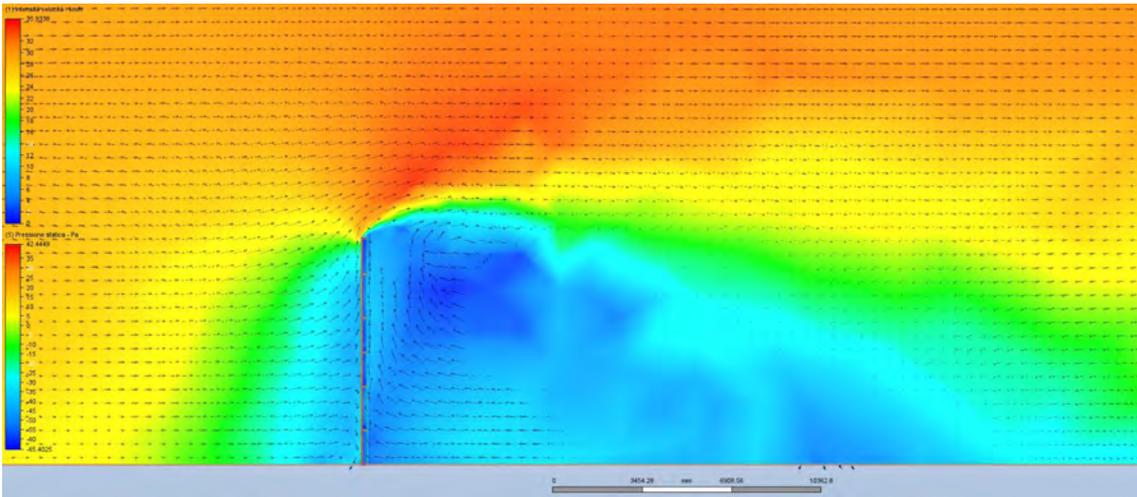


Fig. 3. Vento a 30 km/h. Studio dell'intensità di velocità applicata alla sola facciata. Sezione in corrispondenza del pannello fiss . Immagine dell'autore

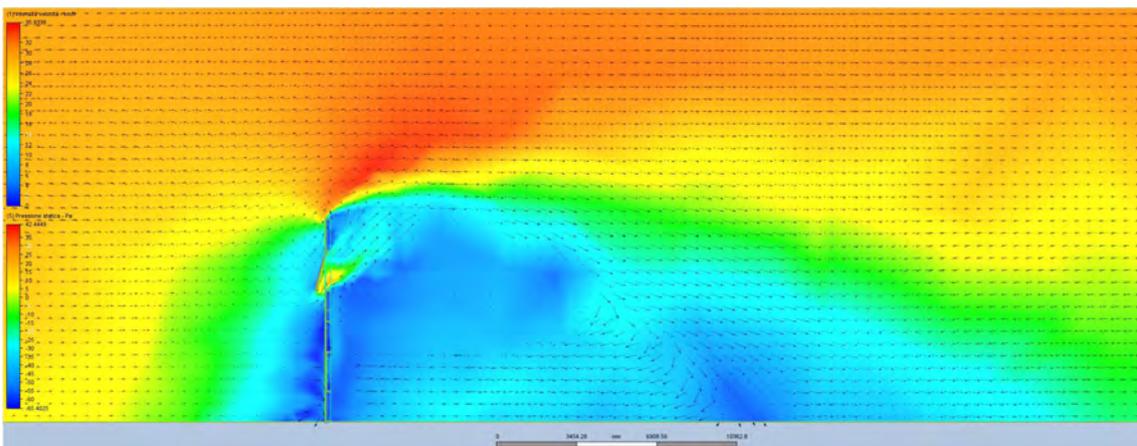


Fig. 4. Vento a 30 km/h. Studio dell'intensità di velocità applicata alla sola facciata. Sezione in corrispondenza del pannello a sporgere. Immagine dell'autore

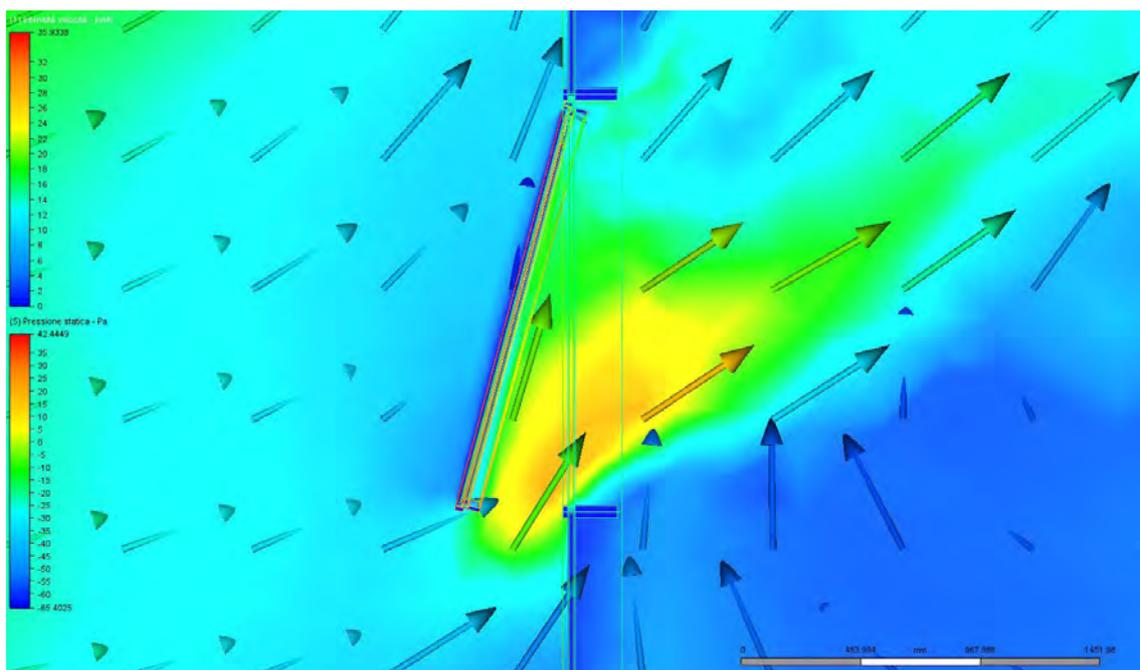


Fig. 5. Velocità in corrispondenza del pannello a sporgere aperto. Immagine dell'autore

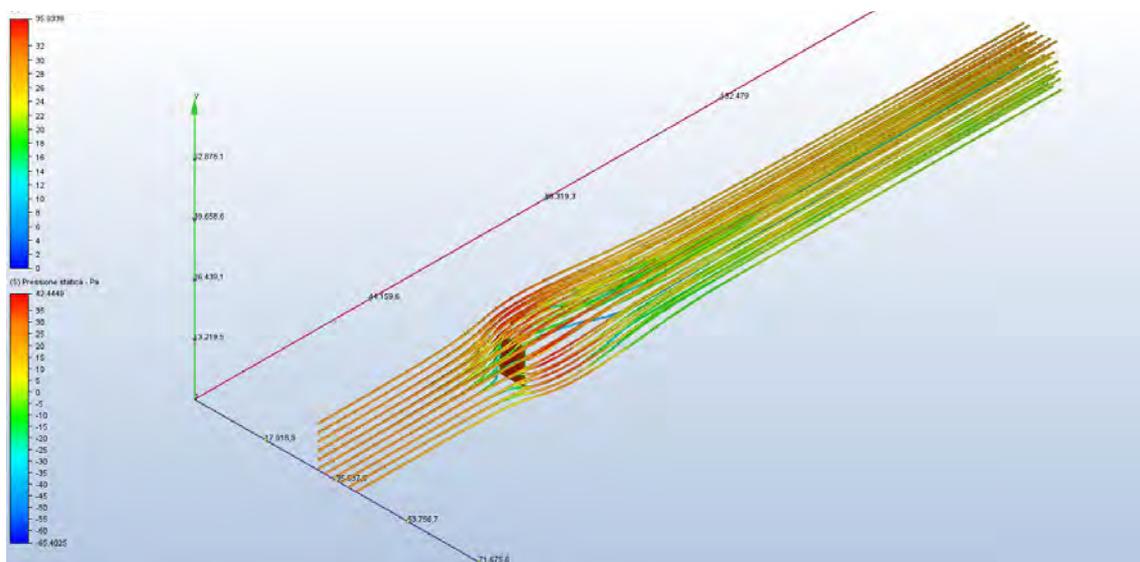


Fig. 6. Distribuzione del flusso d'aria intorno all'involucro. Immagine dell'autore

Anche sul modello della sola facciata, come mostrato precedentemente, può essere verificata la pressione su ogni punto, superficie o volume di ogni singolo elemento. Quanto detto è riportato in fig. 6, dove si riscontra che sul lato più esposto della facciata si raggiunge una pressione max di 42,44 Pa. Sul lato interno alla facciata, le turbolenze e i ricircoli d'aria arrivano ad una pressione negativa di oltre -18 Pa.

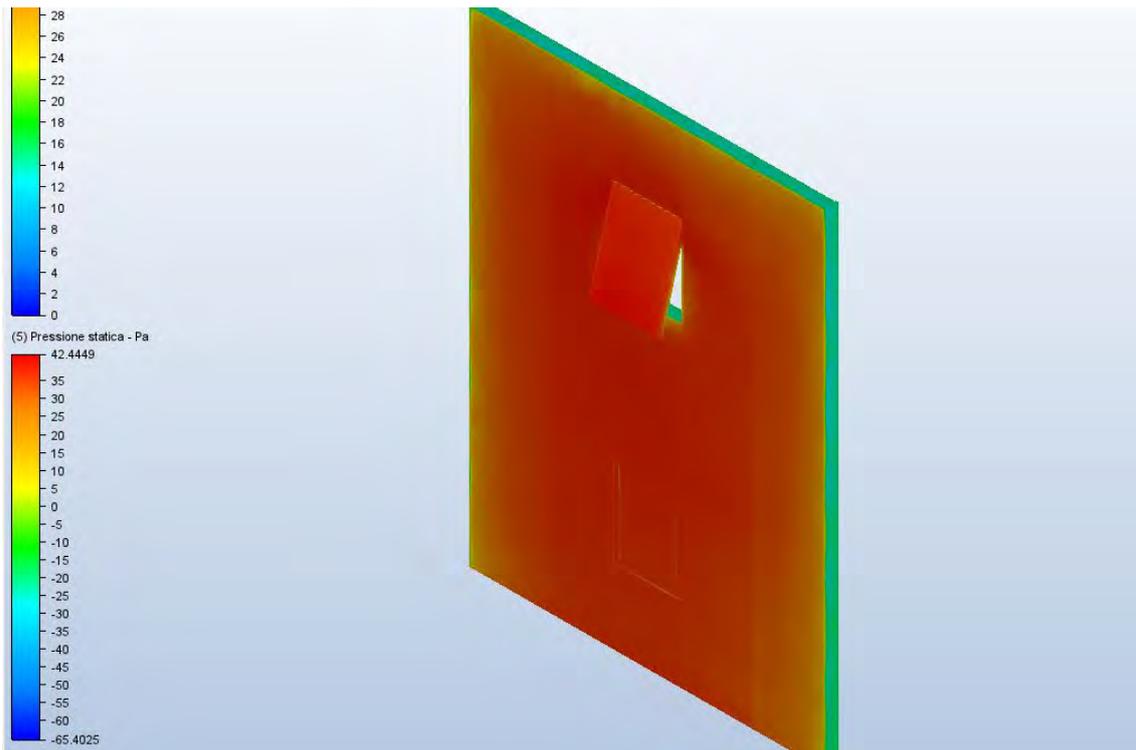


Fig. 6. Vento a 30 km/h. Pressione sul lato sopravvento della facciata. Immagine dell'autore

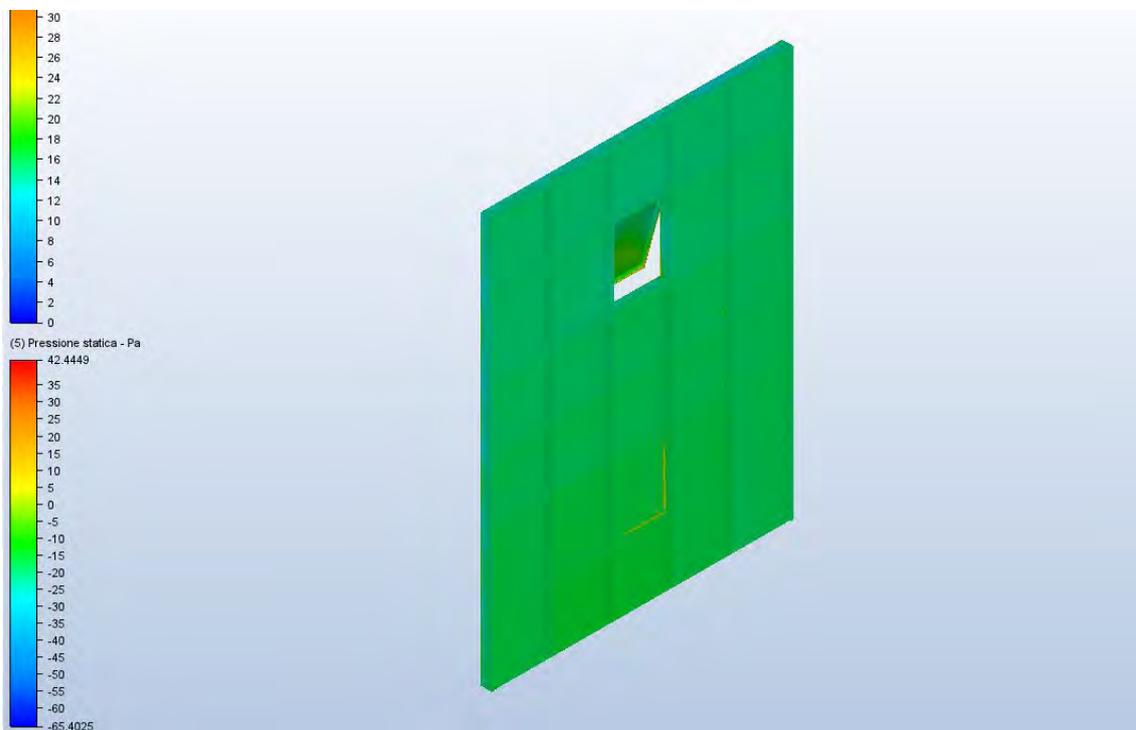


Fig. 7. Vento a 30 km/h. Pressione sul lato sottovento della facciata. Immagine dell'autore

## CASO B

Nel caso B il modello è stato sottoposto ad un vento della velocità di circa 200 km/h, perciò superiore alla 12sima scala massima della classificazione di Beaufort.

Il calcolo ha rilevato un andamento della velocità proporzionale rispetto al caso A. La velocità raggiunge un picco di oltre 200 km/h in prossimità del montante superiore. La velocità invece percepita sulla facciata sarà variabile tra i 60 e gli 80 km/h. Nel caso dello sporgere, la velocità penetra all'interno dell'edificio tra i 160 e i 200 km/h ca.

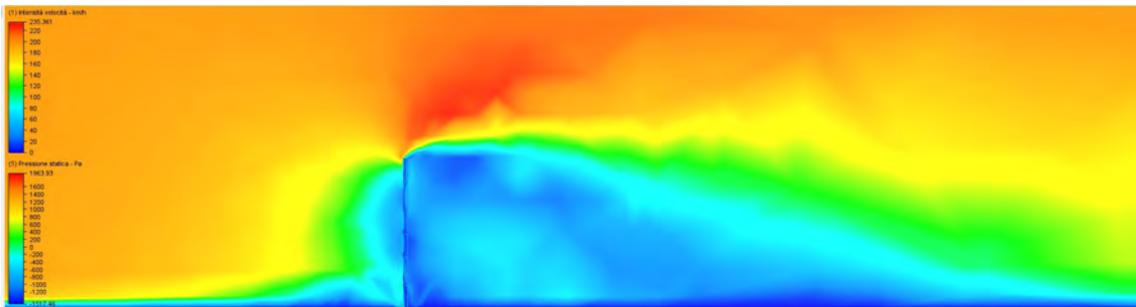


Fig. 8. Vento a 200 km/h. Studio dell'intensità di velocità applicata alla sola facciata. Sezione in corrispondenza del pannello fiss . Immagine dell'autore

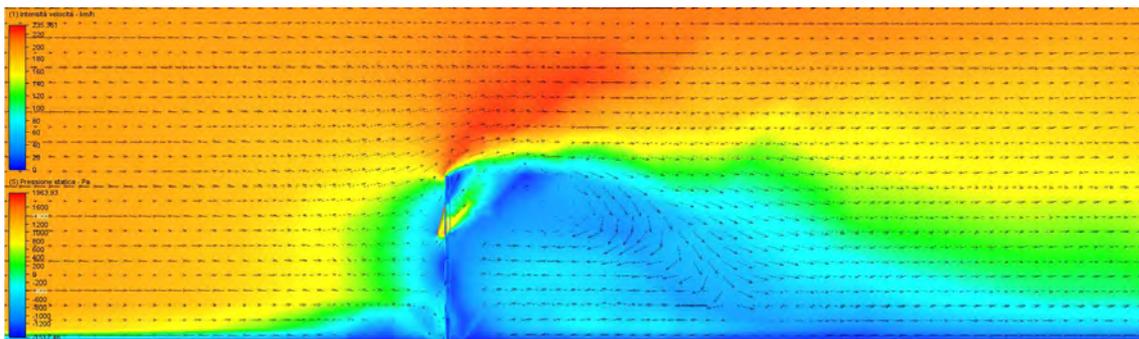


Fig. 9. Vento a 200 km/h. Studio dell'intensità di velocità applicata alla sola facciata. Sezione in corrispondenza del pannello a sporgere. Immagine dell'autore

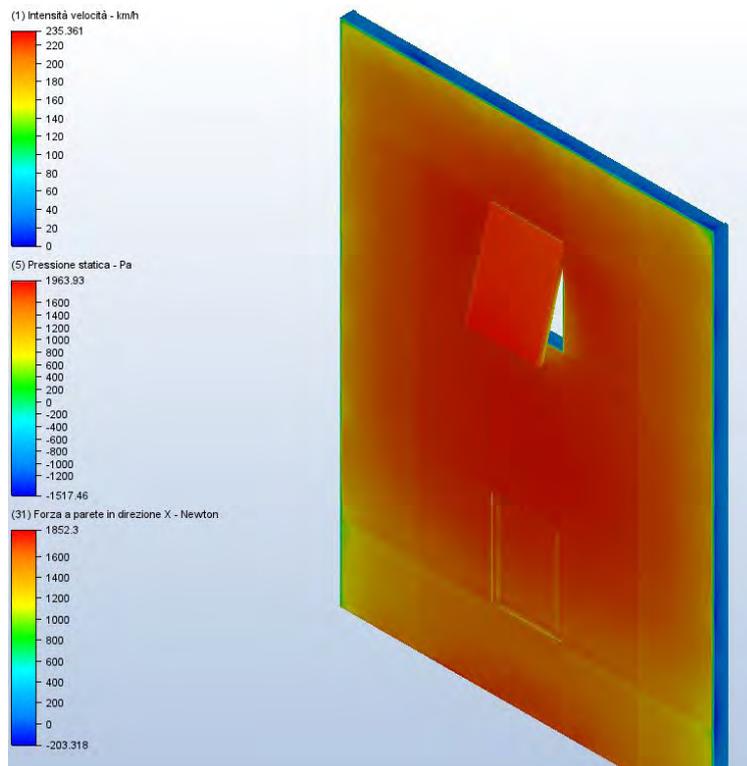


Fig. 10. Vento a 200 km/h. Pressione sul lato sopravvento della facciata. Immagine dell'autore

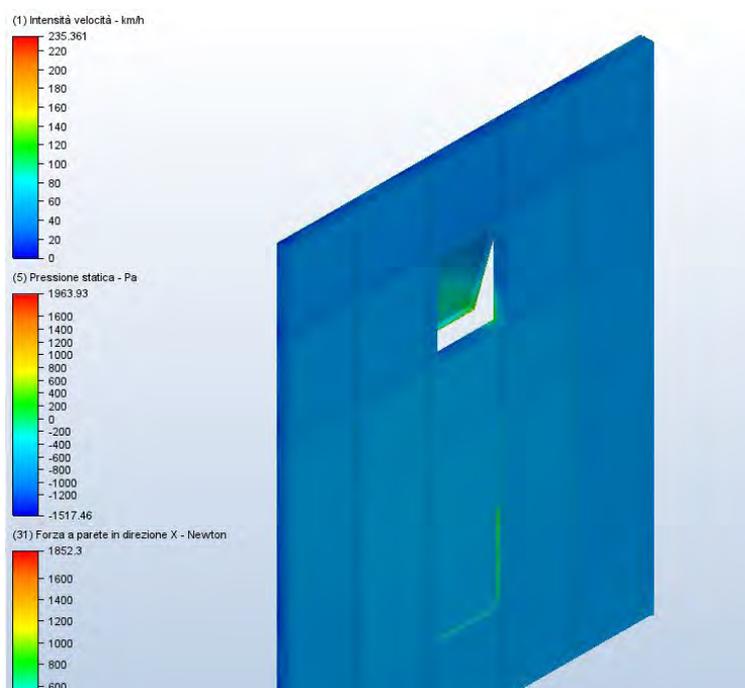


Fig. 11. Vento a 200 km/h. Pressione sul lato sottovento della facciata. Immagine dell'autore

La pressione max in questo caso è di 1963,93 Pa sulla superficie esposta in direzione del vento (fig. 10), mentre sul lato interno è in media di -758 Pa (fig. 11). Selezionando la stessa superficie del traverso preso in esame nel caso A (fig.12), la pressione risulta 1787,84 Pa. Gli sforzi sui tre assi invece hanno i seguenti valori:

Fx 109,501 Newton

Fy -0,047 Newton

Fz 0,0532 Newton

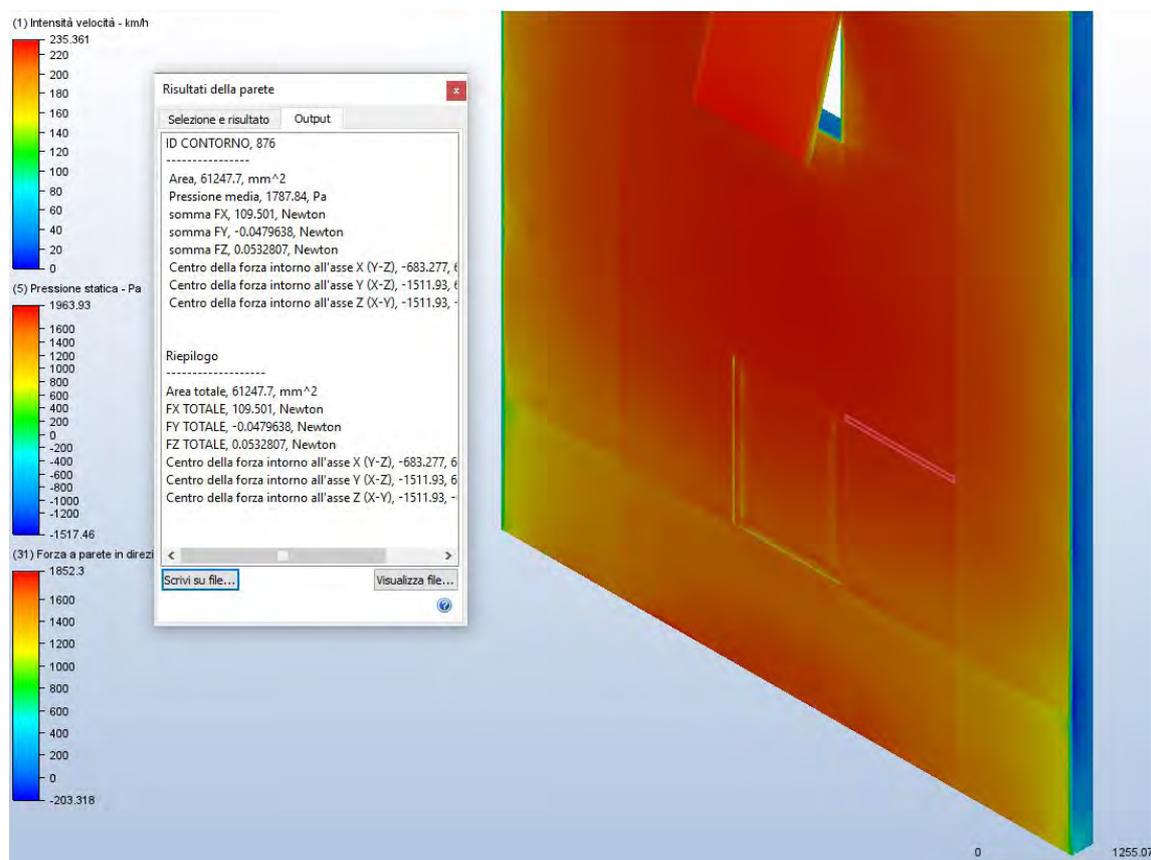


Fig. 12. Calcolo della pressione misurata sullo stesso traverso del caso A. Vista assonometrica. Immagine dell'autore



# CONCLUSIONI

La presente ricerca ricalca i futuri scenari di utilizzo della Fluidodinamica computazionale ed il caso in esame ne è solo una delle possibili applicazioni. Lo studio eseguito sui moti d'aria ha confermato che la CFD è decisamente efficace a scala urbana, modellando puntualmente le interferenze dello scenario di riferimento. Altrettanto indispensabile risulta essere in una scala di dettaglio sui singoli componenti edilizi, e l'esempio dell'anta a sporgere, volutamente considerata aperta durante la simulazione, ne è una testimonianza. In prospettiva, è possibile ricondurre le simulazioni ad una modellazione di dettaglio in scala reale degli involucri, nella loro conformazione assemblata e finanche alle simulazioni da condurre sui singoli componenti.

I risultati del test CFD sul Digital Mock-Up preso in esame non prevedono ad oggi una comparazione con i test condotti presso il Building Future Lab di Reggio Calabria, la cui risposta è paragonabile esclusivamente mediante una simulazione in galleria del vento, dotazione non ancora disponibile in laboratorio tra quelle annoverate. Tuttavia l'impiego della CFD sperimentata in questa ricerca aiuta a contribuire alla risposta scientifica rilasciata dal laboratorio e ne implementa perciò il campo di indagine, fornendo un report di maggiore approfondimento della serie SL50 prodotta da AluK.

Le uscite di questa tesi sono l'avvio di un metodo innovativo da utilizzare nel prossimo futuro anche nell'ottica di creare un parallelismo con i test effettuati in laboratorio e valutarne così il divario dei risultati. In linea generale, le seppur alte capacità di ricostruzione digitale dei modelli non hanno l'obiettivo di sostituire le prove in laboratorio, cui i prodotti comunque devono sottostare per obblighi normativi e nel principio cardine della certificazione delle proprie performance. Tuttavia, i test CFD sul prototipo digitale hanno la pretesa di affiancare il testing avanzato e ridurre magari il numero di prove preliminari. Ciò anticiperebbe senz'altro i difetti progettuali e le implicazioni durante tutto il ciclo di vita dell'involucro, che il testing avanzato convalida ma solo in condizioni di perfetta posa in opera e in scala limitata alle dimensioni della camera di prova.

La provenienza del metodo da settori lontani non prevede una calibrazione specifica per quello della progettazione architettonica, tale da permettere standard di calcolo ai fini delle normative.

La CFD si propone come prassi rivelatoria anche in campo aziendale, apportando innovazione tanto in termini di processo, quanto in quelli di prodotto. Osservando criticamente lo stato attuale dei processi di produzione di AluK è emerso che negli ultimi decenni sia stata affidata notevole attenzione alle metodologie di simulazione prestazionale dei propri prodotti. L'investimento di digitalizzazione in chiave BIM dei propri cataloghi è infatti di grandissimo supporto in fase progettuale, riconoscibile nei progetti di facciate contraddistinte da geometrie parametriche più complesse. Tuttavia, se da un lato questo recente investimento culturale ha dato spazio a un coinvolgimento dei propri prodotti in campo progettuale, dall'altro stenta a essere utilizzato nella fase esplorativa di indagine sperimentale di sistemi di facciata più complessi, dove l'utilizzo della Fluidodinamica Computazionale potrebbe indiscutibilmente registrare delle enormi potenzialità.

In primo luogo, la CFD consente ad Aluk di rivestire un ruolo di consulente attento ai luoghi di intervento di posa delle facciate. In secondo luogo, la CFD potrebbe essere d'ausilio nel verificare il comportamento dell'azione di moti ventilati nelle cavità della serie AluK FVM, e nella progettazione di sistemi di facciate a doppia pelle o ventilate. Ancor più comunemente la fluidodinamica computazionale darebbe un contributo notevole in fase di testing prestazionale realizzando un DMU - Digital Mock-Up, per calcolare con maggiore precisione trasmittanza termica e azione dei carichi su tutto lo sviluppo della superficie totale e non soltanto nei nodi critici, e con particolare riguardo alle condizioni al contorno del luogo di progetto, riducendo al contempo notevolmente tempi e costi di prototipazioni fisiche preliminari. Inoltre potrebbe portare alla nascita di nuovi sistemi di facciata con impiantistica integrata e a sistemi di monitoraggio attivi sull'involucro edilizio prodotto. In chiave futura si ritiene interessante realizzare una modellazione specifica di contesto in cui è collocato il Building Future Lab in modo tale da confrontare l'azione del vento su una facciata in real-time, misurate mediante l'ausilio di sensoristica integrata. In egual modo, sarebbe possibile mettere a confronto i risultati della prova strutturale eseguita in laboratorio con il modello digitale della facciata ALUK. costruito per la presente ricerca inserito in un calcolatore strutturale. Infatti, i risultati del modello CFD riportati non considerano gli spostamenti dovuti alla pressioni del vento, ma solo il comportamento che questo ha in base alle

superfici incontrate.

Ulteriore esito della ricerca è fornire indicazioni di massima ai progettisti circa l'iter da seguire per la costruzione di un tunnel del vento virtuale, dalla modellazione dell'oggetto di studio agli step successivi di calcolo CFD. Occorre sottolineare che il passaggio chiave risiede nell'impostazione delle condizioni al contorno del modello, da determinare volta per volta con la massima attenzione. I software qui utilizzati non hanno maturato una compatibilità piena e hanno riscontrato l'inadeguatezza di supporto al formato \*ifc, formato standard per la lettura delle informazioni in chiave BIM, cui si intende sottolinearne l'importanza.

Superando i limiti dello strumento, il valore aggiunto di questa metodologia è quello di monitorare il comportamento dei fluidi e di esaminare l'effetto della turbolenza su geometrie complesse tramite processori di calcolo abili a risolvere sistemi di equazioni di dimensioni enormi. Se supportata dal BIM consente di riprodurre fedelmente le condizioni reali dell'oggetto posto in esame.

In conseguenza di ciò, la CFD è estendibile a tutte le tipologie di involucri edilizi, di sistemi e materiali anche differenti da quelli in analisi, e l'orizzonte delle prospettive di applicazione nella progettazione architettonica si rivela ampio e ancora da esplorare.



# BIBLIOGRAFIA

- Attia S., Lioure R., et al.** (2020), Future trends and main concepts of adaptive facade systems. Energy Science & Engineering. volume 8, issue 9.
- ANSYS** (2011), ANSYS - Fluid Dynamics. [www.ansys.com](http://www.ansys.com).
- Aram M., Abessi O.** (2020), Optimal design of green buildings using computational fluid dynamics and climate simulation tools. International Journal of Environmental Science and Technology. .
- ARUP** (2019), Digital twin. london. [www.arup.com](http://www.arup.com).
- ARUP** (2013), The Arup Journal - Issue 2.
- Bågholt C.** (2018), CFD Analysis of Heat Transfer in an Innovative Facade System. Luleå tekniska universitet. Civilingenjör .
- Balzan A., Aparicio C.C. et al** (2021), Construction robotics: current approaches, future prospects. venice. CTBUH - council of tall buildings and urban habitat research office. research paper
- Bassolino E.** (2016), Climate Adaptive Design Strategies for the built environment. Metodologia per il controllo tecnico-decisionale con strumenti IT del progetto dell'esistente nel contesto napoletano. Università degli Studi di Napoli Federico II. Dipartimento di Architettura. Dottorato di ricerca in ecologia dell'architettura e rilievo e rappresentazione dell'architettura e dell'ambiente
- Butera F.** (2021), Affrontare la complessità. Per governare la transizione ecologica. Edizioni Ambiente

- Campanini L.** (2009), Corpo di calibrazione: confronto al CFD fra configurazioni di flusso libero e flusso in galleria del vento. Università degli studi di Pisa, Facoltà di Ingegneria. Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale. Tesi magistrale
- Casini M.** (2014), smart Building - Involucro 2.0. Roma. DEI.
- Cattarin F. Causone A. et al.** (2016), Outdoor test cells for building envelope experimental characterization - a literature review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 54.
- Cattarin G. Causone F. et al** (2016), Outdoor test cells for building envelope experimental characterisation - A literature review.
- Cecafosso V.** (2017), La fluidodinamica in architettura. Firenze. Altraleina.
- Chaudhary G.** (2019), Decoupling the thermal and visual performance in glazing systems: a novel methodology for the numerical investigation of the case of double skin facade systems.. Norwegian University of Science and Technology. Faculty of Architecture and Design. Department of Architecture and Technology. Master's thesis in Sustainable Architecture
- Cimolin F.** (2008), Le equazioni di Navier-Stokes. Lecce. magazine matematicamente.it.
- Comissione Europea** (2018), Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio Europe, Al Consiglio, al Comitato Economico e sociale Europeo, al Comitato delle Regioni e alla Banca Europea per gli Investimenti - Un pianeta pulito per tutti. Visione strategica europea a lungo termine per un'economia prospera, moderna, competitiva e climaticamente neutra. Bruxelles.
- Consiglio Nazionale delle Ricerche** (2009), Istruzioni per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni. Roma.
- Costanzo E., Basili R., et al.** (2018), Osservatorio degli edifici a energia quasi zero (nzeb). ENEA Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile. .

**De Wilde P., Hamza N.** (2013), Building simulation visualization for the boardroom: an exploratory study. School of Architecture, Planning and Landscape, Newcastle University, The Quadrangle, Newcastle upon Tyne, NE1 7RU, UK. Environmental Building Group, Plymouth University, Plymouth, UK Version of record first published: 14 Mar 2013.. Journal of Building Performance Simulation. "

**Dopudi M.** (2018), NATURALLY VENTILATED DOUBLE SKIN FAÇADE: CFD AND SIMPLIFIED MODEL FOR PARAMETRIC ENERGY SIMULATION. politecnico di milano. SCUOLA DI ARCHITETTURA URBANISTICA INGEGNERIA DELLE COSTRUZIONI - BUILDING ENGINEERING. tesi laurea

**EDA Tool** (2008), EDA Tool Options for Advanced High Speed and Wireless Design. High Frequency Electronics. Summit Technical Media.

**ENEA** (2020), Rapporto annuale Efficienza Energetica

**Favoino F., Fantucci S. et al.** (2015), Building Envelope Test CELL: development of an indoor test cell for advanced façade systems thermal performance assessment. graz, Austria. International Conference on Building Envelope Design and Technology.

**Favoino F., Loonen R. et al.** (2018), Building Performance Simulation and Characterisation of Adaptive Facades - Adaptive Facade Network. COST (European Cooperation in Science and Technology). TU Delft Open.

**Focchi** (2021), ARCHITECTURAL BUILDING ENVELOPES - Focchi Mock-ups . <https://www.focchi.it>. RIMINI - LONDON - NEW YORK - MILANO.

**Fuliotto r.** (2008), Experimental and Numerical Analysis of Heat Transfer and Airflow on an Interactive Building Facade. Università degli Studi di Cagliari. Dipartimento di Ingegneria Meccanica. Dottorato di Ricerca in Progettazione Meccanica XX Ciclo - Ing-Ind/11

**Garzia C.** (2021), Il mercato dei serramenti e delle facciate continue nel 2020 e 2021. milano. Report UNICMI .

- Gremmo M.** (2018), IL BIM PER L'ANALISI FLUIDODINAMICA: AMBITO INDUSTRIALE ED AMMINISTRATIVO. Politecnico di Torino. Corso di laurea magistrale in ingegneria dei sistemi edilizi. tesi di laurea
- Herzog T., Krippner R. et al.** (2017), facade construction manual. DETAIL Construction Manuals. .
- Hwang Oh S.,** (2020), curtain wall Facades on the new generation of supertall buildings present and future directions. international journal of high-rise buildings. .
- Ilter, E., Tavit, A. et al.** (2015), Full-scale performance testing and evaluation of unitized curtain walls. Journal of Facade Design and Engineering. vol. 3 n. 1.
- Istituto giordano** ( La trasmittanza termica dei serramenti. <https://www.giordano.it/>.
- Jurelionis A, Isevičius E** (2008), CFD predictions of indoor air movement induced by cold window surfaces. Journal of Civil Engineering and Management . Volume 14, Issue 1.
- Keenahan, J., Paduano C. et al.** (2016), An Overview of Arup Computational Fluid Dynamics Projects. Conference, Galway, Ireland,. The Civil Engineering Research in Ireland .
- Lauria M., Trombetta C.** (2016), Building Future Lab - Ricerca sperimentale nel settore delle costruzioni. santarcangelo di romagna. Maggiori Editore.
- Le Corbusier** (1925), Vers une architecture.
- Leslie T.** (2006), Buildings without Walls: Curtain Wall Development in Chicago Architecture of the 1890s. Second International Congress on Construction History
- Li Ning** (2015), Comparison between three different CFD software and numerical simulation of an ambulance hall. KTH School of Industrial Engineering and Management Energy Technology - Stockholm. Division of Energy Technology. Master of Science Thesis

- Luible, A.** (2015). COST Action 1403. Bern, Switzerland. In Proceedings of Energy Forum 2015.
- Lukiantchuki M.A., Shimomura A.P., et al.** (2018). Evaluation of CFD simulations with wind tunnel experiments: pressure coefficients at openings in sawtooth building. Acta Scientiarum. Technology, vol. 40
- Martino G., Di Giuda V. et al.** (2018), Phoenix international media center - Il BIM per la progettazione di forme complesse e per l'ottimizzazione dei componenti. milano. Arketipo 121.
- Meinhardt group** ( Facade engineering. <https://meinhardtgroup.com/services/environmentally-sustainable/>.
- Milardi M.** (2016), Un laboratorio di ricerca applicata per i processi di innovazione tecnologica in edilizia. firenze. TECHNE 11.
- Mirzada A.** (2012), The Shard - Scheldebouw - Permasteelisa Group. <https://scheldebouw.permasteelisagroup.com>
- Mudjanarko, Wikoho S. et al** (2015), CFD simulation for predicting the wind effect on the high rise building NET Tower Surabaya. Proceedings of Narotama International Conference on Civil Engineering. Narotama University Press.
- Norton C.** (, Thermal Performance Calculation - Façade. <https://www.feaservices.co.uk>
- Oh S.H. et al.** (2020), Curtain Wall Façades on the New Generation of Supertall Buildings Present and Future Directions. International Journal of High-Rise Buildings
- Perino M.** (2008), IEA ECBCS. State of the Art Review. Volume 2A Responsive Building Elements.
- Permasteelisa** (, Physibel software used by Permasteelisa . [www.permasteelisagroup.com](http://www.permasteelisagroup.com) . .
- Pellitteri G.** (2010), L'involucro architettonico. Declinazioni e nuovi linguaggi. Edizioni fotograf

- Ramírez-Balas C., Fernández-Nieto E. et al.** (2018), Thermal 3D CFD Simulation with Active Transparent Façade in Buildings. Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Sevilla, 41012 Sevilla, Spain. . Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción, Departamento de Matemática Aplicada I.
- Reynders G., Nuytten T., and Saelens D.** (2013). Potential of Structural Thermal Mass for Demand-Side Management in Dwellings.
- Slotnick J.** (2019), BOEING - CFD prediction for high lift aerodynamics - Recent progress and emerging opportunities. <https://www.aerosociety.com>. .
- Storer L., C.H. Yang** (2009), ARUP's Environmental Strategies. Engineering + Sustainability + Architecture. the university of Texas at Austin. School of Architecture.
- Tijerina L., Silvas A. et al** (2016), The Shard at London Bridge. <http://faculty.arch.tamu.edu>.
- Villa V.** (2019), 4 kingdom street london (UK). Milano. Arketipo 127 - trasparenze.
- Voyatzaki M.** (2017), Tecnologia in vivo. Firenze. TECHNE 13.
- Yeomans D.** (1998) The pre-history of the curtain wall. Construction History
- Wang L., Zhang L. et al.** (2015), A CFD Simulation of 3D Air Flow and Temperature Variation in Refrigeration Cabinet. Procedia Engineering. Volume 102.
- Wilson A.** (2020), Modeling airflow and filtration reveals truths and misconceptions on commonly held beliefs about virus spread. <https://www.filtnews.com>. International Filtration News.

# RINGRAZIAMENTI

*Alla mia famiglia, che sostiene con amore ogni mio passo.*

*A mio zio Paolo, i cui insegnamenti nutrono il mio desiderio di imparare.*

*A Domenico, assiduo compagno di studi e soprattutto di risate.*

*Ai miei tutor, in particolar modo al Prof. Lauria. Oltre il ruolo, ha sempre rappresentato per me un esempio di sapienza ed umiltà.*

*A Pietro Cacciatori ed a tutta la squadra AluK di Milano. A Miro Giordano per l'amicizia e l'ospitalità dimostrata. Ad Ilaria e Simona per aver riempito di sorrisi e gioia tutto il periodo trascorso in studio.*

*Ai miei amici, quelli che ci sono sempre stati, quelli con cui spero di invecchiare e condividere ogni successo e, soprattutto, ogni fallimento.*

*Agli errori ed agli insuccessi, che mi danno l'occasione di migliorare.*

*Grazie*

