

Valeria Bianchini
valeria.bianchini@unicam.it



Università di Camerino
Scuola di Ateneo di Architettura e Design "Eduardo Vittoria"
sede di Ascoli Piceno
Viale della Rimembranza snc
63100 Ascoli Piceno
Tel. 0737/404200 - Fax 0737/404242
www.unicam.it
<http://d7.unicam.it/sad//>

Copyright School of Advanced Studies, Università di Camerino

Tutti i diritti sono riservati:

nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcun modo (comprese fotocopie e microfilm) senza il permesso scritto del
Dottorando di ricerca in Innovative Technologies and Energy Efficiency



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CAMERINO

School of Advanced Studies

**DOCTORAL COURSE IN
Sciences And Technology - Computer Science**

XXX cycle

**ENVIRONMENTAL ENERGY OPTIMIZATION OF METAL COATINGS
FOR THE BUILDINGS FACADES**

PhD Student: Valeria Bianchini

Supervisors: Prof. Giuseppe Losco

**Co-supervisor: Ing. Pierfrancesco
Monaco - Cantori alluminio srl**

Abstract

Environmental energy optimization of metal coatings for the buildings facades

Negli ultimi vent'anni, la costruzione di edifici nel mondo è aumentata di circa il 65%, raggiungendo quasi 245 miliardi di m² di superficie calpestabile, tuttavia, il consumo medio di energia per m² è diminuito soltanto del 25%, testimoniando come i progressi sull'efficienza energetica in architettura necessitino di un'ulteriore spinta per invertire la tendenza dei cambiamenti climatici che ci stanno conducendo verso un mondo sempre meno sostenibile.

Gran parte delle problematiche ambientali risultano essere direttamente connesse all'attività edilizia, gli edifici infatti, sono tra i maggiori responsabili delle emissioni di gas serra, detenendo, in Europa, il 40% del consumo di energia primaria.

I miglioramenti delle prestazioni energetiche degli edifici sono fondamentali per raggiungere lo scenario di sviluppo sostenibile e, sebbene tutti i paesi dovranno implementare le strategie nazionali per il contenimento dei consumi, la maggior parte di essi non le ha ancora rese una priorità politica esplicita.

In questo contesto politico e sociale, la presente tesi ha deciso di approfondire il tema dell'involucro edilizio, inteso come interfaccia di separazione dinamica, capace di autoregolarsi alle sollecitazioni ambientali per garantire il comfort climatico degli ambienti interni e dei suoi occupanti.

La ricerca si focalizza sullo studio teorico – sperimentale, funzionale allo sviluppo di un nuovo componente di facciata adattivo in alluminio, la cui massa frontale non supera i 150 kg/m². Il sistema comprende tre tipologie di moduli: trasparente, semi-trasparente e opaco, configurati in un telaio strutturale in alluminio estruso, dello spessore di poco inferiore ai 150 mm.

La scelta di inserire i diversi strati funzionali all'interno di uno spessore contenuto, deriva dalla volontà progettuale di creare un sistema versatile applicabile sia su edifici di nuova costruzione, sia in sovrapposizione al paramento murario esistente per la riqualificazione energetica degli edifici.

Un approccio di questo tipo, oltre a garantire i vantaggi della produzione industriale in serie, offre ai progettisti la possibilità di scegliere tra un'ampia gamma di combinazioni sia in termini compositivo-architettonico, che in termini prestazionali in base ai contesti di applicazione.

Le simulazioni relative alle prestazioni energetiche del componente hanno permesso di valutare gli ottimi risultati ottenuti in termini di riduzione del fabbisogno energetico per il riscaldamento ed il raffrescamento, e conseguentemente delle emissioni di CO₂.

Keywords

Risparmio energetico, Involucro adattivo, involucro di alluminio, Involucro prefabbricato

Introduzione

Ambito tematico

La ricerca si inserisce nell'ambito scientifico disciplinare della Tecnologia dell'Architettura ed in particolare, l'attenzione si focalizza sul settore dell'efficienza energetica dell'edificio attraverso lo sviluppo di un nuovo componente metallico di facciata per gli involucri edilizi, in grado di migliorare le prestazioni energetiche dell'intero edificio.

La ricerca si è avvalsa del contributo del settore della Fisica Tecnica applicata per studiare il comportamento degli organismi architettonici complessi, intesi come un insieme di involucri edilizi e dotazioni impiantistiche, in risposta alle sollecitazioni prodotte dall'ambiente.

In particolare la ricerca si propone di analizzare l'efficienza energetica dei componenti di facciata "adattivi" in relazione alle problematiche legate al comfort termo-igometrico e alla termo fluido dinamica ambientale. Le soluzioni proposte saranno valutate attraverso una verifica sperimentale che definirà gli aspetti quantitativi e qualitativi del prodotto di ricerca.

Obiettivo generale della ricerca

Il progetto è stato condotto all'interno di un dottorato di ricerca "Eureka" e si concretizza attraverso l'interazione università - impresa.

La ricerca intende dare un supporto alla crescita del settore produttivo regionale, stimolare la forza innovativa delle piccole imprese e favorire la interdisciplinarietà permettendo di aumentare la loro capacità competitiva nel ambito del mercato concorrenziale di riferimento.

L'obiettivo generale è quello di indagare sistemi, tecnologie e materiali da costruzione che possano agire sull'efficienza energetica degli edifici, migliorando le caratteristiche di comfort ambientale degli spazi interni e le condizioni degli utenti.

L'obiettivo specifico è stato quello di realizzare un componente di facciata metallico e innovativo capace di contenere i consumi energetici per riscaldamento e raffrescamento, attraverso l'adozione di soluzioni tecnologiche adattive, ovvero, in grado di adattare le proprietà termo-fisiche dell'intero sistema e dei suoi materiali, rispondendo in modo reversibile alle condizioni a contorno transitorie esterne.

Metodologia della ricerca

La ricerca sull'involucro metallico di tipo adattivo è stata sviluppata adottando un modello metodologico suddiviso per macrotemi: approccio prestazionale, approccio tecnologico-funzionale e indagine sui materiali adattivi.

L'approccio prestazionale indaga su una serie di requisiti necessari che l'involucro, inteso come un elemento di interconnessione tra l'ambiente interno e lo spazio esterno, deve assolvere per controllare, filtrare e proteggere l'edificio dagli stimoli esterni, al fine di ottenere il comfort climatico interno desiderato.

L'approccio tecnologico-funzionale avviene attraverso una classificazione dei sistemi di facciata a secco a partire dallo studio sui diversi sistemi costruttivi in essere, passando per

una definizione delle tipologie di involucro riconosciute dalla letteratura, fino a giungere ad una ulteriore classificazione dell'involucro tenendo conto del livello di indipendenza strutturale, del grado di prefabbricazione, e delle diverse tipologie di ventilazione. Infine, per quanto riguarda l'indagine sui materiali adattivi, lo studio pone l'attenzione sulle loro caratteristiche, attraverso una classificazione di materiali, componenti ed elementi adattivi, e come queste possono influenzare radicalmente il processo di progettazione e costruzione dell'involucro edilizio.

Analisi dei casi studio

L'analisi dei casi studio è stata condotta attraverso una suddivisione in tre categorie di indagine: progetti, prodotti e prodotti di ricerca.

All'interno delle tre diverse categorie rientrano tutti quei casi studio, realizzati o in fase di sperimentazione, nei quali l'involucro edilizio, di tipo adattivo, ricopre un ruolo fondamentale negli edifici ad alta efficienza energetica.

Attraverso una scheda sintetica, vengono messi in evidenza gli aspetti tecnologico-costruttivi ed energetico-ambientali degli esempi selezionati, specificando le caratteristiche dell'agente di adattamento ed il meccanismo di controllo dell'involucro adattivo in riferimento agli obiettivi specifici del progetto.

Lo studio critico dello stato dell'arte, classificato in questo modo ci ha permesso di individuare le principali criticità comuni ai vari dispositivi d'involucro, le difficoltà d'impiego in funzione del loro utilizzo e della loro installazione. Per analizzare gli aspetti vantaggiosi e le condizioni sfavorevoli, sono stati presi in considerazione i seguenti principi di complessità: dimensioni, spessori e pesi dei materiali utilizzati ridotti al minimo, grado d'integrazione degli elementi funzionali, nonché costi ragionevoli e sostenibili

Risultati attesi conseguiti

Dalla sintesi formale, funzionale e strutturale, ne consegue un nuovo componente di involucro opaco, realizzato in alluminio, adattabile alle diverse condizioni climatiche esterne, con sottomoduli di differenti funzioni combinabili e facilmente assemblabili tra loro, in grado di garantire una continuità geometrica della facciata.

Un componente unitario, prefabbricato e standardizzato con massa frontale inferiore a 150kg/m^2 , flessibile e configurabile alle diverse necessità estetiche e prestazionali. Il prodotto può essere adattato sia agli edifici di nuova costruzione sia a quelli che necessitano di riqualificazione edilizia, prevalentemente ad uso commerciale e terziario, ma installato anche in edifici residenziali.

Le simulazioni relative alle prestazioni energetiche hanno permesso, inoltre, di valutare le caratteristiche del componente di facciata adattivo e la sua capacità di contribuire alla riduzione del fabbisogno energetico per il riscaldamento ed il raffrescamento, evidenziando degli ottimi risultati in termini di riduzione del fabbisogno di energia primaria e conseguentemente una riduzione delle emissioni di CO_2 .

Prospettive della ricerca

La presente ricerca scientifica si è concentrata principalmente sullo sviluppo di un componente di facciata opaco e semitrasparente, rimandando a successiva verifica lo studio delle prestazioni energetiche del componente trasparente, analizzato in questa ricerca soltanto in maniera preliminare e quindi non oggetto di simulazioni energetiche.

Vengono inoltre rimandati a sviluppi futuri le analisi del comportamento fluidodinamico dell'intercapedine d'aria poiché queste verifiche potranno essere effettuate soltanto attraverso il monitoraggio in opera di un prototipo fisico.

Infine, soltanto durante la fase di ingegnerizzazione del prototipo, sarà possibile effettuare le dovute correzioni al progetto, con l'intento di migliorarne le caratteristiche praticando soluzioni tecniche necessarie per ottimizzare la futura fase di produzione industriale.

Indice

5	ABSTRACT
7	INTRODUZIONE

PARTE PRIMA

Il processo evolutivo: dal rivestimento metallico all'involucro energeticamente efficiente

CAPITOLO 1

I metalli negli elementi di chiusura dell'edificio

19	1.1	Evoluzione storica del metallo nell'architettura
35	1.2	Architettura e industria: l'innovazione dei sistemi di facciata nel '900
53	1.3	I metalli: processi di produzione, tecniche di lavorazione e proprietà

CAPITOLO 2

L'involucro edilizio per edifici energeticamente efficienti

73	2.1	Efficienza energetica in architettura: prospettive future del costruibile e del costruito
83	2.2	Legislazione ed efficienza energetica: politiche europee e nazionali in materia di energia e ambiente
91	2.3	Involucro come interfaccia per il miglioramento della qualità degli ambienti

PARTE SECONDA

L'approccio metodologico come contributo di innovazione tecnologica dell'involucro metallico

CAPITOLO 3

L'approccio metodologico come contributo di innovazione tecnologica dell'involucro metallico

- 105 **3.1** L'approccio prestazionale: i metodi d'indagine
- 121 **3.2** L'approccio tecnologico funzionale: classificazione dei sistemi di facciata
- 143 **3.3** Materiali per un involucro adattivo
- 159 **3.4** Casi studio: esempi di involucri realizzati, progetti, prodotti e prodotti di ricerca

PARTE TERZA

Strumenti e riflessioni per il design di un involucro metallico sostenibile

CAPITOLO 4

Metodologia per la definizione di un involucro metallico energeticamente efficiente

- 211 **4.1** Definizione degli obiettivi di ricerca e di progetto
- 225 **4.2** Definizione dei criteri per la classificazione delle località di analisi
- 247 **4.3** Definizione dei parametri di controllo per la progettazione degli strati funzionali

CAPITOLO 5

Progetto di un modulo metallico multifunzionale adattivo

- 259 **5.1** Definizione del modulo metallico adattivo: dimensioni, materiali e strati
- 301 **5.2** Analisi delle prestazioni energetiche su un caso studio virtuale
- 347 **5.3** Conclusioni

APPENDICI

- 355 **A** Dettagli costruttivi
- 366 **B** Analisi dei ponti termici e degli elementi finiti
- 371 **C** Sistema di assemblaggio
- 373 **D** Verifica delle prestazioni acustiche
- 375 **E.1** Possibili combinazioni tra i diversi moduli
- 378 **E.2** Possibili soluzioni di facciata
- 380 **E.3** Viste di dettaglio

Bibliografia generale

"Studia il passato se vuoi prevedere il futuro"

Confucio

1 I metalli negli elementi di chiusura dell'edificio

1.1 Evoluzione storica del metallo nell'architettura

1.2 Architettura e industria: l'innovazione dei sistemi di facciata nel '900

1.3 I metalli: Processi di produzione, tecniche di lavorazione e proprietà

1.1 Evoluzione storica del metallo nell'architettura

I metalli sono tra i più antichi materiali usati dall'uomo. Sin dal 6000 a. C lasciandosi alle spalle l'età della pietra, sono stati il mezzo che ha permesso l'evoluzione ed il progresso della specie.

L'età dei metalli è il periodo storico in cui gli uomini, abbandonando progressivamente l'utilizzo della pietra, iniziarono la lavorazione dei metalli per costruire i primi utensili e armi da guerra. Risalente alla preistoria, l'età del rame (6000 a.C. circa), anche detta Eneolitico, è la fase transitoria che ha portato all'avvento della metallurgia dapprima con l'età del bronzo (3500 a.C.) e successivamente con quella del ferro (1200 a.C.).

Sulla base dei ritrovamenti archeologici, i metalli, furono impiegati nel campo dell'architettura fin dall'antichità, in principio come attrezzi da lavoro, ma è soltanto con Vitruvio che vennero realizzati in piombo i primi condotti dell'acqua.

Utilizzati principalmente in luoghi protetti con funzione di catene, di tiranti e soltanto durante l'impero romano, grazie all'ottenimento di una miglior qualità, prestazioni meccaniche e una resistenza alla corrosione, è stato possibile impiegare il piombo, il bronzo e il rame anche all'esterno degli edifici.

Per quanto noto nel Pantheon a Roma, tempio di tutte le divinità, commissionato tra il 120 e il 124 d.C. durante il regno dell'imperatore Adriano, è visibile uno dei più antichi esempi di utilizzo del metallo di cui si ha ancora testimonianza, è infatti realizzata in bronzo la cornice intorno all'apertura centrale della cupola. Questa, articolata in sette anelli sovrapposti, in principio era quasi completamente rivestita da uno splendido manto

fiammeggiante di tegole in bronzo dorato, ma nella sistematica spoliazione avvenuta nel Medioevo di tutto ciò che vi era di utilizzabile e specialmente di fondibile nei monumenti romani, non poteva passare inosservata questa enorme quantità di ottimo bronzo, tant'è che nel 663 d.C. il rivestimento della copertura fu fatto rimuovere dall'imperatore Costante II.

Nel secolo VIII papa Gregorio III (731 -742) venne in soccorso del Pantheon, ed esso ebbe di nuovo una copertura metallica, questa volta non più di bronzo dorato, ma più modestamente di piombo. Il Liber Pontificalis, tra le opere compiute da Gregorio III, ricorda che "tectum, vetusta caria demolitum purgare fecit ad purum et cum calce abundantissimo seu chartis plumbeis noviter restauravit". Così ebbe origine quel rivestimento di piombo che tuttora riveste la cupola.

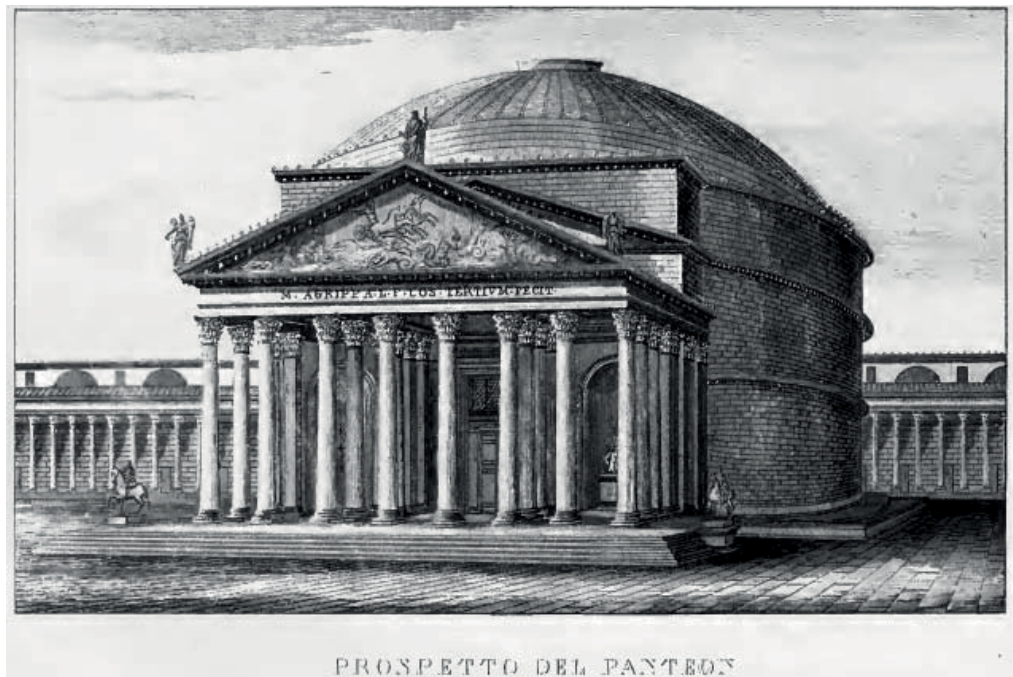


Figura 1. Pantheon, Marco Vipsanio Agrippa, Roma, 27 a. C

Per lungo tempo l'utilizzo del metallo fu quasi esclusivamente impiegato nei rivestimenti delle cupole e gli edifici.

Giovanni Rondelet, trattatista dell'Ottocento, nel Trattato teorico e pratico dell'arte di edificare ¹ (1832), descrive dettagliatamente alcune tra le prime applicazioni di rame piombo e zinco nelle coperture di cui si ritiene importante riportarne alcuni passaggi: "Fra tutti i metalli che possono impiegarsi per coprire gli edifici, quello che meglio resiste alle ingiurie dell'atmosfera è il rame. Consultato su tale questione trattandosi della copertura della cupola di ferro del mercato delle Biade a Parigi, M. Sage, professore di mineralogia, si esprime così nella sua risposta: "Non si deve temere d'impiegare il rame per coprire gli edifici; la ruggine di cui si copre non essendo solubile nell'acqua, aderisce con tenacità a questo metallo. Tal ruggine verde è una specie di malachite che gli antiquari chiamano patina, la quale garantisce il rame dagli effetti del tempo. [...]".

Gli antichi che erano stati al caso di conoscere questa proprietà pel lungo uso del rame e del bronzo, le qualità de' quali sono presso a poco le stesse, impiegarono quest'ultimo

¹ (Rondelet JB., 1817, *Traité théorique et pratique de l'Art de Bâtir* traduzione italiana a cura di Basilio S., 1834, *Trattato teorico e pratico dell'arte di edificare*, Caranenti, Mantova, pp 158-162)

per coprire que' loro edifici ai quali davano maggiore importanza. Si sa che la cupola del Panteon d'Agrippa a Roma è stata coperta di bronzo: intorno all'apertura praticata nella volta per illuminare questo monumento si vede anch'oggi un orlo largo 6 piedi formato da lamine di bronzo di 5 linee e $\frac{1}{2}$ di grossezza, unico avanzo della copertura antica, la cui conservazione è perfetta. Il modo comune d'impiegare i fogli di rame per le coperture è quello di congiungerli con doppie piegature che si sovrappongono da tutte le parti, e di fermar ciascun foglio con viti nascoste sotto le piegature; ma siccome questa materia si dilata facilmente nei gravi calori, ed è più elastica del piombo, i fogli gonfiandosi strappano le viti quando non si ha la precauzione di adattarle in modo che l'effetto della dilatazione non vi possa contrastare. Perciò fa duopo che ciascun foglio non sia fermato da viti che da una parte, e che dall'altra le piegature permettano al rame di stendersi e restringersi a misura della temperatura dell'aria.

Si formano queste coperture con fascie disposte secondo l'inclinazione, sulle quali le piegature sieno alternativamente al di sopra e al di sotto per le commessure verticali, e con una sovrapposizione semplice per le commessure orizzontali" [...]

Risulta evidente da questa prima parte del trattato riportato, come già nel 1817 si conoscevano bene le proprietà del rame, del bronzo e del piombo come materiali di applicazione per le coperture e le tecniche e le tecnologie ad essi associate. L'aggraffatura come descritta è un sistema di rivestimento utilizzato ancora oggi nelle coperture.

Proseguendo nel trattato viene approfondito il tema delle coperture in piombo

"Una copertura di piombo fatta bene è estremamente solida e durevole; ma è pesantissima ed assai costosa; oltre ch'è nei casi d'incendio ha pure l'inconveniente di non potersi avvicinare per la fusione del piombo, onde recare soccorsi immediati, come quando il tetto è di legname. Non è così pericoloso quand'è posato sulle volte; ma se ne possono, spogliare e lasciar gli edifici esposti alle intemperie dell'aria, com'è avvenuto nella chiesa di S. Dionigi. Nondimeno spiegheremo il modo di farle nel caso che non si potesse a meno di usarne. Quando i travicelli del tetto che si vuol coprire di lamine di piombo sono fermati e ben appianati pel di sopra, si posano le assicelle che hanno d'ordinario 4 in 6 pollici, a ranghi orizzontali distanti circa 2 pollici. Dopo questa operazione i lavoratori in piombo, che d'ordinario eseguiscono questa specie di copertura, cominciano col posare il canale che deve cingere la parte inferiore del tetto; e ben depressa la schiena di questo sul primo rango di assicelle, vi si posa sopra una fila di arpioni di ferro superiormente schiacciati, con fori per poterli inchiodare. Questi arpioni debbono essere posati in modo che la lamina di piombo, ch'essi sostengono, possa ricoprire la schiena del canale di piombo; questa sovrapposizione dev'essere più grande a misura che il tetto ha minore inclinazione, e può variare dai 3 fino ai 6 pollici. Fatto ciò, l'operaio posa il primo rango di lamine in modo che la parte inferiore entri negli arpioni; quindi la stende e l'appiana con un pestone di legno e lo ferma al di sopra su ciascun travicello con forti chiodi lunghi abbastanza da poter attraversare il piombo, le assicelle ed una parte del travicello. Questi chiodi sono lunghi d'ordinario 2 pollici e $\frac{1}{2}$.

Le tavole di piombo adoperate per le coperture hanno d'ordinario 3 piedi di larghezza sopra 12 in 15 piedi di lunghezza, ed una linea e $\frac{1}{2}$ o due di grossezza; e si posano in modo che la larghezza secondi l'inclinazione del tetto.

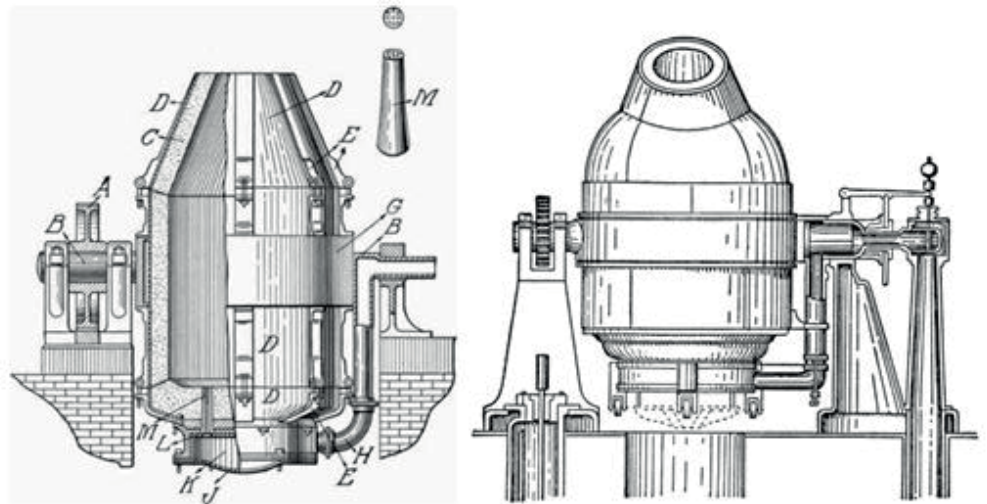
Bisogna osservare di non fermar la estremità delle tavole di piombo formanti uno stesso rango con saldature, perché sono soggette a rompersi per l'effetto della dilatazione e della contrazione che può provar questo metallo in ragione della temperatura dell'aria; è meglio ripiegare i margini delle tavole in guisa da formare una nervatura... che si rotonda col pestone.

Le coperture delle cupole si eseguono nello stesso modo: quando non hanno coste saglienti si stende il piombo col pestone e si perviene a fargli prendere la curvatura della cupola. Come pei tetti, fa duopo evitare le saldature per le commessure verticali, e farvi invece gonfiature formanti cordoni che si dirigono alla sommità della cupola. Siccome gl' intervalli fra i cordoni diminuiscono di larghezza, è utile, per aver meno ranghi di tavole ed economizzare le sovrapposizioni, posare gli ultimi ranghi in modo che la lunghezza delle tavole ne faccia l'altezza.

Quando la curva esterna di una cupola è divisa da coste saglienti, fa duopo quant'è possibile che la larghezza degl'intervalli come quella delle coste possa essere formata da una sola tavola in modo che non vi sieno commessure verticali che negli angoli rientranti delle coste. Per formare queste commessure si ripiegano i margini delle tavole che debbono riunirsi in senso contrario, e sotto le piegature si fermano con chiodi: quando il piombo è posato immediatamente sull' estradosso di una volta di pietra, come nella cupola di Santa Genevieffa, si possono rotolare in senso contrario intorno ad un regolo di ferro impiombato nella volta. [...]"

Per quanto riguarda lo zinco Giovanni Rondelet continua il suo trattato spiegando come le lamine di zinco vengano installate utilizzando le stesse tecniche descritte per il rame ed il piombo, prosegue elogiandone le caratteristiche di leggerezza ed economicità, ma allo stesso tempo esprimendone forti dubbi sulla deteriorabilità nel tempo del materiale, non avendo prove documentali e storiche sufficienti a certificarne la durabilità nell'impiego di esso nelle coperture: "gli sperimenti che se ne sono fatti sono ancor troppo recenti perché si possa per ora ammetterne l'impiego pei grandi edifici"

Dalla seconda metà del Settecento e di seguito con la seconda rivoluzione industriale, i metalli trovarono nell'edilizia una diffusa forma di utilizzo grazie anche alla scoperta di nuovi metodi per estrazione dei metalli dai minerali che ne hanno reso possibile una diffusione più o meno rapida.



² Gottfried Semper (Amburgo, 30 novembre 1803 – Roma, 15 maggio 1879) è stato un architetto tedesco tra gli esponenti dello storicismo eclettico.

Figura 2. Schemi del convertitore di Bessemer, 1855

Il primo salto qualitativo avvenne nel 1855, con "il convertitore", un forno a forma di pera di altezza variabile tra 4 e i 6 m ed un diametro di circa 3-4 m. Prende il nome dal suo inventore Henry Bessemer e grazie alla combustione ad alte temperature fu possibile eliminare il carbonio dalla ghisa producendo l'acciaio in un unico ciclo di lavorazione. Le tecniche del processo Bessemer, furono affinate grazie alle innovazioni tecnologiche che seguirono, tra cui il forno open-hearth di Martin-Siemens (1865) e il "convertitore" Thomas (1879). Queste permisero di affinare il processo di eliminazione delle impurità ottenendo un prodotto più stabile e di maggiore qualità.

Agli inizi del secolo XIX, le novità in campo industriale e la richiesta di autenticità delle strutture e dei materiali si scontra con il pensiero teorico ed innovativo di "rivestire" inteso non solo come forma di protezione dell'edificio, ma anche come azione in grado di conferire dignità alla costruzione.

³ Eugène Emmanuel Viollet-le-Duc (Parigi, 27 gennaio 1814 – Losanna, 17 settembre 1879) è considerato uno dei primi teorici dell'architettura moderna. Le sue teorie dell'architettura sono largamente basate sul pensiero che la forma ideale sia legata allo specifico materiale.

Da una parte l'idea di nascondere, dall'altra quella di svelare; due estremi già da tempo affrontati da G. Semper² nelle definizioni di «Bekleidung» e «Verkleidung», e che diventano, a cavallo tra l'ottocento ed il novecento, il centro tematico della discussione culturale architettonica.

Manifestare o nascondere sono i temi di una discussione in realtà molto più ampia, che si manifesta in virtù dei cambiamenti tecnologici nei quali l'involucro non è più soltanto uno strato di "finitura nobile" aggiunto alla muratura, ma il progressivo avanzamento del sistema costruttivo a telaio, enfatizza le differenze essenziali e funzionali tra rivestimento e struttura.

Si tracciano due linee di pensiero: da una parte l'idea di struttura che rimane in vista senza essere coperta dal rivestimento, seguendo il principio di "autenticità"; teorizzato da Viollet le Duc³; dall'altro lato, il sistema strutturale nascosto da un nuovo "strato", il quale

a sua volta può assumere due significati differenti: dissolvere le differenze tra la struttura portante ed il tamponamento, perseguendo l'idea di continuità della facciata, tipica delle costruzioni in muratura, o al contrario, perseguire l'idea di "leggerezza", considerando il contrasto tra telaio e tamponamento come un nuovo valore architettonico da esaltare. Alla luce del dibattito internazionale, sul piano teorico il rivestimento può essere quindi considerato come un delitto nei confronti della verità costruttiva, come una superficie di valore della muratura o come una membrana in aderenza al telaio strutturale. Di fronte a questo scenario, si consuma il dramma dell'architetto, spinto sempre di più verso nuovi orizzonti linguistici e tecnologici, ma allo stesso tempo schiacciato dalla possibilità di confutare i fondamenti stessi del classicismo.

La facciata continua come la conosciamo oggi si è diffusa grazie ad una serie di impulsi: Il primo fu la creazione dei sistemi a telaio. Questo metodo fu sviluppato a Liverpool all'inizio del diciannovesimo secolo e sorse attraverso l'applicazione di elementi costruttivi in ghisa portanti prodotti industrialmente. Di conseguenza, si poterono realizzare ampi spazi interni aperti, svincolando la pianta dai muri necessari per sostenere l'intero edificio. Il secondo può essere ricondotto alla metà del XIX secolo a seguito della rivoluzione industriale e con la diffusione dell'uso di costruzioni metalliche il sistema ha trovato strada nell'architettura grazie la produzione industriale di lastre di vetro piano e alla progettazione dei primi esempi di serre botaniche.



Figura 3. Palm House, Charles Lanyon, Kew Gardens Londra, 1841-1849

La rivoluzione industriale, introducendo nuove possibilità tecnologiche è stata volano di imponenti cambiamenti nel mondo dell'architettura e i primi edifici serra ne sono un esempio. È interessante notare che questa nuova tipologia di edificio non è stata abbracciata direttamente dagli architetti, ma piuttosto da giardinieri ed ingegneri come Josef Paxton o John Claudius Loudon, poiché a causa dell'assenza di massa, non erano visti come reali esempi di architettura, ma piuttosto ad un edificio che riprendesse le

caratteristiche produttive e tecnologiche di una macchina.

Palm House, ne è un esempio importante, Kew Gardens Londra, 1841-1849

La necessaria richiesta di luce da parte della flora ha permesso di investigare su sistemi di facciate costruiti con il massimo di superficie trasparente. La ricerca è stata condotta sull'orientamento ottimale relativo al sole per illuminare e riscaldare i grandi spazi interni. Le serre, infatti, non dovevano nascondere il loro carattere funzionale, teoria questa, totalmente in opposizione con il pensiero convenzionale del tempo e che ha avuto un importante impatto rivoluzionario sull'evoluzione dell'architettura negli anni a seguire.

Strutturalmente, tutti gli elementi necessari a formare il sistema di facciata non possono essere effettivamente separati dalla struttura portante principale, ma mostrano gli elementi salienti: la divisione in profili lineari in acciaio laminato e gli elementi di tamponamento, tipici nelle successive costruzioni di facciate continue.

Un ulteriore impulso è nato a Chicago alla fine del XIX secolo. Nel 1853 Elisha Otis inventò l'ascensore; questa scoperta insieme ad un'elevata disponibilità economica per gli investimenti e ai prezzi elevati dei terreni hanno facilitato a Chicago la costruzione di numerosi edifici sempre più alti, avviando un lungo periodo di sperimentazione nella realizzazione di grattacieli, icone dell'architettura moderna, e lo sviluppo della metropoli urbana. Gli architetti della Scuola di Chicago, in particolare, hanno guidato questo sviluppo. Il metodo di costruzione a telaio ha permesso grandi "piante libere" e l'elevato grado di prefabbricazione raggiunto in quegli anni ha ridotto sempre di più i tempi di costruzione. Si è evoluta una nuova tipologia di edificio in alternativa al processo di costruzione con massicce pareti esterne portanti.

Progressivamente fu possibile abbandonare il metodo di costruzione tradizionale degli edifici in muratura, costituito da solai, pareti interne e facciate portanti, fino ad arrivare da una struttura principale a telaio con pareti esterne ed interne libere da funzioni strutturali.

Soltanto nel XX secolo la facciata è stata completamente separata dalla struttura portante degli edifici. Il Bauhaus a Dessau di Walter Gropius e Adolf Meyer ha annunciato questa modernità.

Costruito nel 1926, è un edificio icona dell'architettura moderna e un esempio di architettura funzionale, in quanto la forma ad "L" è pensata in base alla destinazione d'uso scolastica, cui l'edificio è destinato. Alto tre o cinque piani, comprende aule, laboratori e residenze per studenti, presenta una combinazione dei materiali diversi: cemento armato per la struttura portante, mattoni per il tamponamento intonacato e dipinto di bianco, telai realizzati con profilati di ferro per sorreggere le superfici di vetro multistrato che rivestono i diversi piani. Questo sistema di facciata trasparente, oggi discutibile nell'aspetto dell'efficienza energetica, tuttavia, da un punto di vista architettonico dimostra chiaramente il concetto di curtain wall nella sua forma più pura.

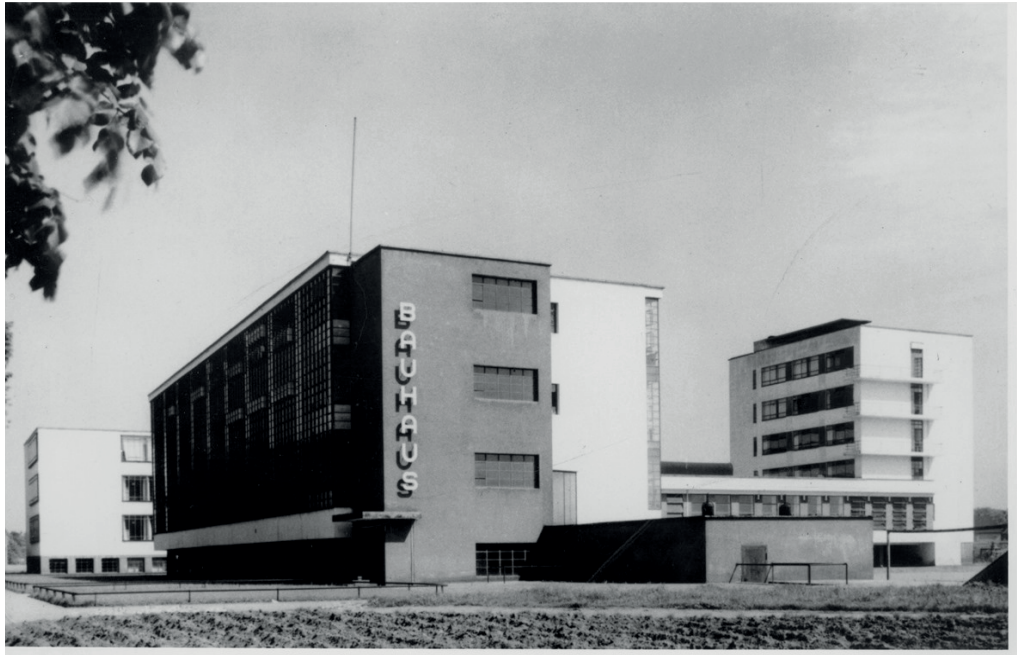


Figura 4. Bauhaus, Walter Gropius Dessau, Germania; 1925-1926.

In questo contesto, grazie alla sensibilizzazione della ricerca architettonica verso i processi e i sistemi di prefabbricazione, sono stati realizzati alcuni tra i più rinomati esempi di facciate metalliche a secco.

La prefabbricazione permetteva di risparmiare sui costi di manodopera in cantiere, i tempi di realizzazione della costruzione erano considerevolmente ridotti, mentre migliorava anche la qualità dei componenti della facciata.

Fu durante un viaggio nel 1940, che i silos in acciaio, disseminati come punti nella vastità del paesaggio rurale Americano, catturarono l'attenzione di Buckminster Fuller⁴. Ispirato dalla leggerezza e dalla produzione in serie di queste strutture, Fuller immaginò un'opportunità abitativa adatta agli usi civili.

Fu da questa suggestione che nacque la Dymaxion Dwelling Unit (DDU). Il termine "Dymaxion" è una combinazione delle parole "dynamic", "maximum" e "ion".

⁴ Richard Buckminster Fuller (Milton, 12 luglio 1895 – Los Angeles, 1° luglio 1983) è stato un inventore, architetto e designer. È famoso principalmente per le sue cupole geodetiche, per aver progettato e costruito diversi prototipi di automobili, inoltre intuì le potenzialità della carta e del cartone come materiale da costruzione

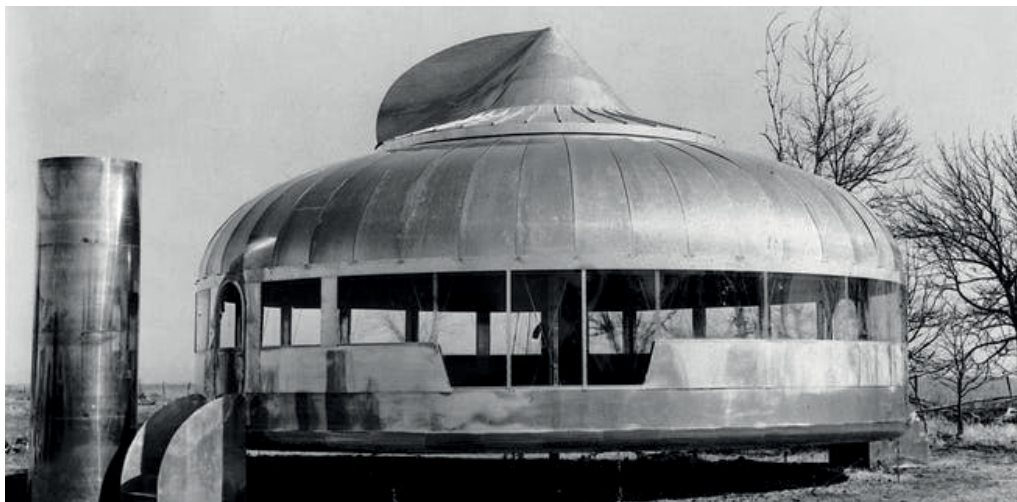


Figura 5. Dymaxion House, Wichita House, Buckminster Fuller, Wichita KS , 1945-1948

La D.D.U. è stata progettata come unità residenziale prodotta in serie ed a basso costo, facile da smontare e ri-assemblare. L'unità era letteralmente basata sul modello architettonico del silo di cereali e prodotto dalla Butler Manufacturing Company, che all'epoca era una delle più importanti case produttrici di questi silos.

A seguito dello scoppio della seconda guerra mondiale, durante il suo processo di sviluppo, la D.D.U. si avvicinò verso una soluzione di emergenza per alloggi di tipo militare.

L'edificio era costituito da un "albero" posto al centro della struttura sul quale veniva issata la copertura; al di sotto le pareti esterne realizzate in lamiera ondulata zincata.

La pianta di forma circolare garantiva all'edificio un certo grado di stabilità strutturale.

All'interno, le pareti erano costituite da pannelli laminati con isolamento in fibra di vetro. Le aperture di forma circolare erano in plastica, che a quel tempo veniva usata solo nell'industria aeronautica.

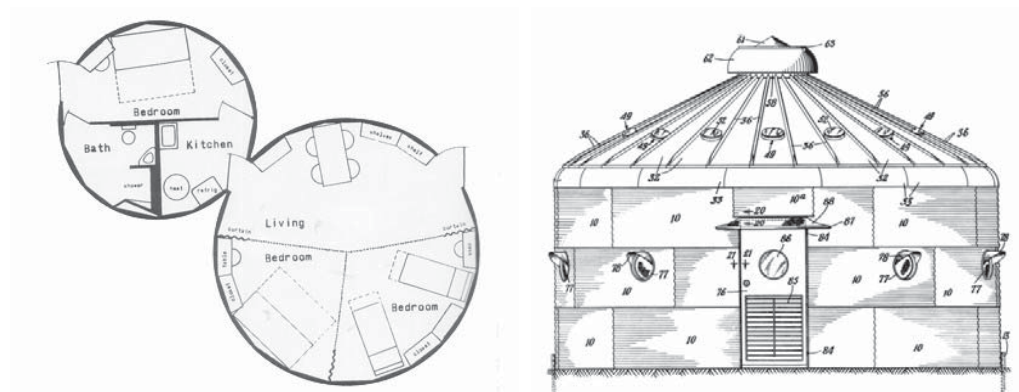


Figura 6. Elaborati grafici della Dymaxion House, Wichita House, Buckminster Fuller, Wichita KS , 1945-1948

⁵ Jean Prouvé (Parigi, 8 aprile 1901 – Nancy, 23 marzo 1984) architetto e designer francese, si è formato essenzialmente da autodidatta. Ha dato un notevole contributo al trasferimento della tecnica di produzione dall'industria all'architettura.

I suoi obiettivi erano di rendere l'arte facilmente accessibili, di creare legami tra arte e industria, così come tra arte e coscienza sociale.

Tutti gli ambienti di servizio vennero disposti verso le pareti esterne, in modo da lasciare la massima quantità di spazio al centro della costruzione. Delle tende potevano configurare questo spazio in modo da ottenere due camere da letto ed uno spazio living. L'unità principale era collegata con una più piccola, contenente un bagno più grande o una camera da letto supplementare.

Fu soltanto nel 1944, che Buckminster Fuller concretizzò il sogno di realizzare una casa prefabbricata in metallo basata sul modello del silo. La Dymaxion Dwelling Machine, meglio conosciuta come Wichita House, era costituita da una struttura centrale di acciaio, dalla quale, in alto, si estendevano delle reticolari atte a sostenere l'involucro e dal basso una struttura a raggiera per sorreggere il pavimento.

L'involucro non era altro che una cupola realizzata in una lega di alluminio proveniente da settore aeronautico, sulla cui sommità era installato un ventilatore che facilitava la circolazione ed il ricambio dell'aria all'interno.

Sfortunatamente furono costruiti soltanto alcuni prototipi, uno dei quali è oggi esposto nel Michigan presso il museo dedicato ad Henry Ford.

L'idea di un'architettura costituita da un involucro metallico, fu sostenuta anche dal francese Jean Prouvé ⁵. Le sue spiccate doti di fabbro e di lattoniere lo condussero, ben presto a collaborare con i più grandi architetti dell'epoca tra i quali Le Corbusier.

Dopo la seconda guerra mondiale, Prouvé realizzò una serie lavori che furono d'ispirazione per una categoria di giovani architetti (Richard Rogers, Norman Foster e altri), che negli

anni sessanta proponevano l'uso di pannelli sandwich in metallo, come tamponamento per gli edifici.

Consegnato nel 1954, il progetto per le abitazioni parigine in Square Mozart, ha segnato un'epoca con la sua facciata composta da lastre prefabbricate di alluminio. Il progetto dell'edificio è, ad opera degli architetti Lionel Mirabaud e Didier Gondolff i quali si avvalgono dell'esperienza di Jean Prouvé, considerato uno dei pionieri della facciata continua e dei pannelli metallici.

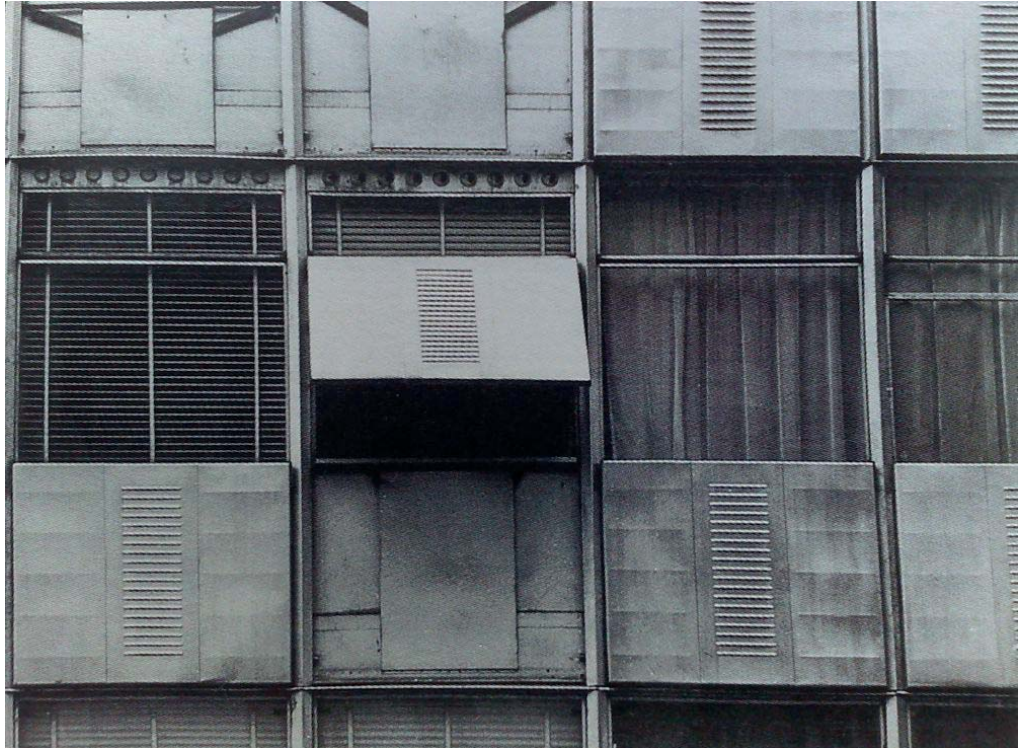


Figura 7. Dettaglio della facciata dell'edificio Square Mozart Housing, Jean Prouvé, Parigi, 1953

Formato da 35 alloggi residenziali, l'edificio, in cemento armato, è composto da due parti collegate tra loro da uno spazio di distribuzione. La straordinarietà del progetto risiede negli elementi che compongono la facciata continua, leggermente staccate dall'edificio. Ogni elemento è un apparato tecnologico composto da: parapetto, finestra a scorrimento verticale e fascia di ventilazione. Tutto ciò produce una facciata estremamente dinamica, ed in continua evoluzione, evidenziando l'aspetto meccanico dei componenti costruttivi. Il pannello integra contemporaneamente le funzioni di protezione e controllo della luce solare, infisso, ventilazione naturale e parapetto.

Prouvé ignorò la corrente "moderna", trionfante in quegli anni, che impose le "finestre a nastro" l'uso estensivo del vetro come base della progettazione. Ha ideato e costruito facciate modulari formate da una serie "filtri sofisticati".

In quegli anni, oltre oceano, il lavoro di molti architetti si concentrò sulla sperimentazione del sistema del Curtain Wall che caratterizzò il rivestimento di diversi grattacieli, tra cui il Seagram di New York ⁶. Mies van der Rohe ricerca il ritmo e la proporzione tra gli elementi costitutivi grazie alla chiusura verticale, realizzata con una sottostruttura a

⁶ Il Seagram Building è un grattacielo di New York, situato al 375 di Park Avenue, tra la 52^a e la 53^a Strada, nella Midtown Manhattan. Fu progettato dall'architetto tedesco Ludwig Mies van der Rohe in collaborazione con l'americano Philip Johnson e completato nel 1958.

griglia, sempre uguale per forma e per dimensione. I suoi rivestimenti interni ed esterni sono realizzati in acciaio inossidabile. Le facciate sono appese e svincolate dalla struttura portante, che rimane arretrata rispetto al filo esterno.



Figura 8. Dettaglio della facciata del Seagram Building, Ludwig Mies van der Rohe e Philip Johnson, New York, 1958

⁷ Henri Sainte-Claire Deville introdusse il processo di riduzione elettrolitica e di seguito nel 1886 con l'invenzione del processo di Hall-Héroult nel 1886, l'elettrolisi di allumina disciolta in criolite, è stata resa commerciale l'estrazione e la produzione di alluminio

Al di sopra del 38 ° piano dell'edificio, invece il vetro, per scelta progettuale, è sostituito da lamiere di bronzo alte circa tre piani, che fungono da schermi utili a nascondere le attrezzature meccaniche necessarie per il funzionamento dell'intero edificio.

In quegli anni, nell'edilizia, grazie al perfezionamento del processo di estrazione, è stato introdotto un "nuovo" metallo: l'alluminio. Rispetto agli altri metalli, l'alluminio, anche detto metallo moderno, è negli usi comuni da poco più di centocinquanta anni,⁷.

La produzione di alluminio ha subito una rapida ascesa, superando di gran lunga quella di tutti gli altri metalli non ferrosi messi insieme. Nelle costruzioni se ne è fatto un uso diffuso solo a seguito della seconda guerra mondiale grazie ad un'ottimizzazione delle prestazioni tecniche.

La leggerezza, la resistenza alla corrosione, la lavorabilità, l'avvento delle nuove tecniche di produzione, e l'aspetto accattivante erano qualità particolarmente adatte alle nuove forme espressive dell'architettura del ventesimo secolo.

I profili di alluminio estruso erano perfetti per essere utilizzati come sottostruttura dei sistemi di Curtain Wall, grazie all'economicità, alla resistenza e alla facilità d'installazione. Un'altra spinta di sviluppo tecnologico di questo sistema è derivata dall'innovazione del Float Glass o vetro galleggiante, il quale ha sostituito il precedente metodo della tiratura. Pilkington ha industrializzato la produzione di vetro Float nel 1959 fornendo grandi quantità di vetri di alta qualità che hanno contribuito alla diffusione a livello mondiale di

questo metodo edilizio.⁸

La stessa applicazione dell'alluminio è stata esclusiva, fino a quel momento tutto l'alluminio fu lavorato ed applicato solo per l'industria aeronautica, per la costruzione di aerei.

⁸ *Alastair Pilkington e Kenneth Bickerstaff, furono gli innovatori del processo produttivo Vetro float., autori del primo metodo commerciale per la fabbricazione di vetro piano di alta qualità a basso costo, Pilkington trovò un modo per lisciare il vetro su entrambe le superfici senza ricorrere a dispendiose operazioni di levigazione meccanica.*

Nonostante la giovane età e l'impiego quasi esclusivo nell'ambito aeronautico, l'alluminio si è imposto come uno dei principali materiali in architettura non solo per il suo utilizzo in elementi decorativi, ma anche per gli sviluppi potenziali che questo materiale era ed è in grado di dare ancora oggi. Va ricordato che già nel 1897, in occasione dell'edificazione della chiesa di San Gioacchino a Roma, l'architetto De Rossi utilizza lastre di alluminio bianco per il rivestimento della cupola.

Si citano anche gli esempi degli architetti Laurence Kocher e Albert Frey che, durante l'esposizione di architettura di New York del 1931, presentarono un innovativo progetto prefabbricato modernista composto da scintillanti pannelli di alluminio; questa fu ritenuta all'epoca, come la diretta concorrente della casa Domino di Le Corbusier. Per Walter Gropius, fondatore della Bauhaus, l'alluminio è il materiale dell'avvenire". Successivamente altri esempi di utilizzo dell'alluminio sono la casa tropicale di Jean Prouvé del 1949.



Figura 9. Vista della facciata del Alcoa Building, Harrison Wallace Kirkman Pittsburgh , 1952-67

L'edificio Alcoa di Pittsburgh, progettato dall'architetto Harrison Wallace Kirkman e realizzato nel 1953 , è un esempio iniziale e innovativo di facciata continua i cui pannelli di alluminio di sei piedi per dodici perforati, con al centro una finestra quadrata con gli angoli arrotondati, hanno l'aspetto di migliaia di apparecchi televisivi. Le sfaccettature dei pannelli di alluminio captano e infrangono la luce in figure triangolari, imprimendo alla facciata un alternato movimento diagonale. Per la fabbricazione dei pannelli sono state utilizzate tecniche sviluppate nell'industria automobilistica, con vetri trasparenti sigillati con guarnizioni di gomma, lasciando comunque la possibilità che potessero essere aperte. Lo spessore dei fogli d'alluminio è di poco più di tre millimetri. Essi sono stampati a sfaccettature triangolari allo scopo di garantire una maggiore rigidità e, dopo esser stati applicati alla struttura portante, i pannelli sono stati fissati con uno strato di perlite e di sabbia dello spessore di quattro pollici.

A partire dagli anni 70, l'involucro metallico ha assunto diverse conformazioni, promuovendo tecnologie in curtain-wall, brise soleil metallici, diaframmi sensibili fotosensibili, sistemi di ancoraggio puntiformi, superfici continue e strutture scomposte, fino ad arrivare ai primi esempi di architetture High-Tech caratterizzate dall'applicazione di materiali leggeri ad alte prestazioni ed elevata resistenza meccanica.

Lentamente l'involucro assume una configurazione molto più complessa rispetto a quella tradizionale. La pesante muratura esterna, da strumento di delimitazione dell'ambiente indoor, si evolve in una membrana sottile e leggera, smaterializzando il concetto di facciata. Alluminio anodizzato, zinco, titanio, rame, ottone e leghe leggere sono i materiali di una nuova epoca architettonica.

La quantità di leghe presenti sul mercato e le possibilità espressive delle nuove finiture metalliche, furono per alcuni architetti spunto di partenza per la ricerca di un linguaggio architettonico innovativo.



⁹ Frank Owen Gehry nato a Toronto il 28 febbraio 1929 è noto per il suo approccio scultoreo e organico alla progettazione, è considerato uno dei massimi esponenti mondiali del decostruttivismo. Realizza le sue opere ricorrendo spesso all'accostamento di materiali diversi e inusuali - dalla rete metallica, alla lamiera ondulata, fino a complesse leghe a base di titanio.

Figura 10. Vista della facciata del Guggenheim Museum, Frank Gehry, Bilbao , 1997

Su tutti, vi è sicuramente Frank O. Ghery ⁹, che negli anni novanta, attraverso l'ausilio di software informatici di modellazione tridimensionale, realizza una serie di progetti dalle forme complesse, dove l'involucro edilizio detta i parametri formali dell'edificio, (form follows skin). La negazione della linea ortogonale conduce verso un'architettura-scultura fatta di elementi curvilinei ed irregolari.

L'edificio più celebre, è senza dubbio il Guggenheim Museum di Bilbao, (1997), dove sottili lamine metalliche di zinco-titanio, disposte in scandole e aggraffate su supporti discontinui, sono la soluzione tecnologica ed espressiva di una sfida progettuale sbilanciata verso software parametrici generatori di forme complesse. Lo stesso Ghery racconta di come è avvenuta la scelta di realizzare in metallo il Museo di Bilbao. Bilbao era considerata la città d'acciaio, la volontà dell'architetto era quella di provare a utilizzare materiali legati alla loro industria, costruì venticinque modelli della facciata

esterna, in acciaio inossidabile in diverse varianti cromatiche, ma essendo Bilbao una città molto piovosa, l'acciaio inossidabile non dava l'effetto sperato, Gehry era frustrato di non riuscire a trovare la pelle metallica giusta per il suo progetto, fino a quando non trovò un campione di titanio nel suo ufficio, "So I took that piece of titanium, and I nailed it on the telephone pole in front of my office, just to watch it and see what it did in the light. Whenever I went in and out of the office, I'd look at it..."

La natura malleabile del metallo, così come la sua resistenza alla ruggine, hanno reso il titanio la scelta giusta per la sua facciata più celebre.

1.2 Architettura e industria: l'innovazione dei sistemi di facciata nel '900

¹ Manuel Orazi, 2013

² Cfr. Manuel Orazi, "Il miglior fabbro: Jean Prouvé a Torino", in *Domus* n. 968 aprile 2013. "Je ne suis qu'un ouvrier. Dans le fond, je suis parti de là et je pense que tout ce que j'ai fait dans la vie, je l'ai fait très simplement, sans me poser de questions profondes", Jean Prouvé par lui-même, a cura di A. Lavalou, *Editions du Linteau, Paris* 2001, p. 11.

Negli anni quaranta del XX secolo, Jean Prouvé proponeva soluzioni di facciate leggere che oggi fungono da modello per la progettazione delle chiusure esterne degli edifici. La finestra assume un significato differente: essa viene intesa non più come un elemento di separazione tra interno ed esterno, ma come un'apertura dotata di un sistema di filtri che ci collegano con l'ambiente circostante. La sofisticata sovrapposizione di tapparelle, lastre di vetro e persiane, sistemi di ventilazione e di ombreggiamento permettono di ottimizzare il flusso di energia al fine di ottenere il comfort desiderato per ogni circostanza, ogni stagione e ogni momento della giornata.

Definito "homo faber" ¹, la sua formazione di fabbro fu fondamentale tanto che lui stesso si definiva così: "Non sono che un operaio. In fondo sono partito da lì e penso che tutto ciò che ho fatto nella vita, l'ho fatto molto semplicemente, senza pormi interrogativi profondi".²

I suoi successi si svilupparono in linea con le ricerche che il movimento moderno stava svolgendo in campo architettonico, in particolare l'evoluzione del processo scientifico e tecnico nelle costruzioni avvenuto per effetto di una radicale trasformazione sia dei mezzi di produzione che dei materiali e delle tecnologie impiegabili.

L'impiego dell'acciaio, del vetro, del cemento armato sono sicuramente gli esempi più evidenti del processo di trasformazione che ha condizionato l'architettura del XX secolo. Il rapporto tra industria e architettura, tra prefabbricazione e progettazione, la volontà di razionalizzazione del linguaggio architettonico e delle sue tecniche costruttive, sono

alcune delle grandi rivoluzioni che hanno coinvolto l'architettura nei primi anni del Novecento, avviando un periodo di grandi mutamenti che hanno coinvolto le tecnologie costruttive del tempo.

Oggi la necessità di efficienza energetica ci costringe a ridefinire alcune delle esigenze che i "filtri innovativi" progettati da Prouvé soddisfacevano già in quegli anni.

La spontanea vocazione di Prouvé all'industrializzazione lo ha portato a rifiutare la tipica facciata continua con montanti verticali e traversi a favore di sistemi modulari più complessi. Ciò significa che fin dall'inizio Jean Prouvé ha progettato e realizzato componenti per involucri totalmente prefabbricati, di concezione molto più moderna rispetto alle facciate continue prodotte diversi anni dopo nell'architettura americana.

Tra il 1948 e il 1952, l'intensa attività creativa di Jean Prouvé si concentrò su tre filoni di ricerca degni di nota: la Maison Metropole, le facciate urbane e le facciate a fogli piegati.

La Maison Metropole

Vincitore di un concorso lanciato nel 1949 dal Ministero della Pubblica Istruzione per "una scuola rurale industrializzata e una classe con la casa dell'insegnante", gli Ateliers Jean Prouvé realizzano due copie della Maison Metropole. Progettata secondo il principio degli edifici a portale brevettati da Prouvé dal 1939, la Maison Metropole è stata pensata per adattarsi a qualsiasi sito e viene proposta in due dimensioni: 8x8m e 8mx12m. La sua struttura interamente in acciaio include due cavalletti portanti, che lasciano lo spazio interno flessibile a qualsiasi utilizzo.

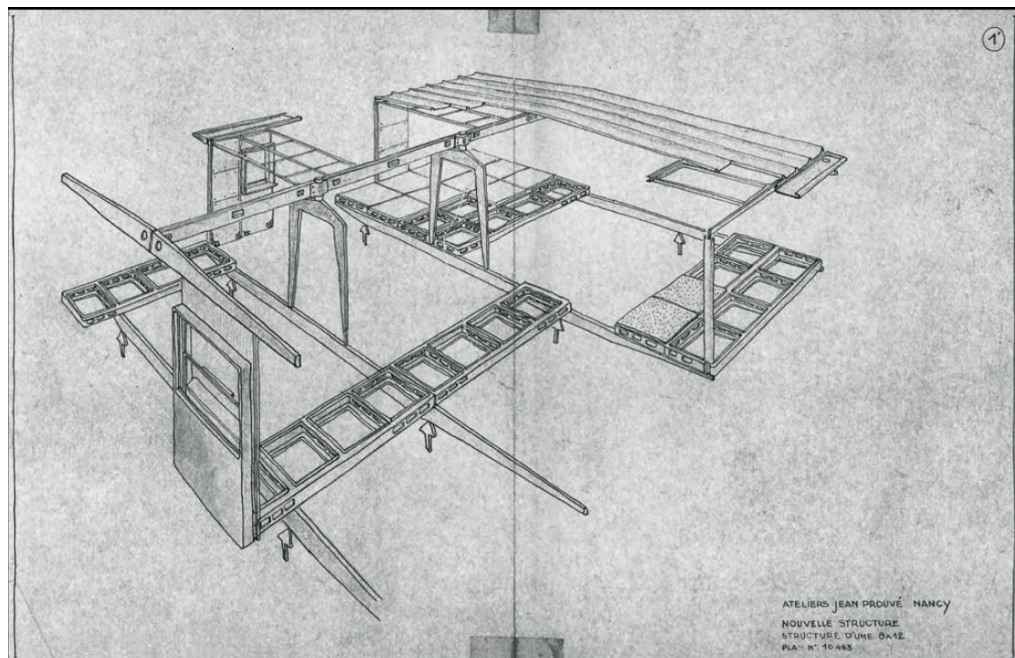


Figura 1. Sistema strutturale prefabbricato, Maison Metropole , Jean Prouvé, 1949

Il sistema è stato pensato per contenere i costi, ma allo stesso tempo il comfort generale mantiene degli standard qualitativi efficienti studiando in maniera approfondita l'isolamento termico e acustico, la circolazione dell'aria calda e la ventilazione. L'architetto è stato particolarmente attento alla disposizione funzionale delle stanze e ha fatto un uso fantasioso delle caratteristiche costruttive, finestre a ghigliottina retrattili, vetrate,

pannelli a oblò, tende da sole, nell'ideazione di transizioni visive verso l'esterno. Lavorando con una griglia di 97,5 centimetri, è stata possibile lavorare sulla progettazione di diversi layout interni. Per ridurre i costi, il numero di componenti è stato ridotto al minimo e la loro produzione adattata al materiale utilizzato: acciaio per la struttura e alluminio per la facciata intercambiabile e per i pannelli divisorii interni. Poiché il telaio a portale in metallo è il singolo pezzo più pesante da 57 kg, l'uso di lamiera pressata piegata in alluminio ha garantito un peso di 45 kg/m² per un totale di meno di 3 tonnellate per una casa di 8 x 8 metri.



Figura 2. Dettaglio del sistema di apertura dei pannelli di facciata, Maison Métropole, Jean Prouvé, 1949

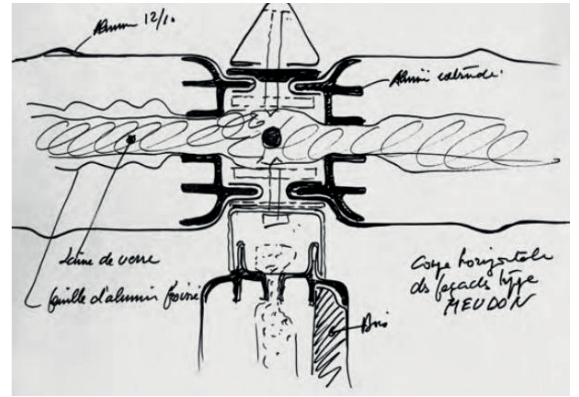


Figura 3. Schizzo dell'assemblaggio del sistema di facciata, Maison Métropole, Jean Prouvé, 1949

I pannelli per la casa Métropole sono un'estrapolazione dei componenti creati durante la guerra e successivamente utilizzati in una serie di varianti. Un unico componente a doppia faccia che incorporava finestre e persiane battenti che si ritraggono nella custodia in alluminio. Mentre il meccanismo per la retrazione delle ante e delle persiane è rimasto lo stesso, l'utilizzo dell'alluminio per l'involucro, ha portato notevoli miglioramenti tecnici e funzionali. I telai dei pannelli comprendevano speciali sezioni in lega di ghisa su cui veniva inserito un sottile foglio di alluminio, consentendo un doppio isolamento. Il montaggio era visibile esternamente, con piastre di copertura profilate, avvitate su strisce di gomma isolanti. Gli altri componenti standard in alluminio, come le lastre di copertura, i moduli del soffitto e la porta principale, provenivano dal catalogo Ateliers Jean Prouvé. I pannelli di facciata sono stati progettati per essere smontabili e intercambiabili in linea con le esigenze di ampliamento o modifica della layout. Il rapporto tra l'interno e l'esterno avviene tramite componenti specifici tra cui un giardino d'inverno, porte-finestre, porte a oblò e tende da sole.

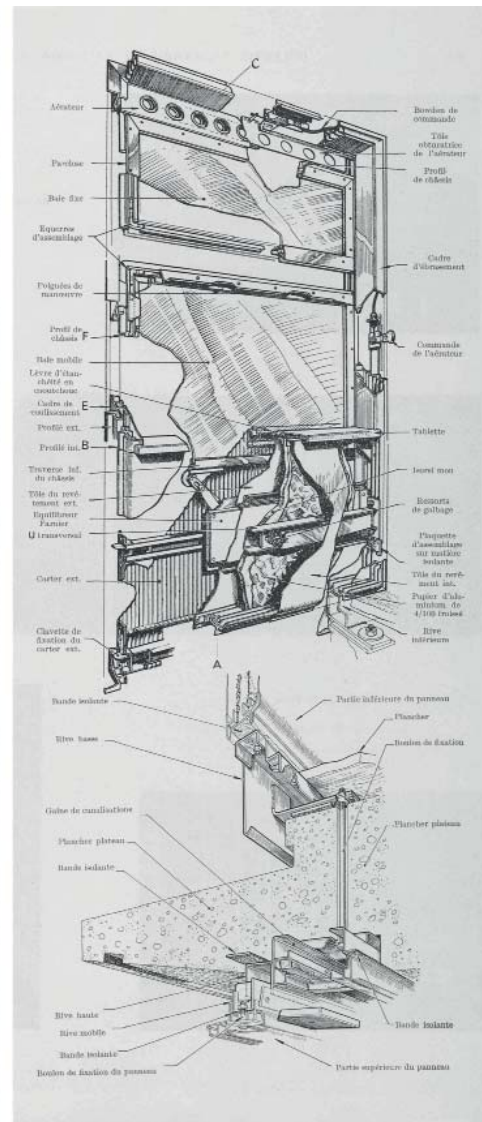
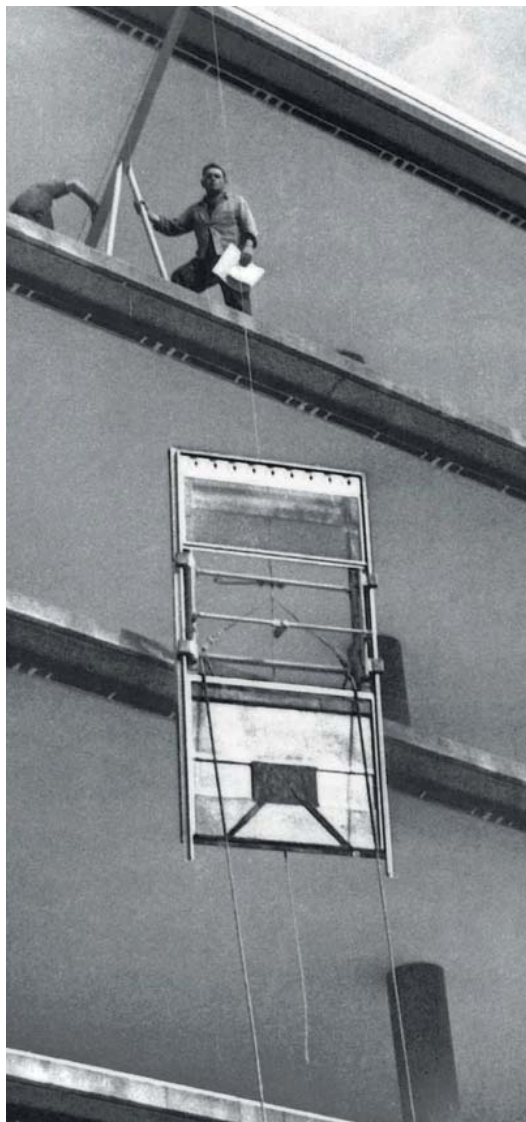
Le facciate urbane

In quegli anni Jean Prouvé ha introdotto la tecnologia della facciata negli edifici terziari. L'esempio più interessante è la sede centrale della Federazione nazionale del Bâtiment, progettata nel 1949 e costruita nel 1951.

L'edificio ha una facciata leggera con una concezione molto moderna. Realizzata con pannelli finiti unitari, sono moduli prefabbricati, che vanno a sostituire il sistema di montanti e i traversi tradizionali. Ognuno dei pannelli è identico, nella sua concezione di

base, al pannello della finestra che Prouvé ha usato per costruire le sue case unifamiliari. Il componente della facciata risulta elegante e slanciato, non è più un pannello opaco perforato, ma una serie sofisticata di componenti metallici la cui ripetizione offre un'immagine leggera e trasparente.

L'idea guida era quella di costituire due muri indipendenti, uno dentro e uno fuori, per poi riunirli meccanicamente degli elementi isolanti, in modo da limitare le dispersioni di calore attraverso le superfici metalliche. Tra questi due strati, vi è infatti un pannello di Isorel (fibra di legno) dello spessore di 20 mm. In questo modo, "la parete" frena lo scambio termico tra l'interno e l'esterno, mentre la ventilazione assicura l'evacuazione del vapore acqueo evitando i fenomeni di condensa.



³Dopo la seconda guerra mondiale, nel 1947, Jean Prouvé trasferì le sue officine alla periferia dell'agglomerato di Nancy a Maxéville

Figura 4. Sistema del pannello di facciata, Jean Prouvé, 1951

Facciate di fogli piegati

Come è stato spesso detto, per Prouvé, lo strumento di produzione è stato metodo essenziale del processo di progettazione. Nell'anno 1949, lo stabilimento di Máxeville

³ accolse con favore le nuove macchine piegatrici che potevano modellare i fogli di

alluminio senza dover ricorrere al metodo della saldatura. Fu perciò possibile creare ogni tipo di sezione. La sua visione del design dal processo di produzione e assemblaggio lo ha portato ad esplorare gli usi di quella macchina, per la quale ha progettato una facciate composte da elementi orizzontali: una rivoluzione nel mondo dell'architettura che non era mai stata studiata prima.



Figura 5. Dettaglio del sistema di frangisole in alluminio per l'Hotel de France, Jean Prouvé, Guinea, 1953

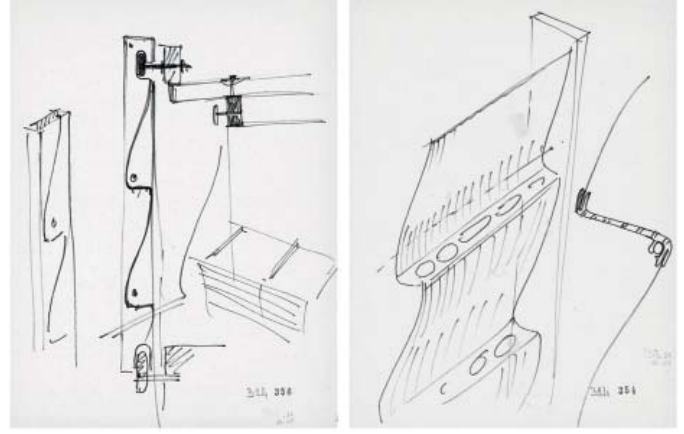


Figura 6. Schizzo del pannello "onda" con aeratori per edificio scolastico, Jean Prouvé, Camerun, 1964

Il periodo chiave per lo sviluppo delle facciate continue è stato quello degli anni '50 negli Stati Uniti, con molti progetti a New York e Chicago. Tuttavia, il lavoro pionieristico, come indicato in precedenza in questo capitolo, è stato intrapreso nel Regno Unito e in Francia, già prima dello scoppio della seconda guerra mondiale e proseguito dopo la conclusione del conflitto bellico con Jean Prouvé, pioniere chiave e principale esponente mondiale del metallo leggero utilizzato come rivestimento ed elemento di chiusura prefabbricato.

Tutti i primi progetti americani di facciata continua furono realizzati assemblando sezioni aperte di alluminio estrusi, combinate con sezioni presso piegate. Questi profili estrusi per le facciate continue, sebbene noti negli anni '60, sono diventati elementi standardizzati soltanto negli anni '80.

⁴ *Architectural Aluminium Manufacturers Association of America (1971) Aluminum Curtain Walls – The Rain Screen Principle and Pressure Equalisation Wall Design, AAMA, New York.*

Uno dei primi studi fatti sulle facciate continue è stato il rapporto dell'American Aluminium Manufacturers Association of America⁴ del 1971.

Nel Regno Unito durante gli anni '60 e '70, il brevetto per vetrate assemblate con profili aperti e guarnizioni di amianto erano una specifica tecnica tipica per quegli anni, per esempio il progetto di James Stirling e James Gowan per il Leicester Engineering Building, completato nel 1963, o l'ampliamento della Liverpool Playhouse, progettato dagli architetti Hall, O'Donahue e Wilson.

Sebbene i sistemi con guarnizione abbiano le loro origini negli Stati Uniti, con il primo centro tecnico della General Motors di Eero Saarinen, il principale uso di un sistema di facciata continua con guarnizione in neoprene si sviluppò nel Regno Unito. All'inizio degli anni '70, Modern Art Glass Ltd., in consorzio con Leyland e Birmingham Rubber Co. e Aluminium Systems di Dublino, ha sviluppato alcuni sistemi che utilizzavano neoprene nella sezioni strutturali. Nel 1983, alla Don Reynolds Ltd. è stato concesso un brevetto

per un sistema di guarnizione applicata su facciata continua. Alla fine degli anni '80, un rapporto del dipartimento commercio e industria [DTI] ha osservato che Don Reynolds era diventato uno dei principali esportatori di facciate continue dal Regno Unito, basate essenzialmente su un'unica idea progettuale, ovvero guarnizione in silicone strutturale, in un mercato altrimenti dominato soltanto da società europee. Questo sistema di guarnizioni in silicone strutturale è stato sviluppato principalmente Don Reynolds, con Dow Corning e Silicone Altimex, offrendo una gamma di colori di guarnizioni con resistenza agli agenti atmosferici e stabilità fisica garantite tra -60°C e $+200^{\circ}\text{C}$.

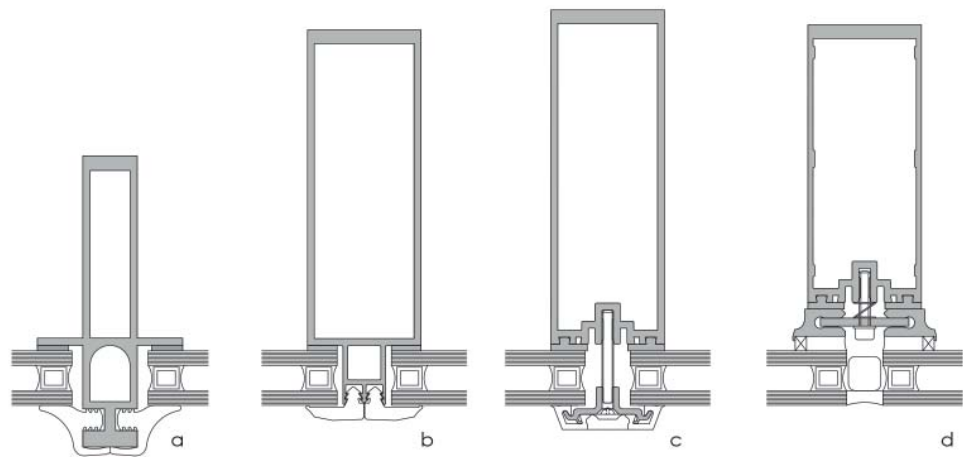


Figura 7. a) Presslock, b) Don Reynolds, c) sistemi di rivestimento e facciate continue con con guarnizione "Stoakes Systems" d) facciata continua legata con silicone

⁵ C. Reid (1976), *Courant in Göttingen and New York : The Story of an Improbable Mathematician*, Springer, New York

Sebbene l'uso di macchine a controllo numerico computerizzato (CNC), come le presse piegatrici per la formatura dei metalli, erano state introdotte negli Stati Uniti intorno agli anni '50, anticipando l'impiego del computer come strumento per la progettazione assistita, (CAD, Computer Aided Design), una data chiave per la progettazione di sistemi meccanici e componenti architettonici è il 1982, con il rilascio della prima licenza del software AutoCAD che rapidamente si inserisce nel mercato e viene adottato su larga scala dalle industrie di settore, ingegneri e architetti.

⁶ M. J. Turner, R. W. Clough, H. C. Martin and L. J. Topp (1956), *Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures*, *Journal of Aeronautical Sciences*, 23(9), pp. 805–823.

Altri due sviluppi chiave sono stati alleati e complementari all'utilizzo del CAD nella riduzione del peso dell'alluminio, mantenendo o addirittura migliorando le prestazioni. Il primo fu lo sviluppo degli elementi finiti [FEA], che consentì un'analisi numerica dettagliata delle strutture e fu sviluppata per la prima volta da Richard Courant nel 1943 ⁵.

Lo studio chiave è *Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures* di Turner, Clough, Martin e Topp, pubblicato nel 1956 ⁶. Negli anni '70, l'analisi degli elementi finiti delle strutture era comune nelle industrie aeronautica, automobilistica e della difesa grazie ai metodi di calcolo computerizzati. Negli anni '80, la riduzione dei costi degli strumenti informatici ha permesso la diffusione di prodotti come le facciate continue in alluminio anche nel settore dell'ingegneria e dell'architettura.

⁷ M. Stacey (2001), *Component Design, Architectural Press, Oxford*, pp. 169–172.

Il secondo fattore chiave è stato lo sviluppo di metodi di prova nazionali nel Regno Unito, e la definizione degli standard dell'American Architectural Manufacturers Association per prove dinamiche di facciate.

Questi metodi di prova hanno consentito di eseguire test olistici coerenti e comparativi di finestre e sistemi di facciate continue. Tali metodi di prova stabiliscono la capacità di resistere al carico del vento, la tenuta all'aria e all'acqua in una serie di cicli ripetuti ⁷.

In sostanza, l'industria delle facciate continue è stata uno dei leader nella diffusione dei test effettuati in loco nell'ambito delle costruzioni. Oggi questi sono considerati fondamentali anche per altre tipologie costruttive, ad esempio, il test di tenuta all'aria negli edifici a basso consumo di energia.

Durante gli anni '80, lo sviluppo della tecnologia nelle facciate continue prosegue il suo percorso di crescita principalmente nel Regno Unito e in Europa, grazie ai sistemi su misura ideati da Renzo Piano che utilizzano irrigidimenti in alluminio pressofuso e allo sviluppo di sistemi di pareti divisorie ben collaudati da parte di importanti aziende europee come Schüco.

Alla fine degli anni '80, erano presenti sul mercato:

- vetri brevettati;
- sistemi di facciata continua a pressione costante;
- sistemi di facciata continua con guarnizione;
- vetri incollati con silicone;
- vetri sospesi;
- vetri ignifughi;
- rivestimento antipioggia.

Qui di seguito verranno descritti alcuni esempi di architetture della seconda metà del XX secolo che hanno dato un notevole contributo di ricerca alla facciata continua in alluminio.

Alcoa Building, Pittsburgh, Pennsylvania, 1953



Figura 8. Installazione del primo di rivestimento modulare sull'edificio di Alcoa. 1953

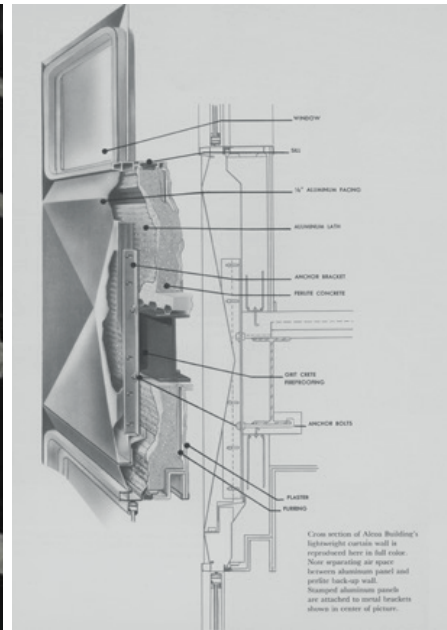


Figura 9. Disegno dell'unità facciata continua in alluminio dell'edificio Alcoa, 1953

⁸ Anon (1953), *Aluminum Skyscraper*, *Popular Mechanics*, December Vol. 100, No. 6, pp. 86–87.

Questa torre per uffici di 30 piani, nel centro di Pittsburgh, è stata progettata per Alcoa dagli architetti Harrison & Abramovitz e inaugurata nel 1953. *Popular Mechanics* l'ha descritta come "il primo grattacielo al mondo in alluminio"⁸ nel dicembre 1953. È rivestita con elementi in alluminio pressato modulari, che misurano 1.829 mm × 3.658 mm (6' × 12'), tutti preverniciati.

Né conviene che ogni pannello è alto un piano ed è dotato di finestre con angoli arrotondati. Le finestre a tutti i livelli degli uffici sono state prodotte dalla Adam & Westlake Company a Elkhart, Indiana. Esse sono progettate magnificamente, con un perno centrale che consente la pulizia dall'interno, possiedono un meccanismo di bloccaggio su ciascun angolo inferiore e sono sigillate con una guarnizione pneumatica all'interno del montante, che consente alla finestra di ruotare.

La facciata continua è stata oggetto di numerosi prototipi e modelli su larga scala realizzati da Alcoa in collaborazione con Harrison & Abramovitz.

Alcoa ha considerato l'edificio una dimostrazione di trenta piani dell'utilità, dell'economia e della bellezza dell'alluminio mostrando come esso sia allo stesso tempo pratico ed economico in quasi tutte le fasi della costruzione. La facciata continua, oltre ad essere modulare, è dettagliata con giunti aperti anticipando lo sviluppo dei rivestimenti anti-pioggia degli anni '60.

Quartier generale dell'azienda Pepsi-Cola, New York, 1959

⁹ Il termine pannello spandrel può essere usato, come in questo caso, per riferirsi a pannelli di rivestimento che riempiono lo spazio tra la finestra del piano superiore e quella del piano inferiore, nascondendo la struttura del solaio. Se realizzato in vetro opaco o traslucido, questo può essere indicato come vetro spandrel.



Figura 10. Sede mondiale della Pepsi-Cola Corporation a New York, 1953

La sede mondiale della Pepsi-Cola Corporation a New York, è un edificio situato all'angolo sud-ovest di Park Avenue e la 59^a strada, estremamente curato nei dettagli, l'edificio è adibito ad uso uffici.

Progettata da Skidmore Owings e Merrill (SOM) in stile internazionale, uno stile di architettura che risale all'Europa degli anni 1920 e fiorì in America dopo la seconda guerra mondiale.

Sembra un edificio simmetrico rettangolare di 10 piani separato dall'adiacente edificio in muratura, in realtà, questi sono collegati tra loro da nucleo di servizio a forma di L, rivestito di granito nero.

Gli architetti si sono spinti ai limiti di ciò che era tecnicamente possibile. La facciata è articolata da un sistema a curtain wall costituito da "riquadri" di vetro grigio-verde che misurano 2743mm (9') di altezza per 3.962mm (13') di larghezza, disposte all'interno di telai di alluminio anodizzato e montanti IPE;

Le vetrate erano le più grandi che si potevano creare con solo uno spessore di mezzo pollice. Per evitare l'uso di montanti o cornici pesanti, queste sono state bloccate da strisce di vetro in neoprene, consentendo una superficie esterna quasi completamente a filo muro, tant'è che i pilastri sono stati arretrati rispetto al vetro.

I pannelli "spandrel" ⁹ sono in alluminio anodizzato dello spessore 6,35 mm (0,25") e le travi esterne, IPE, sono estrusi in alluminio lucido.

Questo edificio è stato nominato "Building of the Year" dalla Municipal Arts Society e ampiamente elogiato dalla critica. Hitchcock lo definì "il massimo in termini di raffinatezza delle proporzioni e dell'eleganza dei materiali".

Sainsbury Centre for Visual Arts, Norwich, Inghilterra, 1978



Figura 11. Vista del Sainsbury Centre for Visual Arts, Norman Foster and partners, 1978

Il centro di arti visivi Sainsbury, situato presso l'università di East Anglia all'estremità sud-est del campus, è un edificio progettato da Norman Foster and partners e originariamente rivestito con un sistema integrato di pannelli in alluminio, lamelle in alluminio e pannelli completamente vetrati.

Il vuoto del sistema strutturale tubolare incornicia un involucro a doppia pelle che corre lungo le pareti e la copertura dell'edificio. L'intercapedine, adibita a servizi, ospita uffici, bagni e spazi di deposito.

I rivestimenti interni sono costituiti da aperture di alluminio perforate. I pannelli del soffitto regolano automaticamente la luce del giorno, diffusa attraverso delle aperture, controllate da foto-sensori sotto i lucernari, il telaio strutturale e attraverso le feritoie regolabili del soffitto.

Pareti di vetro che misurano 98,4 piedi X 24,6 piedi (30 m X 7,5 m) riempiono entrambe le estremità dell'edificio lungo. Gli elementi vetrati poggiano su profili di acciaio ancorati al solaio. Le lastre di vetro misurano 7,5 m X 2,4 m (8,0 piedi x 24,6 piedi) e sono unite da un sigillante siliconico strutturale.

Il lato esterno è rivestito con un sistema intercambiabile di pannelli larghi 6,9 piedi e alti 3,9 piedi (2,4 m X 1,2 m). L'isolamento nei pannelli dell'involucro rivestiti in alluminio è valutato a R-12 o $u = 0,08 \text{ Btu} / \text{ft}^2 \text{ } ^\circ \text{F}$ ($0,47 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ \text{C}$). I pannelli sono inoltre riflettenti la luce per il controllo delle temperature superficiali.

I diversi moduli in alluminio pieno, le vetrate in fibra di vetro e in alluminio sono assemblati con una guarnizione in neoprene continuo e fissati con sei bulloni ciascuno. I cornicioni curvi sono trasparenti nel punto in cui corrispondono al lucernario, mentre i pannelli in vetroresina trasparente vengono utilizzati anche su sezioni della parete sud per visualizzare le unità meccaniche e annunciare le porte a livello del suolo.

I pannelli nervati sono stati formati utilizzando alluminio superplastico e rifiniti con anodizzazione in argento, essi sono stati, però, completamente sostituiti a causa di un guasto prematuro, la cui ragione non è mai stata accertata. Tuttavia, si ritiene che sia stata la combinazione di due fattori: assottigliamento eccessivo negli angoli emisferici e produzione di acido solforico, causato dall'acqua che a contatto con il nucleo fenolico, ha provocato la corrosione dell'alluminio.

Va notato che il Sainsbury Center, completato nel 1978, fu il risultato di una sperimentazione innovativa dell'alluminio superplastico.

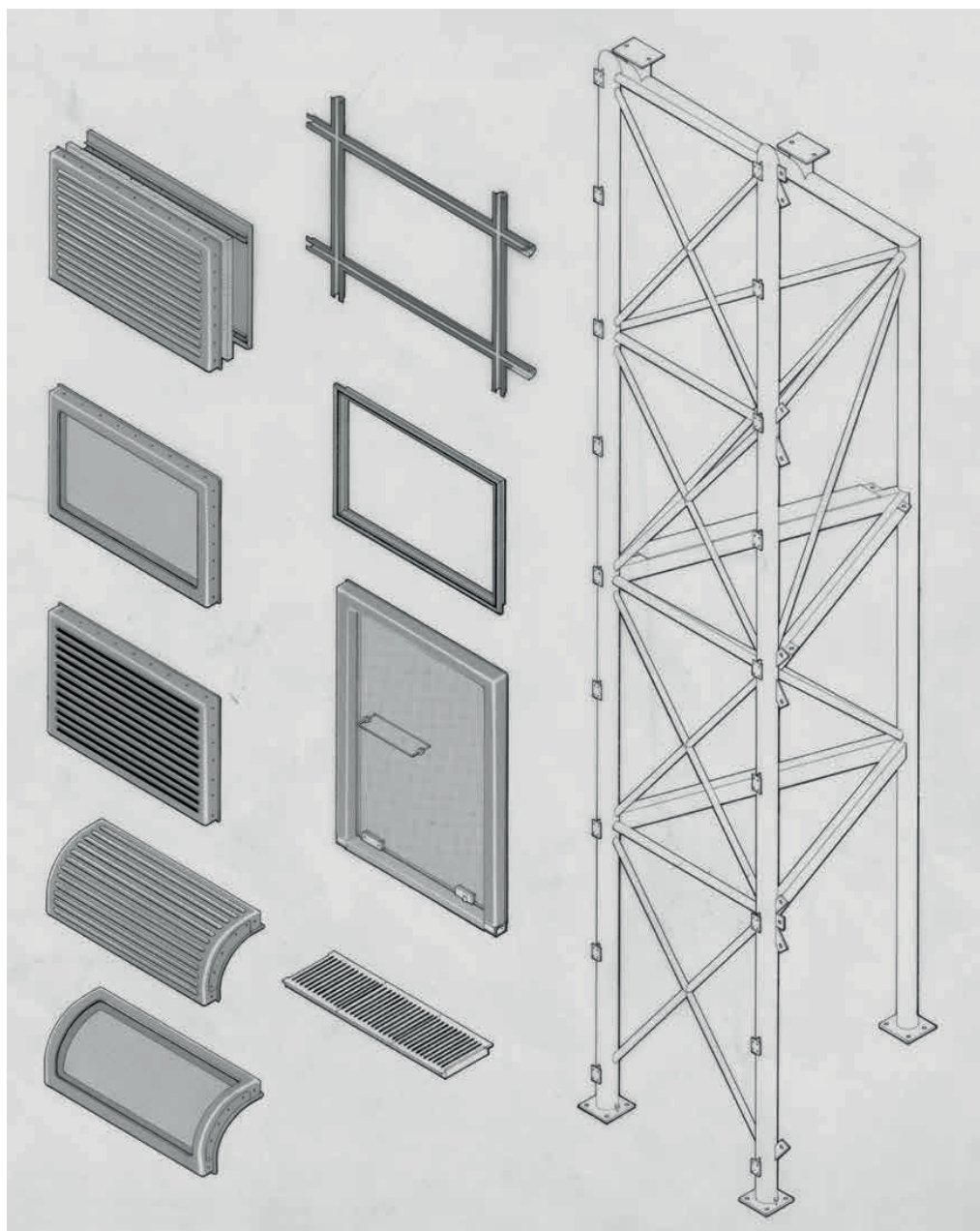


Figura 12. Disegni di dettaglio del sistema strutturale e del rivestimento esterno originale. Sainsbury Centre for Visual Arts, Norman Foster and partners, 1978

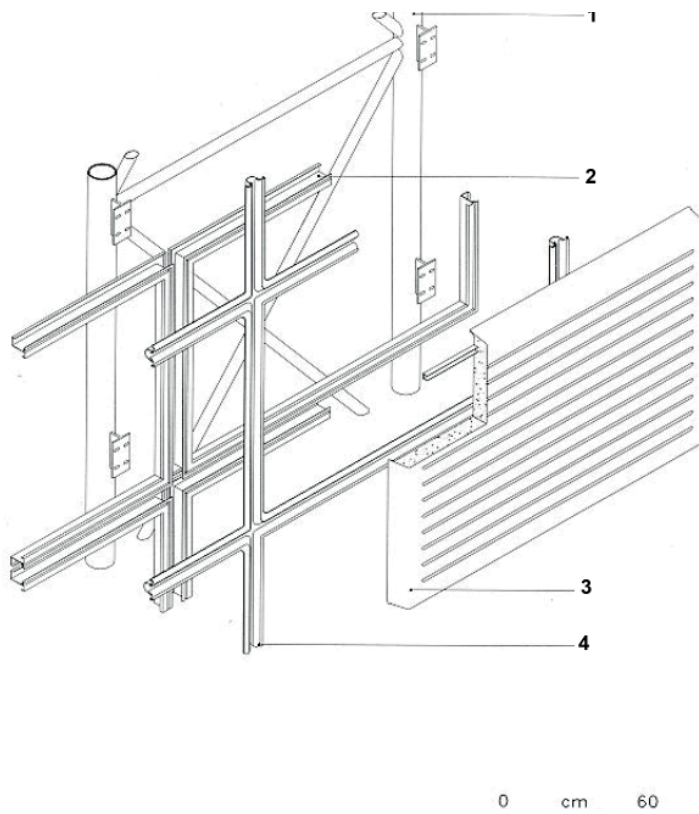


Figura 12. Disegni di dettaglio del pannello stampato in alluminio "superplastic". Esploso assometrico del sistema di tamponamento esterno.

1. struttura portante reticolare;
2. profili estrusi di alluminio per il fissaggio dei pannelli di tamponamento;
3. pannello stampato in alluminio "superplastic";
4. guarnizione estrusa in neoprene..

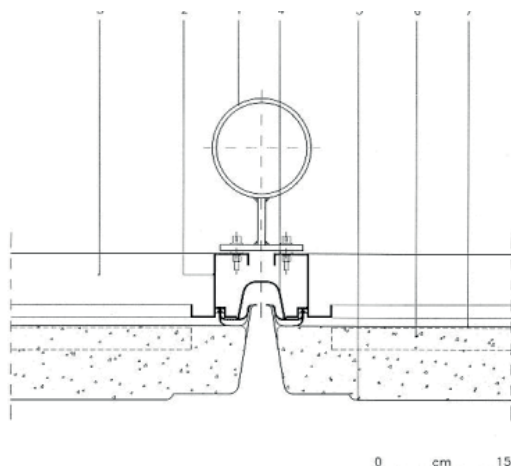


Figura 13. Pannello stampato in alluminio "superplastic". Sezione orizzontale del sistema di tamponamento esterno

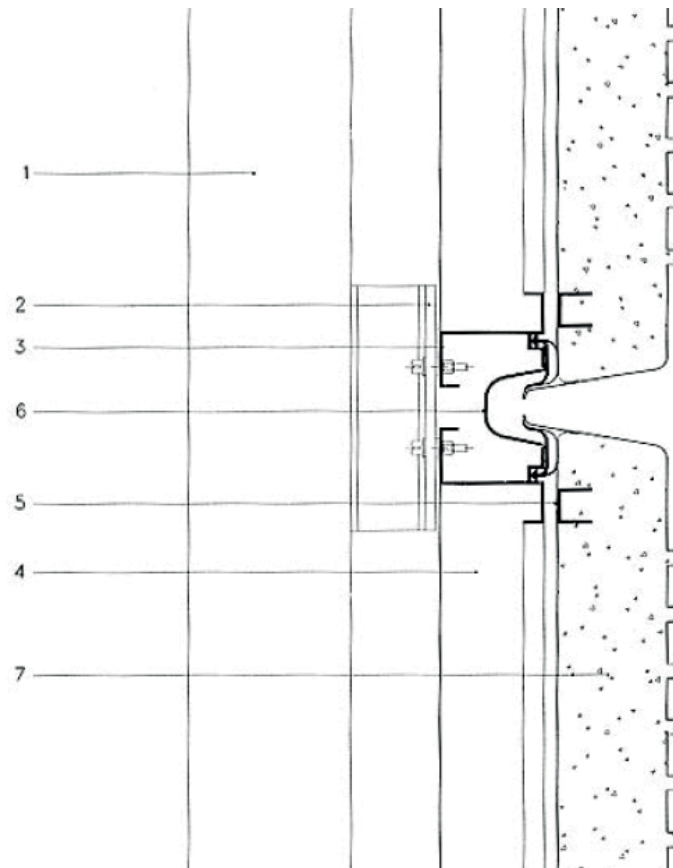


Figura 14. Pannello stampato in alluminio "superplastic". Sezione verticale del sistema di tamponamento esterno in corrispondenza del giunto orizzontale.

1. tubolare in acciaio della struttura portante;
2. piastra di ancoraggio della sottostruttura saldata al tubolare in acciaio;
3. traverso estruso in alluminio imbullonato alla struttura principale;
4. montante estruso in alluminio;
5. profilo a U in alluminio per l'ancoraggio dei pannelli alla sottostruttura;
6. guarnizione in neoprene con doppio canale di scolo per l'acqua piovana;
7. pannello stampato in alluminio "superplastic" con nervature di rinforzo.

Herman Miller, Chippenham, Wiltshire, Inghilterra, 1983

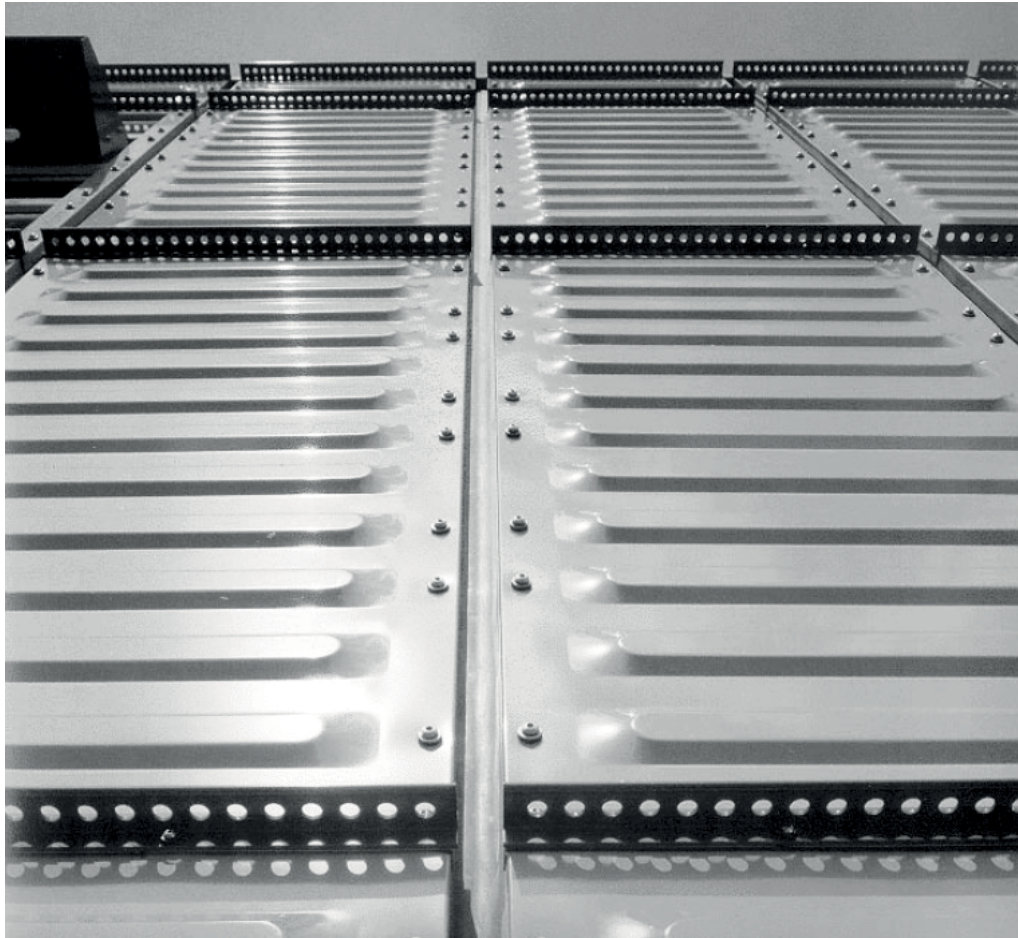


Figura 15. Vista dei pannelli di rivestimento dell'azienda Herman Miller, 1983

Progettato da Nicholas Grimshaw in collaborazione con l'architetto Neven Sidor, e completato nel 1983, l'edificio ospita il centro distribuzione e magazzino per l'azienda Herman Miller.

L'unità industriale è stata concepita per consentire all'azienda la possibilità di un ampliamento futuro, rispondendo alle esigenze di flessibilità richieste dalla committenza. Organizzato strutturalmente su un sistema di travi principali e secondarie, sostenute da pilastri distribuiti secondo una maglia di 10 x 20 m, l'edificio è rivestito da un involucro rettangolare, con gli angoli leggermente curvi, composto da pannelli di rivestimento in alluminio pressato che conferiscono alla facciata varietà e consistenza.

Il sistema di facciata flessibile e commutabile, si basa su una griglia di 2,40m x 1,20 m, ed è composto da pannelli concepiti come fossero un kit di moduli intercambiabili. I pannelli pieni, le finestre, le porte tagliafuoco e le porte di servizio possono essere smontati e spostati in qualsiasi altra posizione della griglia.

La pelle esterna è composta di pannelli sandwich di 1,20m di larghezza e 3,00m di altezza e da pannelli speciali curvi inseriti agli angoli e all'incrocio con la copertura.

Ogni modulo è composto da due pannelli secondari sandwich, con all'interno uno strato isolante termico, uniti attraverso una flangia perimetrale di 6 mm che permette la

formazione di un'intercapedine d'aria.

Realizzati in alluminio pressato dello spessore di 2 mm, i pannelli sono stati prodotti da Kinain Workshops e verniciati con polvere di poliestere in collaborazione con Acorn Anodising, usando tre polveri di poliestere blu Syntha Pulvin.

Nel prospetto dell'edificio, oltre l'aspetto cromatico, viene messo in evidenza anche il sistema meccanico di assemblaggio dei pannelli, in lamiera di alluminio, rispetto ai montanti verticali e le nervature a guscio, poste sulla superficie esterna, predisposte a rendere l'involucro più rigido e resistente.

La duttilità della facciata si riflette anche nell'organizzazione degli spazi per il personale, privi di gerarchia, adattabili e flessibili alle esigenze delle persone che vi lavorano.

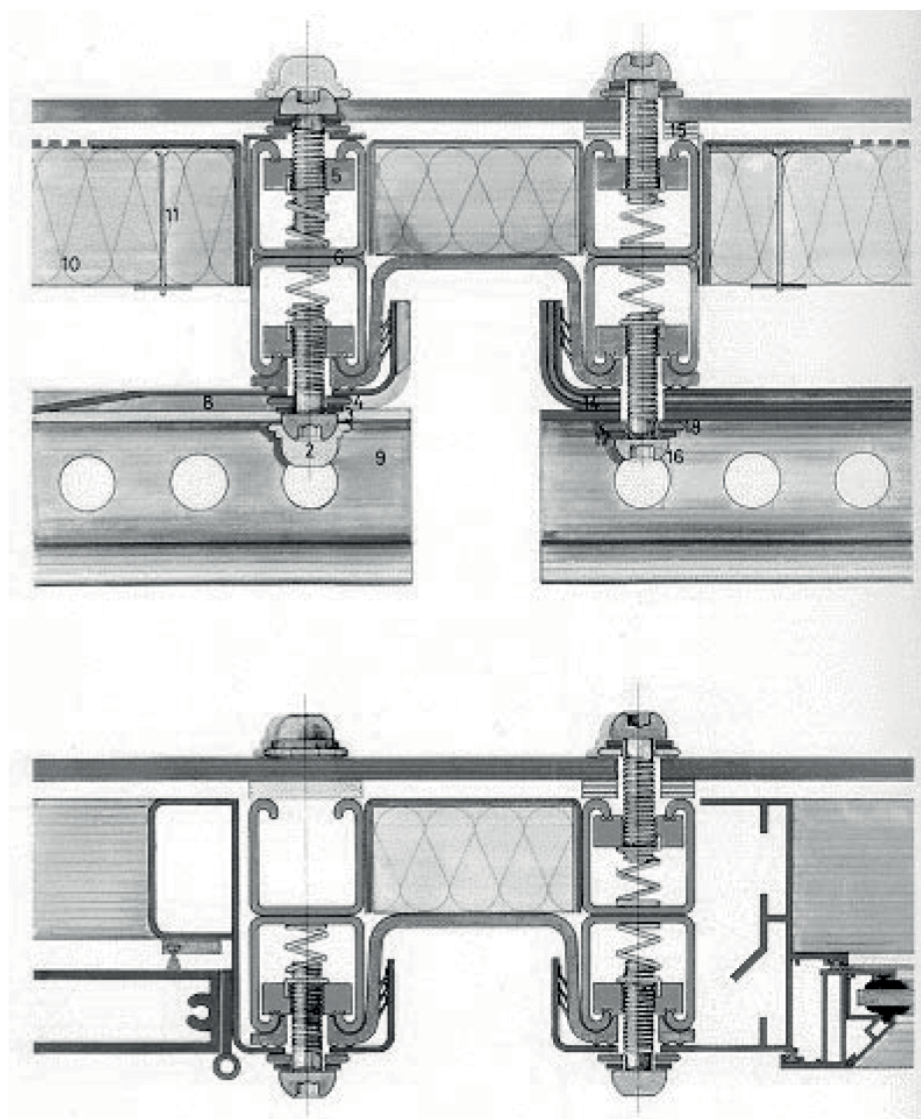


Figura 16. Composizione stratificata e schema dell'assemblaggio dell'involucro di facciata (sezioni orizzontali). I pannelli leggeri in lamiera di alluminio sono montati a secco ai montanti, sui quali si innestano ulteriori profili metallici per il supporto dei pannelli fono e termoisolanti

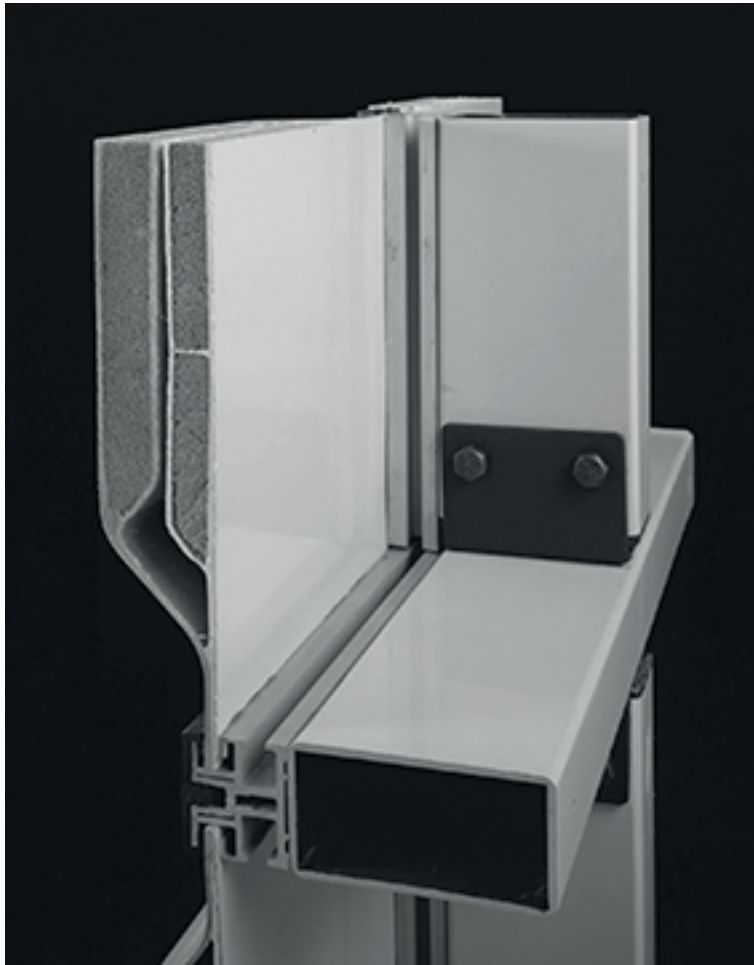


Figura 17. Sezione verticale dei pannelli dell'involucro costituiti da una doppia scocca in poliestere rinforzato con fibre di vetro (Glass Reinforced Polyester), risalta l'assemblaggio al montante verticale in acciaio mediante l'incastro a profili in alluminio estrusi.

Gli esempi riportati in questo paragrafo evidenziano come il rapporto sinergico tra progettazione architettonica e industria ha rappresentato, fin dall'inizio del '900, un punto di forza verso l'innovazione tecnologica nel campo del design di prodotto/edificio, fortemente influenzato anche da altri settori estranei all'architettura, come ad esempio quello aeronautico e aerospaziale, autori di importanti ricerche e rapide innovazioni. Il risultato di tali sinergie si è manifestato attraverso la creazione di joint-venture specifiche tra la sperimentazione di materiali alternativi e l'uso di tecnologie nuove da applicare agli edifici e ai prodotti di design con il mondo dell'industria e della catena di montaggio, realizzando prototipi e sistemi rivoluzionari per quegli anni, ma validi ancora oggi. È possibile notare infatti, come lo stesso involucro sia mutato distaccandosi irrimediabilmente dalla struttura, alleggerendosi nel peso, ma spesso aumentando il numero degli strati funzionali siti in uno unico componente modulare in grado di soddisfare numerose esigenze prestazionali (controllo climatico, ventilazione, illuminazione, ecc.). Le tecniche costruttive tradizionali sono state sostituite con sistemi prefabbricati composti da elementi modulari intercambiabili realizzati fuori opera che assolvono funzioni diverse.

1.3 I metalli: processi di produzione, tecniche di lavorazione e proprietà

La scoperta e l'utilizzazione dei metalli, come si è già detto, risale ai tempi remoti. L'etimologia del termine metallo deriva dal greco *métallon* che significa miniera e vengono così definiti tutti quei materiali ferrosi e non ferrosi, naturali, ma non di natura biologica, ricavati dalla lavorazione di minerali estratti dalle rocce. I metalli, infatti, non si trovano quasi mai in natura allo stato nativo, cioè non combinati con altre sostanze, per cui si è reso necessario procedere alla loro lavorazione non solo per estrarli dai giacimenti, ma anche per eliminare le impurità presenti e la tecnica relativa a tali procedimenti si chiama metallurgia.

Questi elementi tendono, con facilità, più o meno spiccata, a perdere elettroni; i suoi atomi sono tipicamente disposti in strutture cristalline comuni, parliamo di materiali, elementi composti o leghe con caratteristiche di durezza opacità e lucentezza, con una buona conduttività termica, elettrica ed alta densità. Sono freddi al tatto, ma assorbono la radiazione solare producendo un forte riscaldamento.

Le proprietà meccaniche dei metalli includono la duttilità, ovvero la loro capacità di deformazione plastica. La deformazione elastica reversibile nei metalli può essere descritta dalla legge di Hooke, secondo il quale lo sforzo è linearmente proporzionale alla deformazione. Forze più grandi del limite elastico, o calore, possono causare una deformazione permanente (irreversibile) dell'oggetto, nota come deformazione plastica o plasticità.

I metodi per ricavare i metalli dai loro minerali sono chimici oppure elettrolitici, in grado

cioè di separare il metallo dai residui per effetto della corrente elettrica.

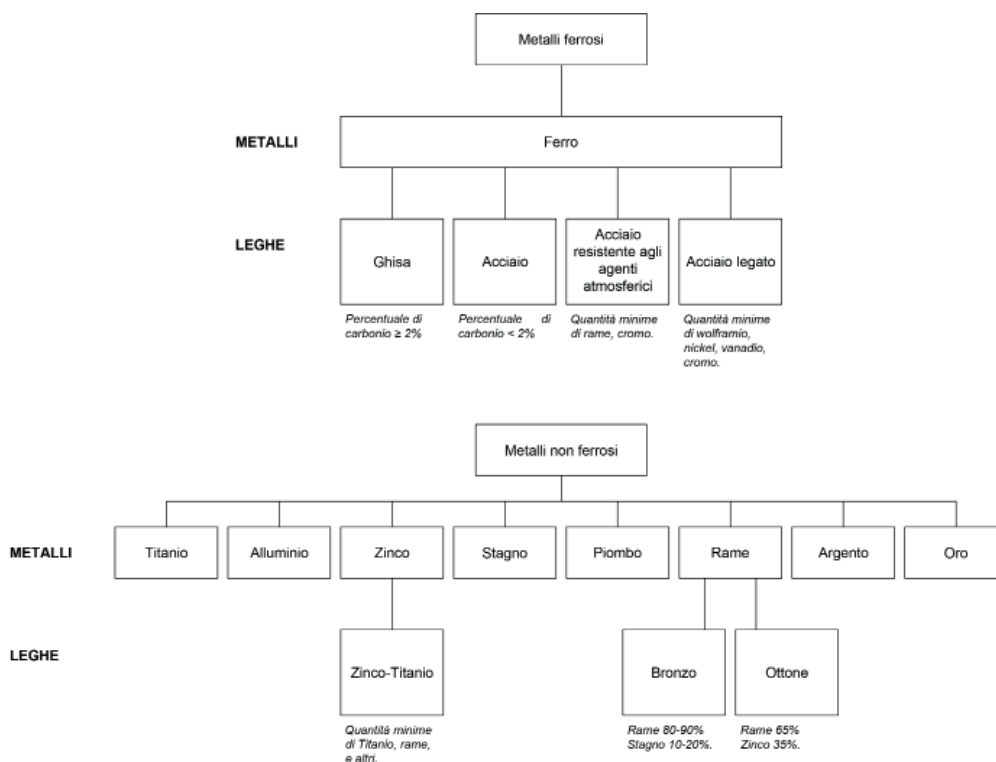


Figura 1. Panorama dei metalli e delle loro leghe

Il ferro è presente in natura prevalentemente sotto forma di ematite, limonite, magnetite e pirite; per poter essere adeguatamente impegnato occorre unirlo al carbonio e, sotto questa forma naturale, può diventare ghisa (maggior percentuale di carbonio) o acciaio (minor percentuale di carbonio).

Quest'ultimo prodotto rappresenta sicuramente un elemento fondamentale nel campo dell'evoluzione delle possibilità costruttive dell'uomo.

I minerali del ferro vengono trasformati nell'altoforno per ottenere la ghisa grezza la quale viene poi successivamente utilizzata per produrre le leghe siderurgiche, cioè ghise e acciai.

RAME

Nel 2016 la produzione globale di rame si è attestata a 19,4 milioni di tonnellate.

Il rame è un metallo tra i primi ad essere utilizzato già dalla preistoria sia come metallo singolo sia in forma di leghe - bronzo (insieme allo stagno).

I minerali del rame si trovano sulla terra sotto varie forme. E' presente ad una concentrazione di circa 30-33 grammi per tonnellata di roccia. I principali paesi produttori di rame sono il Cile, la Cina, il Perù, Stati Uniti, Congo, Australia e Russia.

Sono diversi i minerali che contengono rame, questi sono: azzurrite e malachite (famiglia dei carbonati), cuprite e crisocolla (famiglia degli ossidati) calcopirite e bornite (famiglia dei solforati). Questi ultimi rappresentano circa l'80% dei depositi mondiali di rame.

Produzione del rame riciclato

In Europa il fabbisogno di rame è sempre più soddisfatto dal riciclo; basta pensare che in Italia il rame è la materia prima di cui si dispone maggiormente, pur non possedendo miniere.

Offerta commerciale del rame

Il rame può essere reperito in varie forme: barre a varia sezione (tonda, piatta, quadra e fili tondi), tubi tondi, nastri sia crudo che cotto. Il rame commerciale, infatti si divide anche in crudo e ricotto. Il rame ricotto si ottiene attraverso processi termici tesi ad ottenere un metallo maggiormente duttile e malleabile ed utile per ottenere fili e lastre).

Caratteristiche e proprietà del rame:

Conducibilità elettrica: Il rame è il miglior conduttore dell'elettricità dopo l'argento,

Conducibilità termica: è il miglior conduttore di calore dopo l'argento. La sua conducibilità è circa 30 volte più alta dell'acciaio inox e 1,5 dell'alluminio.

Attitudine alla giunzione: è caratterizzato da una elevata attitudine alla giunzione sia per saldatura sia per brasatura.

Amagnetismo: è praticamente amagnetico; si utilizza questa proprietà nella strumentazione, nelle tecnologie avanzate e nel campo della bio-architettura

Proprietà meccaniche: Il rame ha elevata malleabilità e duttilità, cioè la capacità di deformarsi in laminati e fili

Proprietà chimiche: è un metallo di colore rosso. E' l'unico, tra i metalli puri di uso industriale, ad avere un potenziale elettrochimico positivo: questo gli consente di non sciogliersi negli acidi, a meno che non siano fortemente ossidanti. I prodotti della corrosione del rame sono spesso protettivi: per esposizione all'aria il rame sviluppa uno strato protettivo verde. I tetti con l'ossido che protegge il metallo sono praticamente "eterni".

Leghe di Rame

Tra le caratteristiche più importanti vi è la capacità di combinarsi in leghe.

Sono più di 400 leghe di rame, ognuna con la sua unica combinazione di proprietà, per rispondere ad una determinata applicazione, processo produttivo e ambiente.

Esistono vari sistemi di classificazione delle leghe di rame:

1. Sistema americano
2. Sistema ISO/TR 7003 e designazione uni
3. Sistema ISO 1191-1 E CR 13388

In linea di massima, tuttavia le leghe di rame si dividono (Fonte: UNIBS):

1 - OTTONI:

- OTTONI BINARI
- OTTONI AL PIOMBO
- OTTONI SPECIALI
- OTTONI PER GETTI

2 - BRONZI

- BRONZI ALL'ALLUMINIO
- BRONZI AL BERILLIO
- BRONZI ALLO STAGNO

OTTONE

E' una lega di rame e zinco; si dividono in ottoni binari (solo rame e zinco) e ternari, quaternari (in cui sono presenti altri elementi). Gli ottoni con contenuto in zinco fino al 36% hanno eccellente lavorabilità a freddo e a caldo. Gli ottoni con titolo in stagno tra il 36 e 45% sono ancora facilmente lavorabili a caldo. Diffusi sono anche gli ottoni al piombo (lavorabile su macchine utensili). Alla lega possono essere introdotti altri elementi con lo scopo di migliorare alcune caratteristiche della lega: manganese e stagno per migliorare la resistenza a corrosione, ferro per migliorare il carico di rottura, il nichel per migliorare le caratteristiche meccaniche, etc. Il bronzo appena prodotto presenta un colore rosso d'orato, ma sottoposto agli agenti atmosferici prima tende ad opacizzare poi assume colori dal marrone - grigio al marrone - antracite. Come il rame e il bronzo, le superfici inclinate, col tempo assumono un colore verde rame.

BRONZO

Nella maggior parte dei casi si intende una lega di Alluminio e rame, ma il metallo aggiunto può essere anche nichel berillio e stagno.

Il titolo dello stagno può arrivare sino all'8-9% realizzando leghe con buone caratteristiche meccaniche e grande resistenza alla corrosione. I bronzi si possono ancora laminare, estrarre, stampare e trafilare. Aumentando ancora il titolo dello stagno si ottiene una lega dal quale possono essere prodotti soltanto getti fusi. Si giungono a produrre bronzi fino ad un titolo in stagno del 30%. Una variante del bronzo è il contenuto di fosforo (fino a 0,8%) con lo scopo di ottenere maggior durezza dalla lega. Con questa lega è possibile produrre fili per maglie metalliche. (Theatre Royal 2003 l'architetto Ian Ritchie ha usato un tessuto di bronzo). Il bronzo fu usato in architettura già in epoca romana. Il Pantheon aveva la parte esterna della cupola rivestita di lamina di bronzo. Il bronzo ha una resistenza alla corrosione molto elevata (adatto anche ad ambienti marini). Il colore iniziale è rosso d'orato, ma col tempo si trasforma in un colore bruno- verde fino ad un marrone antracite e fino al verde rame. Anche il bronzo al fosforo, usato in architettura tende all'ossidazione mutando progressivamente il colore.

CUPRONICHEL

Sono leghe di rame in cui il nichel è il principale elemento aggiunto. Sono caratterizzati da una spiccata resistenza meccanica ed alla corrosione (adatta ad ambienti marini). Un titolo del nichel del 20 % porta la lega ad assumere un colore grigio simile all'alluminio. Questa lega viene sempre accompagnata da altri elementi per migliorare alcune caratteristiche (ferro per la resistenza meccanica, lo stagno per l'elasticità, etc.)

ZINCO

Lo zinco fa parte del linguaggio architettonico del XXI secolo.

Lo zinco è un metallo molto utilizzato e rappresenta il metallo principe nei processi

galvanici di rivestimento, come la zincatura, che forma una tipica texture sulle superfici trattate. In architettura è utilizzato in lega con il titanio.

Ha colore grigio chiaro-bianco e la sua superficie si presenta opaca a causa della formazione all'ossido; anche se lucidato in breve ritorna opaco se esposto agli agenti atmosferici. Interessanti i giochi di luce e colore che le superfici di questo metallo sono in grado di creare.

Lo zinco è uno dei più versatili materiali da costruzione in oggi uso. Impiegato in origine per le coperture, è apprezzato da molti architetti per la durata e il basso impatto ambientale: è riciclabile al 100%, richiede poca energia per produrlo rispetto ad altri metalli, è duttile e non necessita di manutenzione. È disponibile in una vastità di colori, non sono il grigio utilizzato prevalentemente nei tetti.

FERRO

L'industria Siderurgica rappresenta il ramo più importante di tutta la metallurgia; essa si occupa infatti della produzione delle leghe ferrose, cioè ghise e acciai, di cui è nota la grande importanza pratica.

Questa industria adopera come materie prime i minerali di ferro essenzialmente ematite, magnetite, limonite, siderite, le ceneri di pirite (i residui della combustione della pirite per la produzione di anidride solforosa appunto ricche di ossido ferrico), i rottami, come ferraglie di demolizioni di binari e materiale ferroviario, scaglie e battitura di laminatoi, eccetera, largamente utilizzati per la produzione dell'acciaio.

L'industria siderurgica non produce ferro puro, ma produce le leghe ferro-carbonio, in pratica la ghisa e gli acciai, che sono i prodotti di largo impiego. Nelle leghe ferro carbonio si riscontra la presenza di vari componenti, a seconda delle percentuali e del modo di formazione.

- Cementite: è un composto di composizione determinata e costante Fe^3C , cioè contenente il 6,67% di carbonio, a struttura interstiziale.
- Austenite: la quantità di carbonio è inferiore a quella della cementite, raggiungendo un massimo di 2,06%
- Ferrite: si differenzia dall'austenite per la ridotta quantità di carbonio (poche unità per mille).
- Ledeburite: è una micella eutettica di cementite e di austenite (quest'ultima allo stato di saturazione rispetto al carbonio 2,06%).
- Perlite: è una miscela eutettoide di ferrite e cementite
- Martensite: è una soluzione solida di tipo interstiziale di carbonio in ferro, ha una massa molto dura e molto resistente alle sollecitazioni meccaniche.

Tutti i materiali e di conseguenza anche gli stessi metalli, sono caratterizzati da caratteristiche o proprietà specifiche che ne influenzano i campi di applicazione.

Una conoscenza approfondita di questi materiali né permette il corretto utilizzo attraverso lo sfruttamento delle caratteristiche peculiari, infatti la scelta di un metallo o un altro dipende dalle sue proprietà, che si possono distinguere nelle seguenti:

- PROPRIETA' CHIMICHE
- PROPRIETA' FISICHE
- PROPRIETA' MECCANICHE

• PROPRIETA' TECNOLOGICHE

Le proprietà chimiche riguardano la composizione chimica dei metalli e della loro struttura interna.

Le proprietà fisiche di un materiale si riferiscono alle sue caratteristiche generali.

Le proprietà meccaniche riguardano la capacità dei materiali di resistere all'azione di forze o sollecitazioni esterne.

Le proprietà tecnologiche mostrano l'attitudine dei materiali a subire le varie trasformazioni

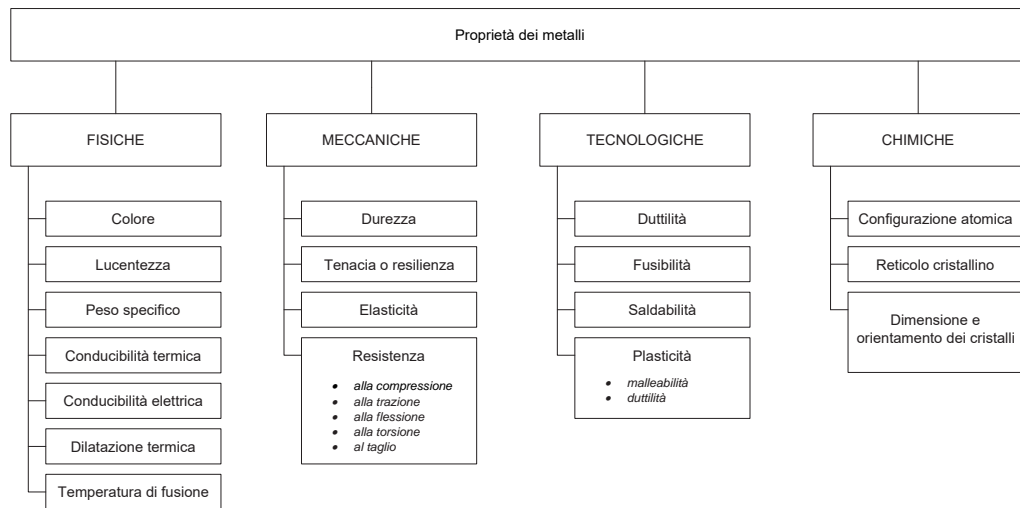


Figura 2. Diagramma delle principali caratteristiche dei metalli

TECNICHE DI LAVORAZIONE

Una volta che i metalli sono stati ottenuti dai minerali, si pone il problema di come dare loro la forma dell'oggetto voluto. A questo scopo sono necessarie delle macchine per la lavorazione della materia prima, la quale, a sua volta, deve essere stata preparata in pezzi di forma e dimensione diverse a seconda del metodo di lavorazione che si intendono adottare.

Le lavorazioni possono essere a caldo o a freddo, per deformazione della materia prima fino a ottenere la forma voluta, senza togliere al pezzo grezzo il materiale eccedente; o per taglio del metallo, asportando dalla massa le parti eccedenti di materiale. terminate queste operazioni, qualsiasi metodo di lavorazione sia adottato, il pezzo deve essere sgrossato e rifinito prima di poterlo impiegare.

Vediamo qui di seguito le principali tecniche di lavorazione plastiche dei metalli, che si basano sulla loro duttilità e malleabilità.

1-Fusione. Con questo metodo il metallo viene colato a caldo dentro stampi costruiti con la forma che intendiamo ottenere, senza taglio o asportazione di materiale. Gli stampi possono essere in metallo o in materiali terrosi refrattari al calore. Questo metodo si presta per la fabbricazione di pezzi che non richiedono una grande precisione dimensionale, anche se esiste la possibilità di effettuare fusioni più precise utilizzando modelli di cera. Per lo più i pezzi ottenuti per la fusione sono poi soggetti a operazioni di lavorazioni

successive con macchine utensili ad asportazione di truciolo.

2-Laminazione continua. E' normalmente eseguita su una linea continua che rotola direttamente dalla bobina. Il nastro, uscito dalla macchina rotativa di fusione, è avviato alla laminatoio a caldo tramite un ponte di sincronizzazione che mantiene una tensione costante variando la velocità di laminazione; passa quindi, dopo il bagno di raffreddamento al laminatoio a freddo. La tensione tra i due laminatoi è assicurata da un dispositivo esistente nel bagno di raffreddamento.

Il nastro è avvolto su un aspo, che viene sostituito periodicamente se richiesto, si possono tagliare lamierini piatti mediante la cesoia.

Non c'è limite alla lunghezza del prodotto finale se non quello imposto da manipolazione o trasporto (normalmente 13 m). Semplici linee di laminazione sono possibili per i calibri sottili di metallo (fino a 1 mm), ma profili più complessi per rivestimenti a campata lunga servono macchine con supporto fisso.

3-Estrusione. Con questa tecnica si fa passare il metallo, anche qui a caldo, attraverso una sezione di forma particolare, spingendo la materia prima con un pistone. Tale metodo si presta ovviamente non per produrre singoli pezzi di dimensioni limitate, ma profilati di una certa sezione e lunghezza.

4-Presso Piegatura. La piegatura della lamiera al suo stato freddo è relativamente un processo semplice, che utilizza una pressa piegatrice e una volta un foglio di metallo (di solito 2-4 mm di spessore) è stato tagliato sugli angoli, può essere formato all'interno di un vassoio usando uno strumento a forma di piegatura e gli angoli saldati. per permettere di fare questo i fogli devono per prima cosa essere tagliati prima ai loro angoli dalla pressa piegatrice. Oggi, la pressa piegatrice essere controllate da computer per produrre ampia varietà di profili per bordi. La dimensione del pannello, prodotto in questo modo, è limitata solo dalla grandezza del foglio e dalla lunghezza della presso-piegatrice.

5-Piegatura Con l'introduzione di computer più sofisticati meccanismi di controllo come CNC (Cambridge Numerical Controls), ora è possibile piegare il metallo in forme più complicate usando una piegatrice a due mani dove la precedente utilizzo dello strumento di piegatura a V può essere evitato.

6-Trafilatura. Simile al metodo precedente, la trafilatura viene però eseguita per lo più a freddo, e richiede che il materiale da trafilare abbia già la forma di barre; il materiale viene forzato a passare attraverso una sezione determinata.

Si tratta di un metodo che fornisce un prodotto finito di dimensioni molto precise.

7-Stampaggio. Anche in questo caso il materiale da lavorare deve avere una forma ben definita (in generale una lamina metallica). Presse molto potenti esercitano pressioni violente e pressoché istantanee sul materiale, facendogli assumere la forma voluta. Le deformazioni che il materiale subisce non devono però superare un determinato valore, altrimenti il materiale si snerva e perde di robustezza.

Tecnica normalmente associata all'industria automobilistica, dove può i numeri fanno la

differenza in termini economici, lo stampaggio può facilmente ammortizzarsi su un numero elevato di unità identiche. Lamiere profilate in acciaio e alluminio sono disponibili in profili sinusoidale, trapezoidali simmetrici e asimmetrici.

8-Fucinatura. Nei casi in cui non sia possibile contenere la deformazione del materiale entro certi limiti, lo stampaggio viene effettuato a caldo su metallo incandescente; si parla allora di fucinatura. Questo tipo di lavorazione richiede alla fine la sbavatura del pezzo fucinato, per asportare una certa quantità di metallo che sotto l'effetto della pressione tende ad uscire dallo stampo.

9-Imbutitura. È un processo tecnologico attraverso il quale una lamiera viene deformata plasticamente fino ad assumere una forma scatolare, cilindrica o a coppa. Consente la trasformazione di una lastra piana di metallo laminato in oggetti aventi con profonde cavità, procedendo gradualmente con uno o più passaggi a seconda della profondità richiesta. In teoria lo spessore del laminato non dovrebbe variare, in quanto la superficie del prodotto equivale a quella di partenza, in realtà lo spessore varia a causa della presenza di deformazioni secondarie.

ALLUMINIO

L'alluminio è un metallo non ferroso, leggero, duttile, di colore bianco argento con una notevole resistenza all'ossidazione. Questa caratteristica è data da un sottile strato di ossido che si forma quando è esposto all'aria e che ne previene anche la corrosione. L'alluminio grezzo viene lavorato tramite vari processi produttivi come la fusione, la forgiatura e lo stampaggio. Può essere lavorato molto facilmente con un'ottima durata in esercizio, non è magnetico e non produce scintille. A causa della formazione dell'allumina è necessario isolare il giunto di saldatura dall'ossigeno. Una delle caratteristiche negative di questo metallo è la difficile saldabilità.

Nel mondo si producono circa 31 milioni di tonnellate di alluminio all'anno, di queste, 7 milioni di tonnellate provengono dal riciclo.

La principale fonte di produzione dell'alluminio, oltre al riciclo di rottami, avviene attraverso l'estrazione dal minerale della Bauxite, una roccia sedimentaria che si presenta sotto forma di argilla granulosa o rocciosa, di colore rosa, rossa, bruna o grigia.

La bauxite appartiene alla famiglia delle terre ferro-silico-alluminose che comprendono anche le argille, le quarziti e le terre refrattarie però rispetto a queste ha un contenuto di alluminio maggiore e perciò più adatto al processo di estrazione del alluminio.

Diffusa soprattutto in Australia, Cina, Brasile, India, Guinea e Giamaica (aree tropicali e subtropicali), le riserve mondiali di bauxite sono molto cospicue (sono state stimate nel 2008 a circa 38.000.000 di migliaia di tonnellate). L'alluminio è il terzo elemento più diffuso sulla crosta terrestre.

Dalla bauxite viene estratta l'allumina (ossido di alluminio con formula chimica Al_2O_3) attraverso il processo Bayer, messo a punto nel 1887 dal chimico austriaco Karl Bayer.

Caratteristiche e proprietà dell'alluminio

Leggerezza: il suo peso specifico è pari a 2,70-2,75 kg/dm³, contro quello dell'acciaio

comune di 7,8-7,9 kg/dm³
Resistenza alla corrosione,
Duttilità e malleabilità:
Alta conducibilità elettrica
Alta conducibilità termica e sonora
Capacità riflettente
Amagnetismo

Resistenza alla corrosione

E' un metallo caratterizzato da una grande resistenza alla corrosione ambientale. La sua ossidazione passivante lo rende resistente alla corrosione dovuta all'acqua e molti agenti chimici (entro valori di pH tra 4 e 8, nonché al calore ed all'aria. Altri tipi di attacchi corrosivo, tuttavia, possono essere:

1. corrosione galvanica
2. fessurazioni (puntiformi)
3. corrosione intragranulare
4. corrosione esfoliante
5. da cricatura
6. corrosione filiforme

1. corrosione galvanica: due materiali, chimicamente differenti, messi in contatto tra loro con una soluzione conduttrice possono dar luogo ad un effetto pila. Alcune forme di giunzione (saldature) possono dar luogo ad unioni galvaniche. Su scala microscopica, questo tipo di corrosione può verificarsi anche tra componenti di leghe o metalli impuri. Particolari accoppiamenti di metalli possono aumentare la capacità di attacco alla corrosione (alluminio e rame o ottone, alluminio e acciaio inox). L'isolamento di un metallo rispetto all'altro evita la corrosione bimetallica. Durante le fasi di progettazione deve essere considerata questa possibilità.

2. fessurazioni (puntiformi): possono dar luogo a semplici fessurazioni puntiformi fino al deterioramento di tutta la superficie.

Le cause possono essere:

- geometria della struttura (lamiere, giunti)
- attrito tra metallo e parti solide non metalliche
- depositi di polvere, sporcizia, sabbia.

Una ventilazione non continua ha un ruolo importante; è un fenomeno complesso che induce alla formazione dell'acido all'interno delle crepe. Il tipo puntiforme è localizzata e si manifesta come rigonfiamenti o cavità. Spesso si realizza quando il metallo è a contatto con un ambiente umido (terreno), quando gocce di umidità condensata si depositano sulla superficie del metallo. Una volta asciugata la superficie, la corrosione si arresta.

3. corrosione intergranulare: è un attacco locale che si manifesta lungo i bordi dei grani del materiale. Questo meccanismo elettrochimico dipende dalla formazione di cellule sulla superficie dei grani metallici. Il grado di sensibilità di una lega verso la corrosione intergranulare dipende dalla sua micro struttura e quindi dal suo processo produttivo e da trattamento termico a cui è sottoposta. In fase di invecchiamento le leghe di Al - Mg - Cu possono essere soggette al fenomeno di corrosione intergranulare.

4. Corrosione esfoliante: è un attacco specifico che si sviluppa lungo i passaggi fra le superfici esterne dei grani metallici e corre parallelamente alla superficie del metallo. E' il tipo di fenomeno più comune delle leghe Al-Mg-Cu e Al-Zn-Mg-Cu trattate termicamente.
5. Da cricatura: è una separazione del materiale dovuta all'azione combinata di trazione e di un ambiente particolare. Un materiale che non possiede una resistenza alla corrosione può cedere ad un livello di sollecitazione inferiore a quello normale di rottura. E' un fenomeno che può dipendere da numerosi fattori.
6. Corrosione filiforme: questo tipo di corrosione può anche perforare sottili fogli. Si formano filamenti bianchi che vanno ad occupare la superficie del metallo non protetto o si formano sotto lo strato di rivestimento e comporta minor resistenza ad altri tipi di attacchi corrosivi. Risultano spesso più antiestetici che dannosi.

Riflessività

L'alluminio riflette meglio l'energia da irraggiamento (luce, calore, onde elettromagnetiche).

Resistenza al fuoco

L'alluminio non brucia. Fonde a 660° C. Grazie alla sua conducibilità termica, comporta una rapida dispersione del calore con la conseguenza che è necessaria una quantità di calore maggiore per portare l'alluminio ad una temperatura elevata, rispetto ad altri materiali.

Tecniche di saldatura dell'alluminio

La saldatura ossiacetilenica, TIG e MIG

- La saldatura TIG è un procedimento di saldatura ad arco con elettrodo infusibile (di tungsteno), sotto protezione di gas inerte, che può essere eseguito con o senza metallo di apporto. La saldatura TIG è uno dei metodi più diffusi, fornisce giunti di elevata qualità, ma richiede operatori altamente specializzati.
- La saldatura MIG è una saldatura ad arco con metallo sotto protezione di gas, può causare distorsioni del pezzo per eccessivo surriscaldamento; prevede l'uso di fondenti costituiti da fluoruri e cloruri alcalini (Litio, Sodio, Potassio) che reagiscono con l'allumina trasformandola in sali leggeri che rimangono sulla superficie del bagno. A saldatura ultimata si deve procedere ad un accurato lavaggio per evitare fenomeni di corrosione (bacchette tubolari contenenti il fondente si trovano in commercio).
- La saldatura elettrica per resistenza è applicabile senza impiego di fondenti ma considerata l'elevata conduttività elettrica e termica di queste leghe sono necessarie elevate intensità di corrente e tempi brevissimi. Viene utilizzata per spessori fino a 5 mm.
- Le saldature al plasma, con fascio elettronico e laser, forniscono dei giunti molto efficienti ma costosa che implicano considerazioni economiche a fronte di un'alta resistenza, elevata affidabilità.

Produzione di alluminio

La produzione di alluminio è ad alta intensità energetica, con l'elettricità che rappresenta una quota importante dell'energia consumata. Dato l'elevato livello di elettricità consumata nel sotto-settore dell'alluminio, la decarbonizzazione del settore energetico è

un complemento chiave agli sforzi di riduzione delle emissioni nell'alluminio.

Si prevede che la produzione globale di alluminio continuerà a crescere, trainata dalla crescita della popolazione e del PIL. Le transizioni di energia pulita avranno anche un impatto sulla domanda di alluminio, con un potenziale di pressione al rialzo da cambiamenti tecnologici che richiedono un maggiore utilizzo dell'alluminio, ad esempio per i veicoli leggeri e l'energia solare (che utilizza l'alluminio per vari componenti).

Tuttavia, l'adozione di misure di efficienza dei materiali può aiutare a frenare la crescita della domanda. Gli esempi includono la riduzione della generazione di scarti durante la fabbricazione e la produzione, il riutilizzo di vecchi scarti e la progettazione di prodotti pensando al riciclaggio.

Saranno importanti anche gli sforzi per ridurre l'energia e l'intensità delle emissioni della produzione di alluminio. Ciò include il miglioramento della raccolta e dello smistamento dei rottami per consentire una maggiore produzione secondaria e innovazione su nuove tecnologie di processo come gli anodi inerti.

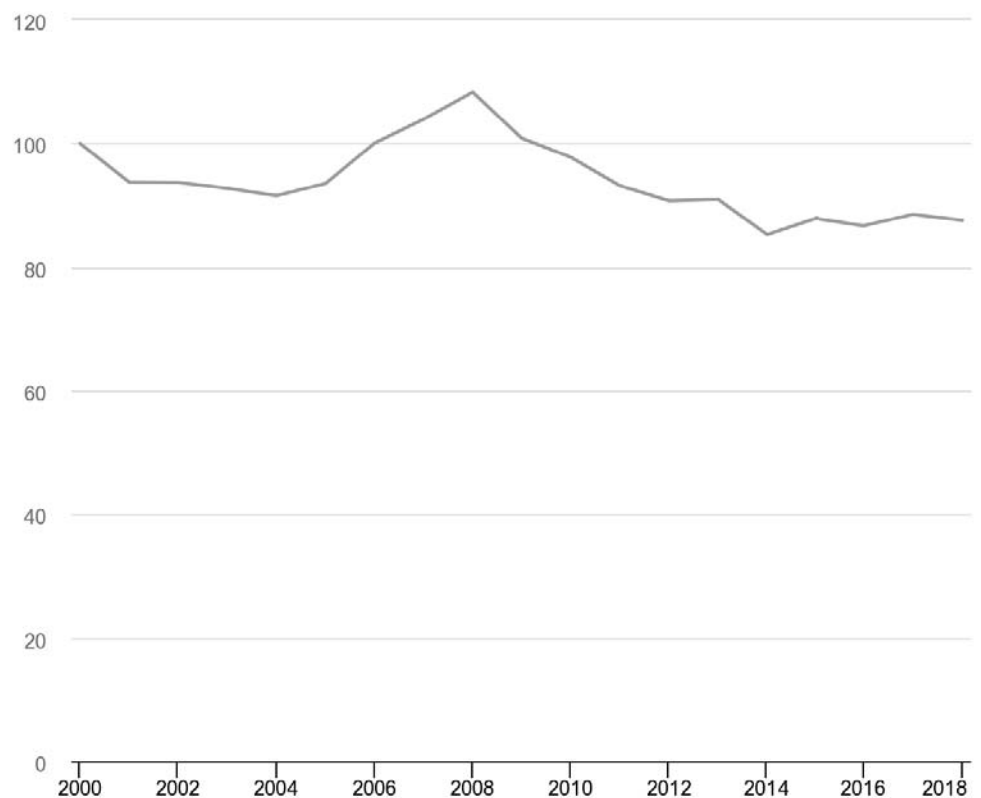


Figura 3. Le emissioni dirette di CO2 comprendono le emissioni di energia e di processo. La produzione di alluminio è di alluminio liquido, compresa la produzione primaria e la produzione riciclata da rottami vecchi, nuovi e interni. (fonte iea)

Nel 2018 la quantità di CO₂ derivante dalla produzione di alluminio è rimasta relativamente stabile con i livelli di emissione del 2014, tuttavia, la quantità delle emissioni deve diminuire dell'1,5% all'anno entro al 2030 e per raggiungerle tale obiettivo, sarà necessario migliorare la raccolta e lo smistamento dei rifiuti di alluminio per consentire una maggiore produzione dai rottami e lo sviluppo di nuove tecnologie atte alla riduzione delle emissioni dalla produzione primaria. I governi possono stimolare l'azione coordinando meglio la raccolta e lo smistamento dei rottami di alluminio, finanziando la ricerca e adottando politiche obbligatorie di riduzione delle emissioni di CO₂.

Produzione di alluminio riciclato

La percentuale di alluminio prodotta da metallo riciclato (produzione secondaria) influisce anche sull'intensità energetica media complessiva della produzione di alluminio. Nel 2018, il 33% dell'alluminio prodotto proveniva da rottami nuovi e vecchi, di cui il 60% da rottami vecchi. La quota della produzione secondaria è rimasta relativamente costante intorno al 32% dal 2000, ad eccezione di un piccolo calo temporaneo intorno al 2007.

La produzione basata sugli scarti tende a costare meno della produzione primaria, quindi il vincolo chiave è la disponibilità degli scarti. Nel 2018, i tassi di raccolta dell'alluminio erano superiori al 95% per i nuovi rottami e al 71% per i vecchi. Sebbene questi tassi siano elevati, esiste il potenziale per migliorare la raccolta dei vecchi rottami. Tuttavia, l'alluminio rimane bloccato nei prodotti fino alla fine del loro ciclo di vita, quindi anche con tassi di raccolta migliori esiste un limite massimo al potenziale di produzione riciclata. Sarà importante continuare a ridurre le intensità energetiche della produzione di alluminio primario e secondario ed espandere la produzione secondaria migliorando la raccolta e lo smistamento dei vecchi rottami, oltre a ridurre le perdite all'interno del sistema di riciclaggio.

La quantità di energetica globale derivante dalla produzione complessiva di alluminio (primario e secondario combinato) deve diminuire almeno dell'1,2% annuo entro il 2030. Una quota crescente della produzione secondaria sarà il volano principale per ridurre l'energetica impiegata per la produzione dell'alluminio.

Schiuma di alluminio

Negli ultimi anni si sta diffondendo un materiale di schiuma di alluminio stabilizzato per architettura, ottenuto da materia prima 100% riciclata e a sua volta riciclabile, prodotto iniettando aria nell'alluminio fuso, che contiene una dispersione di particelle ceramiche. Queste particelle stabilizzano le bolle formate dall'aria, proprio come fa il cacao in polvere quando viene aggiunto al latte.

Una schiuma metallica è una struttura cellulare costituita da un metallo solido - spesso alluminio - cui buona parte del volume è costituita da pori d'aria. I pori possono essere chiusi (schiuma a celle chiuse), oppure possono formare una rete interconnessa (schiuma a celle aperte). La caratteristica distintiva delle schiume metalliche è la porosità molto elevata: di solito il 75-95% del volume è costituito da spazi vuoti. La resistenza di un metallo espanso è relazionata alla propria densità con una legge esponenziale, cioè un materiale denso al 20% è resistente più del doppio di un materiale denso al 10%.

Le schiume metalliche in genere mantengono alcune proprietà fisiche del loro materiale di

base. La schiuma fa sì che metalli non infiammabili restino non infiammabili; i coefficienti di dilatazione termica rimangono simili, mentre la conducibilità si riduce leggermente.

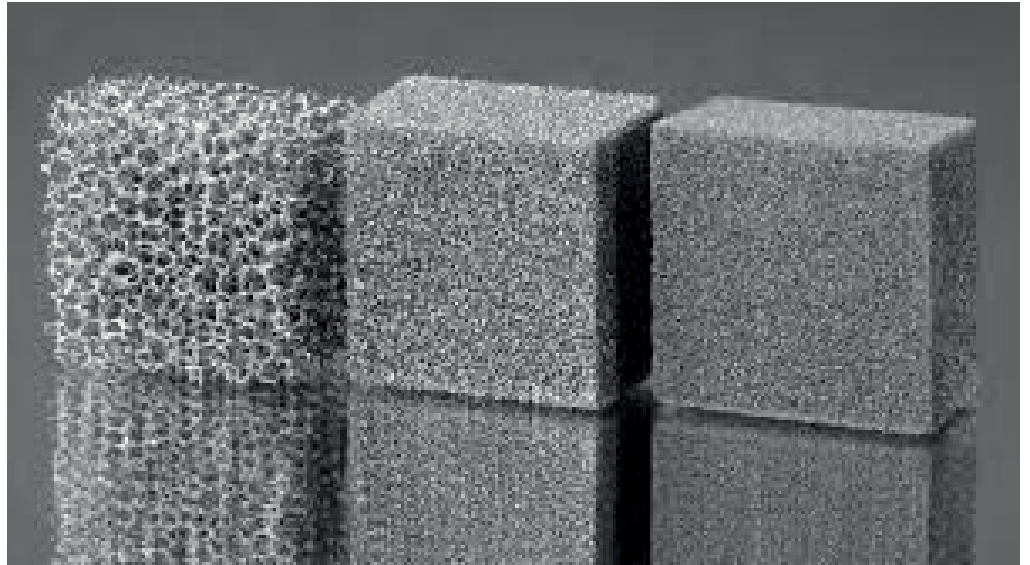


Figura 4. Schiuma di alluminio a poro aperto

Il primo brevetto rilasciato per una spugna metallica è stato quello di Sosnik nel 1948 che applicò vapore di mercurio per soffiare alluminio liquido.

Le schiume metalliche a celle chiuse sono state sviluppate a partire dal 1956 da John C. Elliott ai Bjorksten Research Laboratories. Sebbene i primi prototipi fossero disponibili già negli anni '50, la produzione commerciale è iniziata solo negli anni '90 grazie alla società di Shinko Wire in Giappone. Le schiume metalliche sono comunemente realizzate iniettando una miscela di gas o di un agente schiumogeno (spesso TiH_2) in metallo fuso. Al fine di stabilizzare le bolle di metallo fuso, è necessario utilizzare uno schiumogeno per alte temperature (particelle solide nanometriche o micrometriche). La dimensione dei pori - o la 'dimensione delle celle' - varia di solito da 1 a 8 mm.

Le schiume metalliche a celle chiuse sono utilizzate principalmente come materiale impatto-assorbenti, in modo simile alle schiume polimeriche dei caschi, ma per impatti più violenti. A differenza di molte schiume polimeriche, le schiume metalliche rimangono deformate dopo l'impatto e possono dunque essere utilizzate una volta sola. Sono leggere (in genere 10-25% della densità del metallo di cui sono composti, che è solitamente alluminio) e rigide, e sono spesso proposte come un materiale leggero strutturale. Tuttavia, esse non sono ancora stati ampiamente utilizzati per questo scopo.

Le schiume metalliche a celle aperte (dette anche spugne metalliche) sono utilizzate nelle tecnologie avanzate aerospaziali e nella produzione industriale; quelle di piccolissime dimensioni (tanto da non essere visibili a occhio nudo) sono utilizzate come filtri nell'industria chimica alle alte temperature.

Realizzate con un metodo di produzione in colata continua, una lastra alla volta, sono disponibili sul mercato in fogli standard del formato 1220 mm X 2440 mm o fino a 3660 mm di lunghezza (sono disponibili anche formati personalizzati)

Un materiale dalla superficie unica e dalla grande qualità estetica, fornisce buone

prestazioni acustiche e di resistenza meccanica, rappresenta quindi una grande opportunità creativa per i progettisti.

Le varie versioni di schiuma di alluminio possono essere utilizzate sia per applicazioni interne che esterne.

Pannello composito in alluminio tipo sandwich

Il composito in alluminio è un pannello sandwich prefabbricato, costituito da due facce esterne di alluminio e da un nucleo centrale in materiale sintetico termoplastico, (neoprene o polietilene).

Leggero e di facile applicazione, può essere tagliato, assemblato, piegato e sagomato in qualsiasi forma e dimensione. Questa versatilità ha permesso il suo impiego in diversi settori, che vanno dal design di oggetti, alla produzione di complementi di arredo e mobili, dalla cartellonistica pubblicitaria, alla realizzazione di stand fieristici e spazi espositivi, dalla produzione di rivestimenti per interni domestici, alla costruzione di intere facciate architettoniche.

A seconda delle diverse case produttrici che operano sul mercato, si possono trovare pannelli con diversi formati e dimensioni, ma nella stragrande maggioranza dei casi, i prodotti compositi in alluminio vengono fabbricati nelle dimensioni lineari standard di 1000 mm, 1250 mm o 1500 mm. Lo spessore complessivo del pannello può variare tra i 3 mm e i 6 mm.

L'anima interna costituisce circa il 90% del pannello composito e in base alle caratteristiche del materiale plastico scelto, può essere di colore nero, grigio o trasparente. Ad essa vengono applicati, tramite incollaggio, due fogli sottili di alluminio che conferiscono rigidità e stabilità al prodotto finale.

Ciò che incide molto, sia in termini di prestazioni, che nei costi di produzione, sono le due anime in alluminio. Esse possono avere diversi spessori che vanno da 0,2 mm a 0,5 mm. Essendo l'alluminio il materiale più costoso, è ovvio che i pannelli costituiti da lamine con spessori ridotti avranno un prezzo di mercato più vantaggioso rispetto a prodotti composti da fogli di alluminio più massicci. È altresì vero, che la riduzione dello spessore dello strato metallico determina una diminuzione delle prestazioni del pannello stesso.

La scelta corretta dello spessore del foglio in alluminio è strettamente associata al campo di impiego del prodotto finale: in caso di applicazione su superfici semplici e regolari, lo spessore non è un fattore particolarmente determinante per l'esito finale della facciata, mentre in situazioni con edifici dalle forme curvilinee e più complesse, è consigliato utilizzare fogli di alluminio di spessore non inferiore a 0,3 mm. Al di sotto di questo valore, risulterebbe più complicato ottenere superfici curve pulite.

Pannello composito in alluminio a nido d'ape

Il pannello composito a nido d'ape è un pannello sandwich realizzato con due fogli di alluminio laminati su un'anima a nido d'ape, incollati attraverso un processo di laminazione termica. L'anima a nido d'ape, di forma esagonale, è un'imitazione della struttura naturale dell'alveare, leggera, forte e solida.

Il comportamento delle strutture a nido d'ape è ortotropo, il che significa che i pannelli reagiscono in modo diverso a seconda dell'orientamento della struttura. È quindi necessario distinguere tra le direzioni di simmetria, le cosiddette direzioni L e W. La direzione L è la

direzione più forte e più rigida. La direzione più debole è a 60° dalla direzione L (nel caso di un esagono regolare) e la direzione più conforme è la direzione W. Un'altra importante proprietà del nucleo sandwich a nido d'ape è la sua resistenza alla compressione. A causa dell'efficiente configurazione esagonale, in cui le pareti si supportano a vicenda, la resistenza alla compressione delle anime a nido d'ape è tipicamente maggiore (a parità di peso) rispetto ad altre strutture con anima sandwich come, ad esempio, anime in schiuma o anime ondulate.

A seconda delle diverse case produttrici che operano sul mercato, si possono trovare pannelli con diversi formati e dimensioni, ma nella stragrande maggioranza dei casi, i prodotti compositi in alluminio sono reperibili nelle dimensioni lineari standard di larghezza pari a 1000 mm, 1250 mm o 1500 mm, e lunghezze da 2000 a 6000 mm. Lo spessore complessivo del pannello può variare tra i 6, 10, 15, 20 e 25 mm

L'ampia gamma di formati, spessori e tipologie permette al materiale di adattarsi alle più svariate applicazioni; il pannello viene impiegato nei settori auto-motive, navale ed industriale per applicazioni strutturali ed in campo architettonico per applicazioni che integrano esigenze strutturali ad estetica ricercata (ideale per produzione di rivestimenti di facciata a grandi moduli).

La forma della cella a nido d'ape è spesso variata per soddisfare diverse applicazioni ingegneristiche. Le forme comunemente utilizzate oltre alla cella esagonale regolare includono celle triangolari, celle quadrate e celle esagonali con nucleo circolare e celle quadrate con nucleo circolare. Le densità relative di queste cellule dipenderanno dalla loro nuova geometria.

Per concludere, tra tutti i metalli l'alluminio, nelle sue diverse forme è quello che più di tutti si presta alla realizzazione dei componenti di facciata. Infatti, le sue caratteristiche sono notevolmente performanti per lo scopo.

La sua resistenza e stabilità lo rendono un materiale notevole e dalle buone proprietà meccaniche. La sua leggerezza invece, lo rende un materiale facilmente lavorabile e nel caso di rivestimenti di facciata, consente un'installazione semplice e a basso costo. Materiali leggeri agevolano il lavoro notevolmente, facilitando considerevolmente le operazioni di montaggio, smontaggio e manutenzione in quota.

Il modulo elastico dell'alluminio è $E=690000$ daN/cmq, ovvero, circa un terzo dell'acciaio, il quale possiede un modulo di Young pari a 2100000 daN/cmq, ma per quanto richiesto dall'uso in facciata risulta essere più che sufficiente.

L'alluminio, viene impiegato anche per la realizzazione delle strutture portanti di alcuni edifici, come ad esempio serre o strutture leggere, poiché gli elementi longilinei e sottili, garantiscono comunque le necessarie prestazioni strutturali.

Per dare qualche riferimento numerico, l'acciaio pesa ben 7850 daN/mc, mentre l'alluminio si ferma a 2700 daN/mc. Un vantaggio considerevole in architettura.

Da un punto di vista architettonico, l'alluminio permette di realizzare qualsiasi forma pensabile, dai pannelli semplici, assi, lamiere semplici o complesse caratterizzate da forme speciali, curvature singole o doppie, disegni personalizzati, imbutiture e forature. L'alluminio è, infine, estremamente duraturo in quanto, come l'acciaio, genera una patina sottilissima di ossido grazie alla quale risulta inattaccabile dagli agenti atmosferici. La sua durata è assicurata per decenni.

Per la sua ottima durabilità, è conosciuto come uno dei materiali da costruzione più efficienti dal punto di vista energetico e sostenibili, oltre al fatto che può essere utilizzato in qualsiasi condizione climatica, da -80°C a $+300^{\circ}\text{C}$. Inoltre, alla fine del ciclo di vita, l'alluminio viene rifuso in nuovo alluminio senza perdita di qualità, garantendo una riciclabilità infinita.

Grazie a queste caratteristiche, gli edifici con un'alta presenza di alluminio hanno vinto numerosi premi per l'edilizia sostenibile tra cui LEED Platinum e Gold, assicurando che il materiale continui a essere fondamentale come svolta efficiente nel settore dell'architettura.

2 L'involucro edilizio per edifici energeticamente efficienti

- 2.1 Efficienza energetica in architettura: prospettive future del costruibile e del costruito**
- 2.2 Legislazione ed efficienza energetica: politiche europee e nazionali in materia di energia e ambiente**
- 2.3 Involucro come interfaccia per il miglioramento della qualità degli ambienti**

2.1 Efficienza energetica in architettura: prospettive future del costruibile e del costruito

Da tempo impegnata sul fronte clima, l'UE a partire dal Consiglio europeo di marzo 2007, per la prima volta propone un approccio integrato tra le politiche energetiche e la lotta ai cambiamenti climatici. Il Pacchetto Clima-Energia 2020, definisce importanti traguardi, meglio noti come obiettivi "20-20-20", che si sarebbero dovuti raggiungere entro il 2020.

- Riduzione delle emissioni di gas serra di almeno il 20% rispetto ai livelli registrati nel 1990;
- Aumento della quota di energie rinnovabili nel consumo energetico dell'UE fino al 20%;
- Ridurre il consumo di energia primaria del 20%, grazie al miglioramento dell'efficienza energetica

¹ L'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) è l'organo leader mondiale per la valutazione della scienza relativa ai cambiamenti climatici, i relativi impatti e potenziali rischi futuri, e le possibili risposte.

Giunti ormai alla fine del 2020, l'UE è sulla strada giusta per raggiungere gli obiettivi di riduzione delle emissioni di gas a effetto serra del 20% le politiche riguardanti l'utilizzo delle energie rinnovabili e di miglioramento dell'efficienza energetica.

Tuttavia il Rapporto dell'IPCC¹ delinea uno scenario molto allarmante, in particolare perché le temperature medie del Mediterraneo hanno già raggiunto gli 1,4 gradi, superando l'aumento medio globale di 1 grado e arrivando a sfiorare la soglia limite degli 1,5 gradi indicata a Parigi alla COP21. E' una situazione ad alto rischio che continua ad aggravarsi". E' quanto afferma Gianmaria Sannino climatologo dell'ENEA e responsabile

del Laboratorio Modellistica Climatica e Impatti. "Il Report evidenzia che gli eventi atmosferici estremi cui stiamo assistendo con ondate di calore e precipitazioni molto intense, stanno causando un grave degrado dei terreni agricoli con conseguenze sulla catena alimentare e sull'uomo". "In assenza di interventi urgenti e di un radicale cambio di paradigma anche nei consumi alimentari, i Paesi più avanzati rischiano situazioni di stress e depauperamento del suolo molto gravi mentre per altre regioni più povere del Pianeta si arriverà a vere e proprie crisi alimentari, con tutte le conseguenze che ciò può comportare" conclude Sannino.

l'IPCC in un rapporto, datato 8 ottobre 2018, sostiene come limitare il riscaldamento globale a 1,5°C richiede cambiamenti rapidi, lungimiranti e senza precedenti in molti settori quali suolo, energia, industria, edilizia, trasporti, e pianificazione urbana. Fornendo chiari benefici per le persone e per gli ecosistemi naturali, sarà possibile il raggiungimento di una società più sostenibile ed equa.

Le emissioni di CO₂ nette globali prodotte dall'attività umana dovrebbero diminuire di circa il 45% rispetto i livelli del 2010 entro il 2030, raggiungendo lo zero intorno al 2050. "Trasformare il nostro mondo. L'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile" è il documento adottato dai Capi di Stato in occasione del Summit sullo Sviluppo Sostenibile del 25-27 settembre 2015, che fissa gli impegni per lo sviluppo sostenibile da realizzare entro il 2030, individuando 17 Obiettivi.

Il mondo non è, attualmente, sulla buona strada per raggiungere l'obiettivo di sviluppo sostenibile 7 (SDG7), che chiede di garantire l'accesso a energia accessibile, affidabile, sostenibile e moderna per tutti entro il 2030. Il rapporto Tracking SDG7 The Energy Progress Report, pubblicato il 9 Aprile 2019 offre una visione generale circa i progressi effettuati in ambito di energia pulita, rilevando che circa l'11% della popolazione globale non dispone del beneficio dell'energia elettrica.

Negli ultimi anni sono stati compiuti notevoli progressi che hanno aumentato la possibilità di accesso alle risorse elettriche in diversi paesi del mondo, in particolare India Bangladesh e Kenya, di conseguenza la popolazione globale rimasta priva di elettricità è diminuita da 1,2 miliardi nel 2010 a 840 milioni nel 2017.

L'energia rinnovabile ha rappresentato circa il 17,5% del consumo totale di energia globale nel 2016. L'uso di energie pulite per generare elettricità, è aumentato rapidamente, mentre per ciò che riguarda il riscaldamento e i trasporti, il processo di rinnovamento risulta ancora lento.

È necessario quindi un ulteriore e sostanziale aumento della diffusione delle energie rinnovabili, affinché i sistemi energetici diventino accessibili, affidabili e sostenibili.

Nonostante i notevoli progressi compiuti negli ultimi dieci anni, le energie rinnovabili devono ancora affrontare persistenti ostacoli finanziari, legislativi, e talvolta tecnologici. Per incrementare il processo di diffusione delle energie rinnovabili, è importante che le varie politiche lavorino in sinergia al fine di integrare le energie rinnovabili nei sistemi energetici e supportarne direttamente il loro sviluppo nei diversi campi applicativi e favorendo la diffusione di una cultura indirizzata alla sostenibilità energetica e ambientale. A questo proposito l'Unione Europea, si impegna allo sviluppo di un sistema energetico sostenibile che limiti drasticamente l'utilizzo di fonti di energia fossile, raggiungibile solo promuovendo il risparmio energetico e aumentando la quota di consumo delle energie rinnovabili.

La direttiva UE 2018/2001 stabilisce che entro il 2030, in Europa, l'energia proveniente da fonte rinnovabile dovrà raggiungere almeno il 32%.

Nel 2015, in seguito alla 21° conferenza delle Nazioni Unite di Parigi (COP21), 195 paesi hanno adottato il primo accordo universale e giuridicamente vincolante circa i cambiamenti climatici.

Gli stati partecipanti hanno concordato di:

- Mantenere l'aumento medio della temperatura mondiale ben al di sotto di 2°C rispetto ai livelli preindustriali come obiettivo a lungo termine;
- Puntare a limitare l'aumento a 1,5°C, valore che permetterebbe di contenere in misura significativa i rischi e gli impatti dei cambiamenti climatici;
- Promuovere la mitigazione delle emissioni di gas ad effetto serra, allo stesso tempo promuovendo lo sviluppo sostenibile;
- Procedere successivamente a rapide riduzioni al fine di pervenire ad un equilibrio tra emissioni e assorbimenti nella seconda parte del secolo.

In questo contesto, se si considera che circa il 50% dell'energia globale è impiegata per il riscaldamento ed il raffrescamento, di cui l'80% negli edifici, è evidente come un ruolo fondamentale sia affidato al rinnovamento del patrimonio edilizio, poiché gli immobili sono responsabili di circa il 40% del consumo totale di energia. Un rinnovamento necessario che deve avere come obiettivi i principi di efficienza energetica e l'utilizzo di energia provenienti da fonti rinnovabili.

Il 19 Giugno 2018 è stata pubblicata, nella Gazzetta ufficiale, la direttiva UE 30 Maggio 2018, a modifica ed integrazione delle direttive 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia EPBD (Energy Performance of Buildings Directive) e 2012/27/UE (DEE) Direttiva sull'Efficienza Energetica.

Ogni stato membro definirà il proprio piano attuativo in modo indipendente, che, attraverso il rinnovamento del proprio patrimonio edilizio, condurrà gradualmente alla decarbonizzazione entro il 2050. Per raggiungere questo obiettivo, gli stati dovranno mettere in atto delle efficienti modifiche, valutando anche il rapporto costi/benefici, che trasformeranno gli attuali edifici in edifici a energia quasi zero (nZEB).

L'obiettivo principale dell'EPBD è la formulazione da parte degli stati membri dell'UE, di una legislazione nazionale, in cui viene prescritta, monitorata e incoraggiata la prestazione degli edifici, raggiungibile attraverso strategie e metodi applicati, sia per le nuove costruzioni che per i progetti di ristrutturazione.

L'obiettivo principale, proposto nell'EPBD, era che entro il 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione nell'UE dovranno essere progettati ad energia quasi Zero (nZEB). In altre parole, ciò significa che gli edifici dovranno avere prestazioni energetiche molto elevate e che l'energia necessaria per riscaldamento, raffreddamento, illuminazione, ventilazione e acqua calda sanitaria dovrà provenire principalmente da fonti di energia rinnovabile, prodotte in loco o nelle vicinanze. Per raggiungere gli obiettivi degli edifici nZEB, l'Unione Europea consente, ad ogni stato membro, autonomia di applicazione e di implementazione dei criteri minimi di rendimento, motivo per cui, questi possono variare, rendendo di fatto difficile il confronto diretto.

Al di là delle diverse normative applicate o in corso di definizione nei diversi stati membri, nel 2020, gli involucri edilizi dovranno avere le seguenti caratteristiche:

- Essere energeticamente efficienti, minimizzando il consumo di energia per

riscaldamento, raffrescamento ed elettricità, conservando o restituendo in rete, la corrente elettrica in eccesso;

- Adattabili;
- Economici, in termini di riduzione dei costi di manutenzione, e di ottimizzazione dell'intero ciclo di vita;
- Sicuri e resistenti agli agenti esterni, compresa l'umidità, il fuoco e le calamità naturali;
- Consentire e regolare l'illuminazione naturale e la visibilità;
- Consentire e regolare la ventilazione degli spazi interni;
- Resistere alle infiltrazioni di acqua piovana;
- Gestire l'umidità interna ed esterna;
- Isolare termicamente e acusticamente l'edificio da fattori esterni;
- Produrre energia;
- Inglobare gli impianti tecnologici;
- Attenti all'ambiente;
- Intelligenti;
- Durevoli.

A tal fine, occorre valutare l'attuale comprensione dei principi di costruzione a energia quasi zero nel panorama scientifico e politico interessato all'argomento. Pertanto, in una prima fase è necessario identificare e rivedere lo status quo di studi, principi e progetti relativi a edifici a energia quasi zero.

Un importante studio è stato condotto da Ecofys per il Building Performance Institute Europe (BPIE). Nella loro relazione, si identificano le principali sfide legate alla definizione di un edificio a energia quasi zero, e le implicazioni che ne derivano. Secondo lo studio BPIE, molti sono gli aspetti che devono essere considerati per la definizione pratica e coerente di un edificio ad energia quasi-zero.

Prima di tutto, va detto che la definizione di nZEB deve essere in linea con gli obiettivi generali imposti dall'UE in materia di emissioni di CO₂, efficienza energetica ed energie rinnovabili. Poiché le nuove costruzioni dovrebbero contribuire alla riduzione delle emissioni di CO₂, nella definizione dei loro principi guida, esse dovrebbero anche incorporare la definizione di "Edifici ad emissioni di Carbonio quasi zero".

Le disparità locali e temporali tra produzione e consumo di energia rinnovabile negli edifici dovrebbero essere considerate correttamente includendo tutte le produzioni sul posto, nelle vicinanze e all'esterno del sito.

Lo studio suggerisce che una definizione di edificio a energia quasi zero, dovrebbe includere anche una soglia per l'elettricità domestica utilizzata per le apparecchiature integrate (ad esempio ascensori e sistemi antincendio) che vanno oltre i comuni dei servizi, (riscaldamento, raffreddamento, ventilazione e illuminazione). Dovrebbe essere richiesta anche una valutazione del ciclo di vita (LCA), in quanto l'energia utilizzata per la produzione e lo smaltimento dei componenti dell'edificio diventa più importante quando il consumo di energia diminuisce durante la fase di utilizzo. Si sottolinea che un bilancio energetico comune per un gruppo di edifici richiederebbe una valutazione separata della domanda di energia e dell'approvvigionamento energetico.

Per raggiungere un equilibrio tra efficienza energetica ed energie rinnovabili, occorre stabilire una soglia per la massima richiesta di energia e un requisito minimo per la

percentuale di rinnovabili. Solo i sistemi di fornitura attivi dovrebbero essere in grado di contribuire alla quota di energia rinnovabile mentre i sistemi passivi dovrebbero essere associati a riduzioni del fabbisogno energetico.

Dal punto di vista pratico, l'obiettivo di nZEB può essere raggiunto attraverso soluzioni convenzionali di involucro edilizio termoisolante, nonché mediante un adeguato controllo del surriscaldamento estivo, fornendo servizi di riscaldamento, raffreddamento e ventilazione (HVAC) efficienti dal punto di vista energetico e non da meno attraverso sistemi di illuminazione altamente prestazionali.

Poiché le soglie numeriche concrete o gli intervalli non sono definiti nell'EPBD, questi requisiti hanno lasciato spazio all'interpretazione e hanno quindi dato agli Stati membri la libertà di definire il loro nZEB in modo molto flessibile, tenendo conto delle condizioni climatiche specifiche del loro paese, dei fattori energetici primari, dei livelli di ambizione, metodologie di calcolo e tradizioni costruttive. Questo è anche il motivo principale per cui le definizioni di nZEB esistenti differiscono significativamente da un paese all'altro. È quindi un compito impegnativo trovare un denominatore comune per definirlo su scala europea.

Per identificare le soluzioni costruttive ricorrenti utilizzate recentemente in Europa per costruire nZEB, il consorzio ZEBRA2020 ha raccolto i dati di 411 nZEBs¹. Gli edifici sono stati classificati in base alle zone climatiche comunemente definite, al diverso tipo di costruzione e al tipo di utilizzo.

Si può notare che la richiesta di riscaldamento negli nZEB è generalmente inferiore per le nuove costruzioni rispetto agli edifici ristrutturati.

Per quanto riguarda l'involucro edilizio, il polistirene espanso come materiale isolante sembra essere più frequentemente utilizzato negli edifici residenziali, mentre la lana di roccia è più utilizzata negli edifici non residenziali. L'uso di finestre a triplo vetro è di gran lunga il tipo più frequente tra le soluzioni di finestratura, seguito dalla finestra a doppio vetro a bassa emissione, che è più comune nei caldi climi estivi. Il valore U medio è chiaramente inferiore nei climi freddi invernali (circa $0,85 \text{ W / m}^2 \text{ K}$), mentre nei climi caldi estivi è di circa $1,15 \text{ W / m}^2 \text{ K}$.

Le tecnologie attive, la ventilazione meccanica con un sistema di recupero del calore (> 80% degli nZEB) è diffusa per tutti i tipi di edifici e climi, ma alcuni fattori discordanti sono stati invece trovati nella selezione dei sistemi di riscaldamento. Le pompe di calore sono la tecnologia più utilizzata, specialmente nei caldi climi estivi, mentre il teleriscaldamento è particolarmente utilizzato nei climi freddi invernali. D'altro canto, le caldaie, come tipologia di sistema di riscaldamento, sono più frequenti negli nZEB ristrutturati.

A proposito dell'uso delle energie rinnovabili, i sistemi fotovoltaici, e in particolare i sistemi solari termici, sono più comuni nei caldi climi estivi, dove le radiazioni solari sono più elevate. Nondimeno, oltre alle condizioni climatiche, l'uso delle energie rinnovabili è anche fortemente influenzato dalle strategie nazionali e dagli incentivi.

I risparmi attesi per gli edifici nZEB, sia nuovi che ristrutturati, sono a volte sovrastimati e dietro a questo problema ci sono vari fattori. Le diverse ragioni possono essere classificate in 4 categorie principali:

- l'impatto degli utenti;
- progettazione e pianificazione;
- messa in servizio, controllo e monitoraggio;

- altri fattori.

Il comportamento degli utenti sembra essere uno dei motivi cronici e ricorrenti, dal momento che essi non hanno spesso familiarità con le nuove tecnologie; mancano di conoscenza e consapevolezza ambientale.

Nel processo di progettazione e pianificazione, i dati di input sono imprecisi e alcune installazioni hanno dimensioni errate.

Sensori, sistemi di monitoraggio e controllo sembrano non essere correttamente impostati e calibrati, il che porta al malfunzionamento delle installazioni.

Tra le altre ragioni, possiamo trovare problemi di costruzione (ad esempio ermeticità), prestazioni inaspettate inferiori delle tecnologie utilizzate o altri problemi imprevedibili (ad esempio condizioni meteorologiche inusuali).

Si osserva dunque, come gli errori di stima dipendano da diversi fattori e come essi siano particolarmente legati all'uso dell'edificio (residenziale vs non residenziale) piuttosto che al tipo di intervento (nuovo vs rinnovato).

Tra le raccomandazioni per minimizzare l'impatto di queste cause, vi sono la formazione, il supporto, la partecipazione, la sensibilizzazione degli utenti dell'edificio, la progettazione integrata dell'energia con uno sforzo maggiore nel processo di pianificazione (ad esempio livelli di dettagli crescenti), il monitoraggio dei consumi di energia degli impianti termici, e la regolare manutenzione.

Nel 2017, l'osservatorio nazionale nZEB, avviato dall'ENEA, ha permesso di acquisire statistiche e informazioni sugli nZEB costruiti in Italia, nel biennio 2016-2017. Su un campione di 600 edifici, 80% di essi è di nuova costruzione, e l'88% è ad uso residenziale. Da una prima analisi, si evince come le strategie più adottate siano limitate a poche ed efficaci azioni:

- Isolamento dell'involucro edilizio
- Pompe di calore e impianto fotovoltaico, con la variante della caldaia a condensazione abbinata ad impianto solare termico.

il panorama edilizio esistente invece, è stato costruito con standard energetici e di sostenibilità molto bassi. Circa il 70% degli edifici esistenti ha più di 30 anni e circa il 35% ha più di 50 anni. Si tratta di un dato importante considerato che la maggior parte delle normative edilizie nazionali in materia di isolamento termico degli involucri edilizi sono state introdotte dopo gli anni '70 in seguito alla crisi energetica.

D'altra parte, la demolizione non è la soluzione ideale per gli edifici che "invecchiano". Per quanto riguarda materiali e rifiuti, diversi studi hanno dimostrato che il ciclo di vita di un edificio sottoposto a riqualificazione energetica è decisamente inferiore rispetto alla demolizione e alla successiva ricostruzione. Pertanto, la risposta ai requisiti di riduzione del consumo di energia, è la ristrutturazione del patrimonio esistente, con il fine di migliorarne le sue condizioni e aumentarne l'efficienza energetica. Gli edifici esistenti devono essere aggiornati affinché riducano al minimo l'energia minima proveniente da energie fossili non rinnovabili, fornendo al contempo comfort, salute, sicurezza e minori costi di gestione. Il risanamento, non solo fornisce enormi potenzialità per il risparmio energetico, ma è anche rilevante dal punto di vista economico e sociale, con il conseguente miglioramento della qualità di vita, nonché con l'aumento del valore immobiliare. Per i progetti riguardanti la ristrutturazione degli edifici esistenti, i criteri nZEB non sono obbligatori, in quanto i

lavori devono essere eseguiti in modo economicamente vantaggioso considerando i costi presunti di ristrutturazione nonché i risparmi derivanti dal rinnovamento energetico e tenendo conto del ciclo di vita previsto dell'edificio.

Tuttavia, in alcuni casi i criteri nZEB sono anche realizzabili per i progetti di ristrutturazione. Nel contesto della ristrutturazione, i principi di progettazione utilizzati per gli nZeb di nuova costruzione subiscono alcune limitazioni. La complessità degli edifici esistenti è un fattore importante e alcuni dei parametri che rendono effettivi tali criteri progettuali non possono essere modificati, e dunque, è necessario fare ulteriori considerazioni.

Sia nella progettazione di nuovi edifici ad alte prestazioni che nella trasformazione di quelli esistenti, il clima è sempre un limite o piuttosto, un punto di partenza per le strategie progettuali, in quanto determina l'energia necessaria per rendere confortevole un ambiente indoor.

Al fine di migliorare l'efficienza dell'edificio, i parametri chiave di ubicazione, orientamento e costruzione devono essere presi in considerazione.

L'orientamento dell'edificio è significativo per il comportamento dell'edificio stesso. Determina l'azimut e gli angoli di altitudine del sole rispetto alla facciata e l'intensità dell'irraggiamento solare. Questo è un fattore particolarmente importante da tenere in considerazione in fase di progettazione, non solo per l'uso solare passivo, ma anche per evitare il surriscaldamento interno. Negli edifici esistenti, tuttavia, l'orientamento pone una sfida aggiuntiva nell'attuazione dei principi di progettazione ambientale. L'orientamento è un dato certo e non può essere modificato come nel caso delle nuove costruzioni. Ad esempio, gli standard di bioedilizia della Passive/Active House, basati principalmente sul riscaldamento solare passivo, non sono facilmente concretizzabili in caso di una preesistenza architettonica.

L'involucro edilizio è il componente più influente per ciò che concerne il consumo di energia e come tale, dovrebbe essere l'obiettivo principale per le misure di risparmio energetico. Inoltre, è il sistema che soffre per lo più di problemi fisici, in quanto si confronta con le condizioni esterne e ha una durata di vita più breve rispetto ad altri componenti, come ad esempio la struttura.

Lo studio del patrimonio edilizio ha rilevato che l'80% dei problemi relativi ai consumi energetici, è correlato all'involucro. Il design, le condizioni degli elementi e le caratteristiche costruttive dell'edificio esistente, definiscono il potenziale miglioramento della domanda di energia.

Caratteristiche come la trasmittanza termica originale dei componenti dell'involucro edilizio (parete, superfici finestrate, coperture), la proporzione e la posizione delle aperture, le dimensioni degli aggetti, (balconi), influiscono sui consumi di energia.

La proporzione delle aperture rispetto al componente opaco, indicato anche come rapporto finestra-parete (WWR), è un'importante caratteristica dell'involucro edilizio. Oltre agli aspetti architettonici e funzionali, la dimensione delle finestre influenza la domanda di energia, poiché determina la radiazione solare che entra nello spazio abitato (apporti solari), ma allo stesso tempo è il componente con le prestazioni termiche più deboli, in particolare negli edifici esistenti, quindi, più grande è la superficie finestrata, più alte saranno le dispersioni termiche. Durante la fase di riqualificazione, cambiare l'aspetto esistente dell'edificio, modificando questo rapporto al fine di soddisfare i nuovi requisiti, può essere parte della strategia progettuale; scelta che però non è sempre

possibile attuare, poiché vincolata alla struttura o ad altri fattori.

Oltre al potenziale risparmio energetico, prima di procedere alla riqualificazione dell'involucro esistente, occorre fare una serie di valutazioni costruttivo-funzionali:

Una nuova pelle energeticamente efficiente, applicata ad un edificio esistente aggiunge un peso extra alla struttura portante, ampliare una finestra per migliorare le condizioni di comfort, significa che le parti in eccesso da rimuovere non dovranno gravare sulle condizioni statiche e strutturali dell'edificio. Anche in caso di aggiunta di uno strato di isolamento, è necessario controllare la presenza di umidità sulla parete esistente.

Ci sono dunque diversi motivi di cui tener conto nel rinnovamento degli edifici esistenti. Possono essere motivi tecnici, funzionali, economici e sociali. Tuttavia, guardando al quadro più ampio, la riqualificazione degli edifici è connessa alla sostenibilità e l'energia è un aspetto importante della sostenibilità.

Inoltre, la ristrutturazione è ecologicamente, economicamente e socialmente rilevante. Per discutere ulteriormente come i lavori di ristrutturazione possono migliorare le prestazioni degli edifici e contribuire al risparmio energetico nel settore dell'edilizia, è necessario sottolineare ancora una volta come le prestazioni energetiche del tessuto edilizio, abbiano un impatto sull'ambiente costruito. Tutto è quindi legato al comfort e alla funzione degli occupanti, in quanto l'edificio ha bisogno di energia per soddisfare le richieste. L'energia è inoltre necessaria anche nella fase di produzione e di fine vita dell'edificio. Pertanto, l'energia utilizzata durante la sua vita è parte dell'impatto ambientale di un edificio. Certificati di rendimento energetico con requisiti di riferimento sono stati introdotti o implementati nelle norme che regolano le nuove edificazioni o la ristrutturazione del tessuto esistente. Sono stati inoltre sviluppati certificati volontari, come ad esempio gli standard di valutazione delle prestazioni dell'edificio o del ciclo di vita (BREEAM e LEED). Le metodologie di valutazione delle prestazioni mirano a promuovere e sostenere la progettazione e il riuso di edifici efficienti. Queste metodologie possono essere viste più come un'indicazione delle caratteristiche degli edifici, piuttosto che delle previsioni precise. Tuttavia, rappresentano un passo importante verso una progettazione consapevole e devono essere utilizzate e considerati dai progettisti e dalle parti interessate per definire una strategia di riqualificazione.

Per ottenere gli aggiornamenti desiderati e creare edifici che offrano comfort riducendo il consumo di energia, devono essere applicati i principi di progettazione ambientale. In primo luogo, prevenire l'uso di energia (prevenzione); quindi, utilizzare le fonti energetiche sostenibili nel modo più ampio possibile (rinnovabile); infine, quando rimane ancora una domanda di energia, utilizzare i combustibili fossili nel modo più efficiente possibile (efficienza). Questi principi possono essere applicati sia per le nuove costruzioni che per quelle da rinnovare.

2.2 Legislazione ed efficienza energetica: politiche europee e nazionali in materia di energia e ambiente

La prima crisi petrolifera negli anni Settanta del secolo scorso, ha permesso un nuovo spunto di ricerca, poiché il consumo di energia è diventato in quegli anni, un parametro decisivo nella progettazione degli edifici. Ci si è trovati a dover tenere in considerazione il problema esauribilità delle risorse energetiche fossili, l'incremento dell'inquinamento nell'ambiente circostante ed il mutamento delle condizioni climatiche globali.

In Italia, in risposta al vertiginoso aumento del prezzo del petrolio, la prima norma sul contenimento dei consumi energetici negli uffici risale al 1976, quando viene emanata la legge 373/76 che prevedeva indicazioni e prescrizioni in materia di progettazione, installazione, esercizio e manutenzione degli impianti termici e isolamento termico degli edifici, introducendo per la prima volta concetti di coefficiente di dispersione volumico C_v , gradi giorno, la suddivisione del territorio nazionale in zone climatiche, il rapporto S/V , indicante la superficie disperdente rispetto al volume riscaldato.

Successivamente, sempre in Italia, vengono definite le norme per l'attuazione del piano energetico nazionale in materia di uso razionale di energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili attraverso la legge 9 gennaio 1991 n°10, prima legge quadro finalizzata a regolare le modalità di progetto e controllo del sistema edificio/impianto. In particolare, era necessario verificare la prestazione dell'isolamento termico delle superfici disperdenti ed il rendimento dell'impianto di riscaldamento, al fine di

¹ *Gradi Giorno (GG), intesi come la somma (estesa su tutto il periodo annuale convenzionale di riscaldamento) delle differenze positive giornaliere tra la temperatura ambiente (convenzionalmente fissata a 20°C) e la temperatura media esterna giornaliera ricavata dalla UNI 10349.*

contenere le dispersioni di calore ed il risparmio energetico prefissato.

La legge 10/91 trovò applicazione attraverso il suo decreto attuativo, ovvero il dpr 412/93, definendo i seguenti aspetti:

- Classificazione del territorio nazionale in funzione del numero di gradi giorno¹, in funzione dei quali il territorio nazionale veniva suddiviso in sei zone climatiche dalla A-F ed ad ognuna delle quali è associato un periodo convenzionale di riscaldamento;
- Classificazione degli edifici in base alla loro destinazione d'uso valida ancora oggi;
- Individuazione dei criteri di progettazione energetica sulla base del FEN (Fabbisogno Energetico Normalizzato) e del rendimento globale stagionale dell'impianto termico, anticipando di molto il concetto di indici di prestazione.

Anche l'Europa, a partire dagli anni '90, ha svolto un ruolo in prima linea a livello internazionale per fronteggiare i problemi relativi ai cambiamenti climatici e alla riduzione dei consumi energetici.

L'adesione di 15 stati membri dell'UE al Protocollo di Kyoto (PK) del 1998, è stato il primo passo verso la riduzione delle emissioni di CO₂. Il protocollo di Kyoto, che fa seguito alla convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici, è stato uno dei più significativi strumenti giuridici internazionali nei quali vengono definiti gli impegni dei paesi industrializzati a ridurre le emissioni di alcuni gas serra, responsabili del surriscaldamento del pianeta, fissando all'8% la quota di riduzione dei livelli emissivi rispetto al 1990. Per l'Italia l'obiettivo da raggiungere era ridurre le emissioni del 6,5% durante il periodo 2008-2012.

La necessità di ridurre la domanda di energia nel settore edilizio, progettando costruzioni energeticamente funzionali e migliorando l'efficienza degli edifici esistenti, è l'impegno che la società civile, professionisti e la comunità scientifica odierna deve assumersi, per il conseguimento di uno sviluppo sostenibile.

Dal punto di vista economico l'efficienza energetica rappresenta, per l'Europa, una delle maggiori risorse energetiche, nonché uno degli strumenti più efficaci per rafforzare le politiche sulla riduzione dei gas serra.

I vantaggi economici che ne derivano, qualora fosse raggiunto l'obiettivo di riduzione del 20% nel 2020, sia in Europa che nel contesto nazionale, sono quantificabili a circa 220 miliardi di euro l'anno, evidenziando in maniera concreta come il potenziale guadagno energetico ed economico rappresenti una grande risorsa per ogni stato membro.

La legislazione Europea su questo tema, definisce sia gli obblighi giuridici che un quadro generale sui principi e strumenti che ogni stato, in maniera autonoma, deve adottare.

Le direttive di riferimento sono la 2002/91/CE (ufficialmente abrogata dal 1/02/2012) e la 2010/31/UE, quest'ultima aggiornata dalla Direttiva (UE) 2018/844.

La prima direttiva 2002/91/CE detta EPBD (Energy Performance of Building Directive), non è stata immediatamente recepita e la sua attuazione è stata differente fra le diverse nazioni. In osservanza al protocollo di Kyoto, l'EPBD guida gli stati membri ad applicare un miglioramento energetico degli edifici tenendo conto delle specifiche e diversificate condizioni climatiche degli ambienti esterni in rapporto al comfort climatico interno.

Le disposizioni in essa contenute riguardano i seguenti aspetti:

- Definizione di una metodologia generale per il calcolo del rendimento energetico degli edifici;

- Rispetto dei requisiti minimi in materia di rendimento energetico negli edifici di nuova edificazione;
- Rispetto di requisiti minimi in materia di rendimento energetico negli edifici esistenti sottoposti a importanti ristrutturazioni;
- La certificazione energetica degli immobili;
- L'ispezione periodica dei generatori di calore, e degli impianti di condizionamento d'aria negli edifici.

L'Italia è stato uno dei primi paesi ad accogliere tale direttiva, attraverso il D.lgs. 19/08/2005 n.192 entrato ufficialmente in vigore l'8 Ottobre 2005 e aggiornato l'anno seguente con il D.lgs. 311/2006.

Con questi decreti è stato definito un quadro normativo attraverso il quale le Regioni possono applicare provvedimenti in relazione agli specifici contesti locali.

Nel 2009 viene pubblicato il D.P.R. n.59, con lo scopo di promuovere un'applicazione omogenea coordinata e immediatamente operativa delle prescrizioni per l'efficienza energetica sul territorio nazionale, definendo le metodologie di calcolo e i requisiti minimi per la prestazione energetica degli edifici, degli impianti termici per la climatizzazione invernale ed estiva e per la preparazione dell'acqua calda sanitaria. Esclusivamente al terziario, vengono definite anche le procedure di calcolo nazionali per l'illuminazione artificiale degli edifici.

Nello stesso anno vengono pubblicate le «Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici» con il D.M. 26/06/2009, entrato in vigore il 25/07/2009. Da questo momento la certificazione energetica è resa obbligatoria su tutto il territorio nazionale. Successivamente viene pubblicato il D.lgs. 28/2011, strumento attuativo della Direttiva 2009/28/CE, che, all'art.13, introduce l'obbligo di riportare su tutti gli annunci commerciali di vendita l'indice di prestazione energetica contenuto nell'APE, a partire dal 1 gennaio 2012. Dispone inoltre, che per gli atti di compravendita o locazione venga inserita una clausola in cui l'acquirente o il locatore dichiara di aver ricevuto le informazioni inerenti la certificazione energetica dell'immobile.

In ambito internazionale un ulteriore contributo normativo proviene dalla Direttiva del parlamento e del consiglio europeo 2010/31/UE. Al fine di ottenere riduzioni significative delle emissioni di CO₂, promuove il miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici all'interno della comunità europea, tenendo conto delle condizioni climatiche locali, delle esigenze di comfort termico interno, l'efficacia dei costi, nonché un quadro comune per il calcolo delle prestazioni energetiche.

Dispone l'obbligo per gli stati membri, affinché a partire dal 31 dicembre 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione siano "edifici a energia quasi zero", (NZEB – Nearly Zero Energy Building), ovvero costruzioni ad altissima efficienza, in cui il fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo, possa essere soddisfatto quasi integralmente dalla produzione rinnovabile. Per gli edifici pubblici il termine era stato fissato al 31 dicembre 2018.

Gli altri esistenti, oggetti di ristrutturazione, dovranno migliorare le loro prestazioni energetiche al fine di soddisfare i requisiti applicabili.

In Italia il D.L.n°63 del 4 giugno 2013 (decreto Eco-bonus/Energia), convertito nella legge n. 90 del 2013, oltre a recepire la direttiva europea del 2010, introduce una serie di novità aggiornando il testo del D.L. 192/2005.

La certificazione energetica cambia nome, da ACE (Attestato di Certificazione Energetica) ad APE (Attestato di Prestazione Energetica). Le metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici vengono definite dalle normative UNI/TS 11300 parti 1, 2, 3 e 4, CTI 14/2013 e UNI EN 15193 (Prestazione energetica degli edifici – Requisiti energetici per illuminazione).

Nel 2015 il quadro normativo di riferimento viene aggiornato con la pubblicazione di tre documenti interministeriali del 26 giugno 2015, riguardanti schemi e modalità per la compilazione della relazione tecnica di progetto, applicazione di metodologie di calcolo, definizione delle tipologie d'intervento e dei requisiti minimi, e per ultimo l'adeguamento delle linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici.

Le Tipologie d'intervento, secondo quanto definito dal decreto, sono previste come di seguito riportate:

² "Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici", Allegato 1 - Criteri generali e requisiti delle prestazioni energetiche degli edifici; cap. 1.3. Nuova costruzione, demolizione e ricostruzione, ampliamento e sopra elevazione

- Nuova costruzione, demolizione e ricostruzione, ampliamento e sopra elevazione

² Per edificio di nuova costruzione si intende l'edificio il cui titolo abilitativo sia stato richiesto dopo l'entrata in vigore del decreto.

Sono assimilati agli edifici di nuova costruzione:

- a. Gli edifici sottoposti a demolizione e ricostruzione, qualunque sia il titolo abilitativo necessario
- b. Gli edifici esistenti sottoposti ad ampliamento ovvero i nuovi volumi edilizi con destinazione d'uso di cui al DPR 412/93, sempre che la nuova porzione abbia un volume lordo climatizzato superiore al 15% di quello esistente o comunque superiore a 500 m³.

- Ristrutturazioni importanti

Si definisce ristrutturazione importante l'intervento che interessa gli elementi e i componenti integrati costituenti l'involucro edilizio che delimitano un volume a temperatura controllata dall'ambiente esterno o da ambienti non climatizzati, con un'incidenza superiore al 25% della superficie disperdente lorda complessiva dell'edificio.

Ai fini della determinazione di tale soglia di incidenza, sono da considerarsi unicamente gli elementi edilizi opachi e trasparenti che delimitano il volume a temperatura controllata dall'ambiente esterno e da ambienti non climatizzati quali le pareti verticali, i solai contro terra e su spazi aperti, i tetti e le coperture (solo quando delimitanti volumi climatizzati). Gli interventi di ristrutturazione importante vengono suddivisi in:

- a. Ristrutturazioni importanti di primo livello
- b. Ristrutturazioni importanti di secondo livello

"a) ristrutturazioni importanti di primo livello: l'intervento, oltre a interessare l'involucro edilizio con un'incidenza superiore al 50 per cento della superficie disperdente lorda complessiva dell'edificio, comprende anche la ristrutturazione dell'impianto termico per il servizio di climatizzazione invernale e/o estiva asservito all'intero edificio. In tali casi i requisiti di prestazione energetica si applicano all'intero edificio e si riferiscono alla sua prestazione energetica relativa al servizio o servizi interessati;

b) ristrutturazioni importanti di secondo livello: l'intervento interessa l'involucro edilizio con un'incidenza superiore al 25 per cento della superficie disperdente lorda complessiva dell'edificio e può interessare l'impianto termico per il servizio di climatizzazione invernale e/o estiva. In tali casi, i requisiti di prestazione energetica da verificare riguardano le

³ Dal D.M. 26/06/2015
"Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici", Allegato 1 - Criteri generali e requisiti delle prestazioni energetiche degli edifici; cap. 1.4.1 Riqualficazioni energetiche

⁴ Dal D.M. 26/06/2015
"Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici", Allegato 1 - Criteri generali e requisiti delle prestazioni energetiche degli edifici; cap. 1.4.2 Riqualficazioni energetiche

caratteristiche termo-fisiche delle sole porzioni e delle quote di elementi e componenti dell'involucro dell'edificio interessati dai lavori di riqualificazione energetica e il coefficiente globale di scambio termico per trasmissione ($H'T$) determinato per l'intera parete, comprensiva di tutti i componenti su cui si è intervenuti..."³.

- Riqualficazioni energetiche

⁴ Si definiscono interventi di riqualificazione energetica di un edificio quelli non riconducibili ai casi precedenti e che hanno, comunque, un impatto sulla prestazione energetica dell'edificio.

Tali interventi coinvolgono quindi una superficie inferiore o uguale al 25% della superficie disperdente lorda complessiva dell'edificio e/o consistono nella nuova installazione, nella ristrutturazione di un impianto termico asservito all'edificio o di altri interventi parziali, compresa la sostituzione del generatore.

In tali casi, i requisiti di prestazione energetica richiesti si applicano ai soli componenti edilizi e impianti oggetto di intervento, e si riferiscono alle loro relative caratteristiche tecno-fisiche o di efficienza.

Nel DM 26/06/2015, sui "Requisiti minimi", si definiscono i valori limite e gli obblighi di un edificio ad energia quasi zero:

- Rispetto dei valori limite dei seguenti parametri:
 1. Coefficiente medio globale di scambio termico per trasmissione per unità di superficie disperdente (H'_{τ})
 2. Area solare equivalente estiva per unità di superficie utile ($A_{sol,est}/A_{sup,utile}$)
 3. Indici di prestazione termica utile per riscaldamento e raffrescamento ($EP_{H,nd}$, $EP_{C,nd}$)
 4. Efficienza media stagionale degli impianti di climatizzazione invernale (η_H), di climatizzazione estiva (η_C) e di produzione di acqua calda sanitaria (η_W)
 5. Indice di prestazione energetica globale dell'edificio ($EP_{gl,tot}$)
- Obblighi di integrazione delle fonti rinnovabili secondo i principi minimi di cui all'All.3, p.1, l. c), del d.lgs. 28/2011.

Il 19 Giugno 2018 è stata pubblicata all'interno della Gazzetta ufficiale dell'Unione europea L 156/75 la direttiva UE 30 Maggio 2018/844 che modifica la Direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia (EPBD) e la Direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica.

La Direttiva punta ad accelerare l'ammodernamento degli edifici nell'Unione ovvero la riduzione delle emissioni di CO₂ di almeno il 40% entro il 2030, favorendo lo sviluppo di un sistema energetico sostenibile, sicuro e decarbonizzato entro il 2050. La direttiva UE 2018/844, impone agli stati membri di determinare e programmare strategie nazionali allo scopo di fornire una visione a lungo termine che favorisca l'efficientamento di edifici residenziali, terziari, sia pubblici che privati.

Nello specifico le principali novità introdotte sono:

- Miglioramento della prestazione energetica degli edifici sia di nuova costruzione che esistenti;
- Indicatore che misura la predisposizione all'intelligenza dell'edificio- Smart Readiness Indicator (SRI);

- Introduzione dello sportello unico per la ristrutturazione energetica, One-Stop-Shop
- Mobilità sostenibile, attraverso lo sviluppo di infrastrutture di ricarica di veicoli elettrici;
- Integrare i dati disponibili, attraverso gli Attestati di Prestazione Energetica depositati (APE), i registri degli impianti ispezionati e attraverso le nuove tecnologie informatiche di contabilizzazione dell'energia e sistemi domotici di controllo degli edifici.
- Sensibilizzare, anche attraverso la formazione, l'utente finale, all'utilizzo ponderato dell'energia, riducendone costi e consumi.

A conclusione del quadro normativo il nazionale e internazionale in materia riduzioni di emissioni di gas serra e politiche di efficientamento energetico degli edifici, l'8 Maggio , e 7 Giugno 2019, sulla Gazzetta ufficiale dell'Unione Europea e la commissione Europea sono state pubblicate due Raccomandazioni, rispettivamente sulla Ristrutturazione degli edifici (2019/786) e sull'ammodernamento degli edifici (2019/1119), entrambe applicative ed orientative della direttiva UE2018/844

La raccomandazione UE 2019/786 illustra dettagliatamente come leggere e applicare le nuove disposizioni nel contesto legislativo nazionale, fornendo specifiche rispetto l'applicazione dei requisiti tecnici relativi alle ristrutturazioni e alle diverse strategie per raggiungere gli obiettivi fissati dall'Europa.

L'obiettivo è che gli Stati adottino una Strategia di Ristrutturazione a Lungo Termine (SRLT) per sostenere la ristrutturazione di edifici del proprio parco nazionale, residenziali e non, sia pubblici che privati, accelerando il processo di trasformazione degli edifici esistenti in edifici a energia quasi zero.

Le SRLT dovrebbero agevolare la ristrutturazione efficiente, tenendo conto dei costi necessari per ottenere una riqualificazione energetica profonda, nello specifico:

- L'articolo 2 bis, paragrafo 1, lettera b) della direttiva Prestazione energetica nell'edilizia, dispone che ogni SRLT comprenda "l'individuazione di approcci alla ristrutturazione efficace in termini di costi, in base al tipo di edificio e alla zona climatica, tenendo conto, se possibile, delle potenziali soglie di intervento pertinenti nel ciclo di vita degli edifici".
- L'articolo 2 bis, paragrafo 1, lettera c), della direttiva Prestazione energetica nell'edilizia stabilisce che ogni strategia di ristrutturazione a lungo termine comprenda «politiche e azioni volte a stimolare ristrutturazioni degli edifici profonde ed efficaci in termini di costi, comprese le ristrutturazioni profonde ottenibili per fasi successive, e a sostenere misure e ristrutturazioni mirate ed efficaci in termini di costi, ad esempio attraverso l'introduzione di un sistema facoltativo di «passaporto» di ristrutturazione degli edifici».

Il passaporto per la ristrutturazione dell'edificio (Building Renovation Passport), è un nuovo strumento facoltativo utile a verificare l'efficacia economica e funzionale di una ristrutturazione energetica. Attraverso il BRP, dopo un opportuna diagnosi energetica, per ogni singolo edificio, viene definito un piano d'intervento utile ad ottenere un importante risparmio energetico nel lungo termine (15-20 anni) grazie a specifici interventi di ristrutturazione che tengono conto degli incentivi e della capacità d'investimento dell'utente.

il documento UE 2019/1019, sull'ammodernamento degli edifici, pubblicato il 7 giugno 2019, fornisce raccomandazioni relative ai "sistemi tecnici per l'edilizia" e alle loro ispezioni; infatti la valutazione e la documentazione delle prestazioni devono garantire che i sistemi tecnici per l'edilizia siano adeguatamente dimensionati, installati e messi in esercizio in modo che le prestazioni reali siano ottimali e rispondenti a quelle di progetto. La raccomandazione contiene requisiti per l'installazione di dispositivi autoregolanti in grado di controllare la temperatura interna negli edifici, migliorando la gestione e contenendo costi e consumi. Il documento inoltre, prescrive l'installazione di sistemi di automazione e controllo dell'edificio (BACS, Building Automation and Control Systems) nei grandi edifici non residenziali, da ristrutturare o di nuova costruzione, i cui impianti di riscaldamento, di ventilazione e di condizionamento dell'aria hanno potenze nominali elevate, assicurando benefici sia per gli utenti che per i proprietari.

Per ciò che riguarda le raccomandazioni relative alla mobilità elettrica, gli Stati membri sono invitati a garantirne la corretta attuazione nell'ambito della mobilità sostenibile, ampliando la rete di infrastrutture di ricarica. L'edilizia può promuovere la mobilità elettrica in modo efficace, con per esempio parcheggi situati all'interno di edifici privati o ad essi adiacenti.

Infine per quanto riguarda le raccomandazioni relative al calcolo dei fattori di energia primaria (articolo 6.3):

"(16) I fattori di energia primaria dovrebbero essere regolarmente riesaminati per verificare che rispecchino l'evoluzione del mix energetico nazionale e del mercato dell'energia nel corso del tempo, nonché delle metodologie di calcolo sottostanti. Cfr. le sezioni 4.2 e 4.3.2 del presente documento.

(17) Nel determinare le rispettive metodologie nazionali di calcolo, gli Stati membri dovrebbero sempre cercare di combinare al meglio misure di efficienza energetica e rinnovabili. Gli Stati membri dovrebbero sempre assicurare la prestazione energetica ottimale dell'involucro edilizio, provvedendo pertanto a che le soluzioni di energia rinnovabile si usino in combinazione con risparmi energetici ottimali derivanti dall'involucro edilizio e dai relativi sistemi tecnici per l'edilizia."

In questo contesto emergenziale è possibile notare bene, come negli ultimi anni la Comunità Europea, abbia necessariamente dovuto accelerare la spinta verso un repentino cambiamento di paradigmi, per contrastare una crescente dipendenza dai combustibili fossili, nonché l'aumento dei costi di energia.

Questa sfida rende vulnerabile la società Europea e le economie degli stati membri, per contrastare questa necessità l'unica strada percorribile è lo sviluppo di una energia/economia sostenibile. La Comunità Europea ha proposto pertanto una serie di provvedimenti legislativi, intensificati negli ultimi anni, che hanno lo scopo di trasformare questa emergenza in opportunità per la crescita economica e tecnologica del paese. Ci sono voluti diversi decenni per definire una politica energetica comune a causa dei differenti interessi degli stati membri, tuttavia le questioni legate al risparmio energetico e all'efficienza sono progressivamente diventate, negli anni, un tema sensibile, guadagnando importanza e spostando la politica energetica da una questione solamente nazionale ad un'esigenza internazionale.

2.3 Involucro come interfaccia per il miglioramento della qualità degli ambienti

L'evoluzione storica della facciata si è sempre basata soprattutto su concetti di stabilità e conservazione nel tempo, ma la forma e la funzione delle costruzioni odierne di pareti e facciate, sono il risultato di un lungo processo di sviluppo durato per secoli nella storia dell'architettura. Gli aspetti di vita connessi, erano sì tenuti nel giusto conto, ma certo oggi le esigenze di vivibilità sono profondamente cambiate e ulteriormente mutabili. Sin dai primi anni '50 del XX secolo, le tecnologie costruttive e le prosperità economiche del dopoguerra hanno permesso un'ampia diffusione di facciate continue in tutto il mondo.

Nell'ultimo secolo l'evoluzione tecnologica ha consentito al progettista l'accesso all'utilizzo di materiali sempre più innovativi con la messa in secondo piano della "pietra" quale componente massivo, a vantaggio di una smaterializzazione che ha permesso l'utilizzo di materiali quali cemento, ferro, vetro, svincolando la pietra e il mattone dal compito di sostenere l'edificio. I nuovi materiali hanno consentito di dare una nuova espressione all'edificio nell'estetica e nella linearità della forma, affidando al progettista una maggiore espressività, nell'assecondare i bisogni più esigenti, non solo abitativi, -ma anche estetici del fruitore.

Per decenni i progettisti hanno dato maggiore priorità alla composizione architettonica e agli aspetti formali, non considerando il ruolo chiave dell'involucro in termini di miglioramento delle prestazioni energetiche di un intero edificio. È, soltanto dopo la crisi petrolifera degli anni '70, con la conseguente emergenza energetica mondiale ed

i cambiamenti climatici in corso, che gli architetti scoprono l'importanza di progettare edifici ad alta efficienza e facciate ad alte prestazioni, L'andamento del macroclima terrestre - attuali mutamenti climatici - i fattori di vivibilità all'interno del microclima della casa sono in continua considerazione ed evoluzione dai soggetti interessati alla progettazione. Le attuali esigenze di vita sociale e di relazione, condizionano anch'essi gli sviluppi degli ambienti sia indoor che outdoor, con un occhio soprattutto ai consumi energetici degli ambienti interni ed esterni.

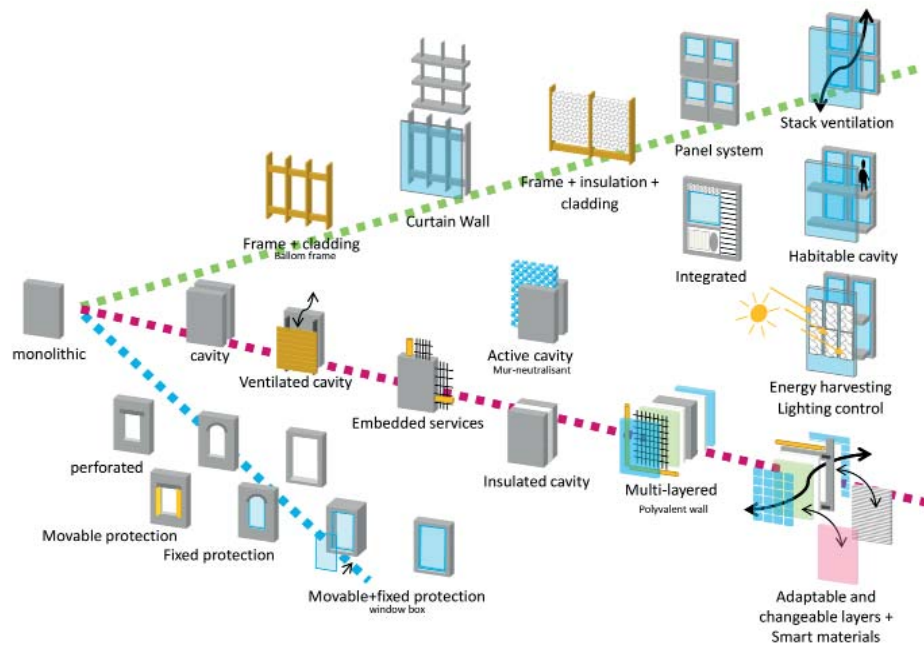


Figura 1. Immagine esemplificativa del processo evolutivo della chiusura esterna.

In questo processo di rinnovamento tecnologico, l'involucro si evolve definendo nuove relazioni indoor-outdoor, permettendo al progettista di porre l'attenzione sul ruolo determinante di questo, come mediatore eccellente nel migliorare le condizioni di comfort ambientale e ridurre i consumi energetici dell'edificio.

Dispersione di calore, apporti solari, infiltrazioni d'aria e carichi di illuminazione, sono meccanismi fondamentali che determinano l'incidenza di una facciata sul consumo complessivo di energia dell'edificio. Esistono numerose strategie e strumenti che i progettisti possono utilizzare per il miglioramento delle prestazioni delle facciate: un adeguato isolamento delle pareti ridurrà, infatti, le perdite di calore, schermature, sistemi di ombreggiamento e vetri ad alte prestazioni ottimizzeranno gli apporti solari, chiusure esterne ben progettate saranno utili per garantire la tenuta all'aria, una maggiore illuminazione diurna degli spazi interni ridurrà la necessità e la dipendenza dall'energia elettrica.

Queste proprietà dipendono fortemente dal clima, dalla funzione dell'edificio, dalla destinazione d'uso, dall'orientamento, dagli impianti tecnologici, nonché dalle tipologia stessa di facciata utilizzata.

A tal proposito esistono essenzialmente due tipi di facciate:

- Facciate opache, che sono principalmente costituite da strati di materiali solidi, come muratura, pietra, pannelli prefabbricati in calcestruzzo, rivestimenti metallici, isolamento e strutture in acciaio. Le facciate opache possono anche includere aperture e finestre.
- Facciate vetrate, come le facciate continue, che sono principalmente costituite da vetri trasparenti o traslucidi e supportate da strutture metalliche.

I comportamenti fisici di questi due tipi di facciata differiscono perché i loro componenti, materiali e metodi di costruzione sono diversi. Le facciate opache in genere hanno più massa, livelli di isolamento maggiori e una migliore capacità di trattenere il calore rispetto alle facciate vetrate. Al contrario, le facciate vetrate di solito consentono alla luce diurna di penetrare negli ambienti interni, offrono una vista migliore per gli occupanti e hanno un carico incidente sulla struttura dell'edificio inferiore rispetto alle facciate opache.

Nella progettazione di facciate ad alta efficienza energetica, l'orientamento di un edificio è un fattore considerevole poiché determina la sua esposizione alla luce solare, infatti un edificio, per limitare i carichi energetici, deve necessariamente adattarsi in maniera intelligente alle condizioni climatiche ed ambientali del luogo dove è costruito. Gli effetti passivi dell'orientamento solare contribuiscono al raggiungimento di risultati altamente significativi, per questa ragione l'orientamento delle facciate deve essere considerato al principio del processo progettuale.

Laddove possibile, è indispensabile sfruttare al meglio gli agenti fisici favorevoli (irraggiamento solare in inverno, ventilazione naturale in estate, etc.), realizzando edifici che massimizzano la captazione solare. Quando un edificio è progettato per sfruttare il suo orientamento, le condizioni di vita e di lavoro all'interno di esso saranno migliori e i consumi di energia significativamente ridotti.

Purtroppo però, soprattutto nel contesto urbano, dove il tessuto è già definito a prescindere da considerazioni energetiche, o quando si tratta di riqualificazione edilizia non sempre è possibile trovare l'esposizione migliore. In questi casi, in cui gli edifici non sono in grado di captare l'energia solare in modo ottimale, è comunque necessario attuare differenti strategie per ridurre il fabbisogno energetico.

Gli elementi che compongono l'involucro dell'edificio (finestre, facciate continue, lucernari, etc) sono componenti significativi, sia dal punto di vista estetico che prestazionale, consentono alla luce naturale di entrare nello spazio interno, ma allo stesso tempo permettono il trasferimento di calore tra l'ambiente l'esterno e l'interno.

Le aperture, infatti, influiscono sul consumo energetico complessivo di un edificio, nonché sul benessere, la salute, il comfort e la produttività dei suoi occupanti.

Quando il progettista sceglie i materiali, deve considerare molteplici aspetti, proprietà, caratteristiche tecniche ed estetiche. Ad esempio, una cattiva progettazione ed un altrettanto imprecisa installazione di una finestra può causare perdite d'aria, fenomeni di abbagliamento, rumore, condensa, dispersioni di calore, causando in definitiva disagio per gli occupanti dell'edificio e un dispendio di energia.

Gli infissi recentemente sviluppati sfruttano i nuovi progressi tecnologici nel campo dell'edilizia, per consentire facciate trasparenti, ma allo stesso tempo ad alta efficienza energetica. Possono essere isolati con due, tre o più strati di vetro e lo spazio tra un vetro e l'altro può essere riempito con gas inerti o isolanti in aerogel che riducono il valore di

trasmissione. Per limitare altresì il passaggio di calore solare, possono essere applicati al vetro rivestimenti basso emissivi, riflettenti o ceramici, oppure si possono utilizzare vetri colorati. In alcuni casi, all'interno del vetro laminato, sono presenti film intermedi che garantiscono ombreggiatura. Gli stessi telai vengono progettati per essere a taglio termico. Continuamente, nuovi tipi di vetro e telai vengono introdotti nel mercato per soddisfare una varietà di requisiti funzionali, di sicurezza ed estetici richiesti.

Un ulteriore importante elemento che caratterizza l'efficienza di una facciata è il rapporto finestra-parete (WWR, Window Wall Ratio), ovvero la proporzione della superficie vetrata rispetto alla facciata opaca. Questo rapporto contribuisce in modo significativo al guadagno di calore solare di una facciata e al consumo di energia. Nella maggior parte dei casi, i WWR più elevati comportano un maggiore consumo di energia, poiché la resistenza termica anche di una facciata vetrata ben isolata è in genere inferiore a quella di una facciata opaca.

La selezione dei materiali è, altresì un fattore importante nella progettazione di facciate sostenibili. Tutti i materiali hanno proprietà fisiche specifiche, quali densità, conducibilità termica, resistenza termica e permeabilità. I materiali isolanti, ad esempio, sono selezionati per la loro resistenza termica, mentre le barriere al vapore per la loro permeabilità.

Quando si sceglie un materiale va considerato anche l'impatto ambientale che da esso ne deriva. Sta diventando sempre più importante selezionare materiali che abbiano il minor impatto negativo sull'ambiente. L'approccio di valutazione del ciclo di vita può essere utilizzato per determinare gli impatti ambientali nella selezione dei materiali, dove vengono analizzati i contenuti, i metodi di produzione, i fabbisogni energetici e i rifiuti per identificarne il costo reale.

In ogni caso, il comportamento ambientale dell'involucro non si può scindere dal sistema edificio - impianto - Ambiente esterno e quindi di seguito ci limiteremo a descrivere sommariamente i quattro principali modelli energetici, introdotti da Reyner Bahnam¹, già alla fine degli anni '60, sottolineando lo specifico comportamento delle tipologie di involucro ad essi associate e associabili.

¹ Reyner Bahnam, *The Architecture of the Well-Tempered Environment*, Architectural Press, London, 1969 (tr. it di Giovanni Morabito, *Ambiente e tecnica nell'architettura moderna*, Laterza Roma Bari, 1995).



Figura 2. Schema del modello di involucro di tipo conservativo

Il primo modello è quello conservativo, inteso come una caverna, caratterizzato da un tipo di controllo ambientale che utilizza grandi masse murarie con grandi spessori, capaci

di assorbire ed immagazzinare calore. Poche e piccole aperture limitano le dispersioni, e attraverso l'effetto serra trattengono l'energia trasmessa dal sole, garantendo un accumulo di calore nei climi freddi in inverno e attenuando gli effetti del riscaldamento nei climi caldi. Il modello conservativo viene sostenuto in Italia con la normativa L.373/1976 e con la successiva L.10/1991, le quali indicavano come obiettivo strategico la conservazione del calore e dell'energia termica nel periodo invernale e negli spazi indoor raggiungibile attraverso valori di trasmittanza adeguati dell'involucro edilizio e il rapporto di forma S/V (superficie disperdente/volume lordo dell'edificio).



Figura 3. Schema del modello di involucro di tipo conservativo

Il secondo modello è quello selettivo caratterizzato da un tipo di controllo ambientale basato su alcuni principi generali analoghi a quelli sviluppati nel modello precedente ma con l'innovazione di utilizzare sistemi di schermatura, per la protezione delle pareti dell'edificio dai raggi solari, grandi pareti trasparenti per ottimizzare la ventilazione, l'illuminazione e il raffrescamento. Nasce come modello energetico, impiegato soprattutto nei climi tropicali caldi ed umidi, ma oggi viene utilizzato in contesti climatici diversi, poiché la tematica del comfort non riguarda esclusivamente il principio di conservazione dell'energia all'interno dell'edificio, ma prevede anche l'interazione dell'ambiente outdoor con lo spazio dell'abitare, filtrando in modo "selettivo" i flussi climatici esterni.



Figura 4. Schema del modello di involucro di tipo selettivo

Il terzo modello è quello rigenerativo, che affida ai sistemi impiantistici la risoluzione

di tutti i problemi riguardanti il controllo ambientale e quindi declassando l'involucro a semplice barriera, che limita l'interazione tra l'ambiente esterno quello interno. L'involucro caratteristico è quello trasparente, tipico dell'architettura americana nata dalle idee delle avanguardie architettoniche e cresciuta alla luce del movimento moderno. Il modello rigenerativo è definito da uno schema isotropo, ovvero applicabile a tutte le latitudini e a tutte le esposizioni, trascurando le condizioni climatiche ambientali. Attualmente non può essere considerato come accettabile, sia dal punto di vista funzionale che culturale, a meno che i sistemi rigenerativi non siano alimentati da energia proveniente da fonti rinnovabili.

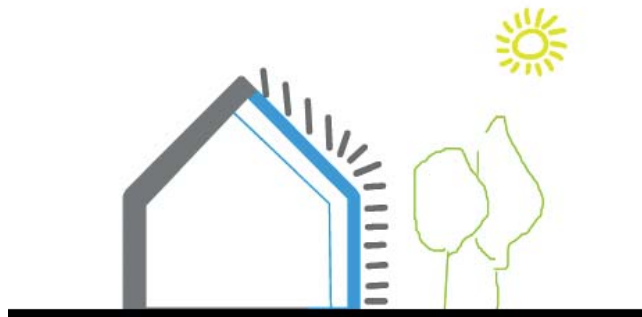


Figura 5. Schema del modello di involucro di tipo rigenerativo

² Giorgio Peguiron, *Prefazione, in Sergio Altomonte, L'involucro architettonico come interfaccia dinamica. Strumenti e criteri per un'architettura sostenibile, Alinea Editrice, Firenze, 2005, p. 9.*

Il quarto modello è quello ambientale, interattivo o bioclimatico avanzato, che propone un controllo basato sull'interazione tra edificio e ambiente esterno con la possibilità di gestire i complessi flussi di energia, (radiazione solare, calore, aria e suono), attraverso un involucro inteso come interfaccia dinamica, in continuo dialogo con i fattori climatici esterni, ed è in grado di avviare "in maniera programmata ed ottimale, ed in base a condizioni specifiche, quello scambio metabolico di materia ed energia necessario a rispondere alle variazioni degli stimoli ambientali e alle necessità degli occupanti."²

La caratteristica base dell'involucro è dunque la sua dinamicità, ovvero la capacità di cambiare assetto per regolare in modo efficiente il complesso dei flussi ambientali, attraverso soluzioni tecnologiche differenziate, regolate su scala giornaliera e stagionale, variabili, (intercapedini opache e trasparenti apertura e chiusura di finestre di bocchette di ventilazione sistemi di schermatura della radiazione ecc.), ma comunque appropriate al tipo di utenza e alla complessità dell'edificio.

In altre parole, il modello da perseguire per dare risposte certe alle richieste di efficienza e sostenibilità ambientale, si allontana dagli schemi energetici convenzionali e guarda verso modelli multifunzionali dotati di tecnologie adeguate ai contesti ambientali e culturali.

Sulla scia di questi modelli energetici, Mike Davies propone il "Polyvalent Wall", una visione per una nuova tipologia di involucro, pubblicato nel suo saggio 'A Wall for all Seasons' nel 1981. Davies ha immaginato un pannello di facciata composto da una serie di diversi strati funzionali. Il sistema era concepito per operare a livello molecolare

piuttosto che a livello meccanico, adattandosi alle condizioni climatiche e alimentandosi con energia auto-generata: uno strato di vetro permette di assorbire, riflettere e filtrare la radiazione solare. La "pelle esterna" protegge dagli agenti atmosferici e dal freddo, mentre un "micro-cervello" elabora le informazioni raccolte da un sensore sulle condizioni climatiche dell'ambiente esterno. Strati dotati di micropori regolano l'intensità del vapore e dell'aria da filtrare. Il sistema presentava anche un livello fotovoltaico per la produzione di energia. L'autore ha anche presentato un algoritmo per il funzionamento del sistema. Anche se tecnicamente non è stato possibile implementare questa idea, è diventata una sfida e un'ispirazione per molti architetti e designer moderni.

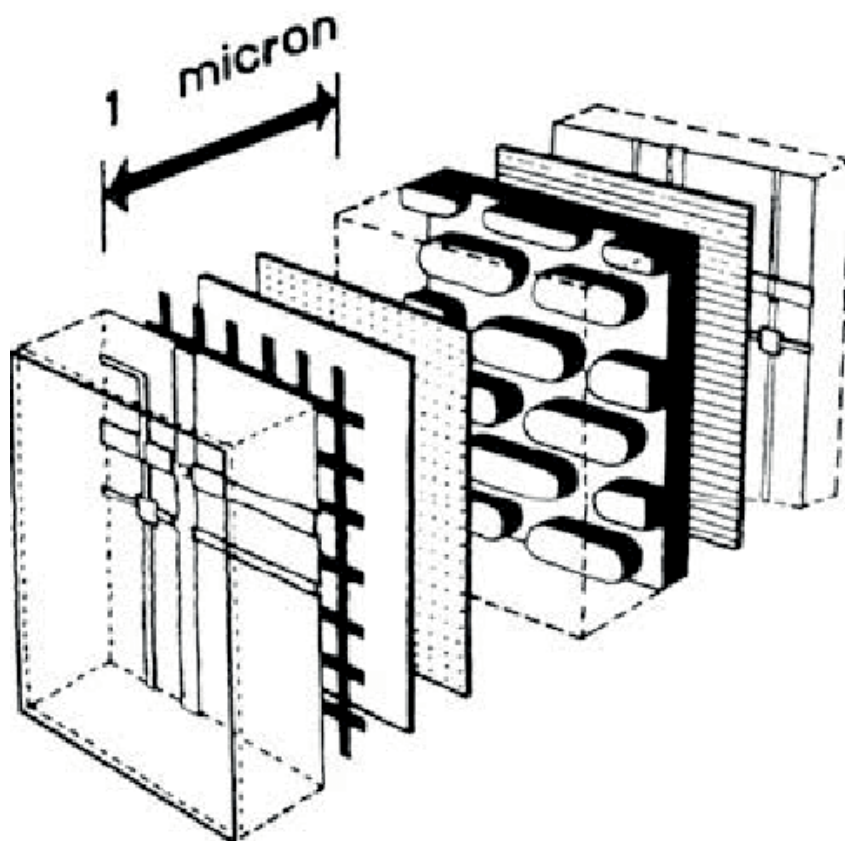


Figura 6. Concept del "Polyvalent Wall" progettato da Mike-Davies, 1981

La funzione della pelle in natura presenta molte analogie con la funzione degli involucri in architettura. Pelli, conchiglie, membrane e altri strati esterni, proteggono, confinano e avvolgono gli organismi viventi. L'architettura offre un ambiente interno per attività prevalentemente umane e le facciate segnano una differenza tra l'interno e l'esterno. L'analogia principale tra la pelle e gli involucri edilizi è proprio il compito di creare questa differenza: la protezione da incidenze meccaniche, radiazioni, sostanze indesiderate e altri organismi è uno degli aspetti funzionali che collegano la pelle e le facciate degli edifici, ma il confine tra interno ed esterno deve anche fornire meccanismi per lo scambio

di materia ed energia necessari per mantenere il metabolismo. La permeabilità di qualche tipo, all'aria all'acqua e al sole, è un prerequisito sia per la vita degli organismi viventi che per garantire un ambiente costruito con elevati standard di comfort ambientali.

L'involucro, come pelle, svolge un ruolo determinante inteso come sistema complesso di barriere e di filtri ambientali in grado, non solo di regolare i flussi di calore, radiazione, aria e vapore, ma anche di convertire la radiazione in energia termica ed elettrica utilizzabile per il metabolismo degli edifici.

Noi, oggi, operiamo all'interno di una vasta offerta merceologica nel campo della tecnologia dell'involucro, agendo all'interno di un mercato che spesso, offre soluzioni isolate e specifiche a risolvere il singolo problema e non propone prodotti strutturati come un sistema unico, costituito da "parti", che integrate tra loro, rispondono a quesiti multidisciplinari.

La tendenza comune è quella di utilizzare le tecniche che il mercato ci offre, senza un'adeguata informazione sui sistemi costruttivi, che ci permetta di governare le conoscenze tra le diverse prestazioni, in particolare, quelle ambientali.

Ci limitiamo ad assemblare, le diverse tecnologie che coinvolgono gli apparati, struttura, involucro, impianti; tuttavia le scelte sono spesso sperimentali e quasi mai guidate da un sistema tecnico diffuso che necessiterebbe di una profonda trasformazione nei processi formativi e professionali, integrando forma, tecnologia e prestazioni ambientali.

La crescente richiesta di sostenibilità negli ambienti costruiti ci conduce alla necessità di impiegare una facciata di tipo adattivo. La facciata non è più un semplice elemento statico che forma una barriera tra gli ambienti interni ed esterni offrendo solo un riparo per gli utenti. La futura pelle dell'edificio deve rispondere in modo dinamico ed essere in grado di reagire a condizioni climatiche variabili ed in continua evoluzione, possedere requisiti di efficienza energetica al fine di garantire il comfort degli occupanti. Come la pelle del corpo umano, l'involucro dovrebbe essere in grado di adattarsi perfettamente alle condizioni ambientali in modo dinamico, garantendo un'efficienza continua ed una gestione automatica dei flussi di energia in relazione con il clima e con il comportamento dell'utente.

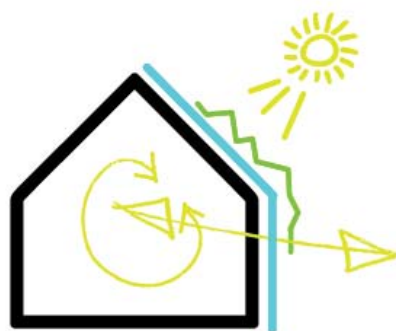


Figura 7. Schema del modello di involucro di adattivo

A tal proposito, i progettisti e addetti del settore, hanno fatto un passo importante verso soluzioni capaci di reagire in modo situazionale, sviluppando sistemi adattivi per facciate. L'etimologia della parola adattiva deriva dal latino *adaptare*, formato da *ad-* e *aptare*

ovvero "adattare". In parole povere, adattare significa "regolare verso".

Nel corso degli anni alcuni ricercatori hanno cercato di spiegare il significato del termine "facciate adattive".

³ *Living Skins: A New Concept of Self Active Building Envelope Regulating Systems*, Dewidar, Khaled, Conferenza di SB 13 Dubahi, a Dubahi. United Arab emirates, 2013

Khaled Dewidar³ nel 2013 definisce la facciata adattiva come un sistema capace di auto-adattarsi in relazione alle variazioni ambientali. Un sistema adattivo, come nel caso di involucri edilizi ha la capacità di modificare le proprie caratteristiche, il suo comportamento o la propria configurazione adattandosi all'ambiente esterno.

Sempre nel 2013, per Loonen⁴, una facciata adattabile al clima ha la capacità di modificare ripetutamente e in modo reversibile alcune delle sue funzioni, caratteristiche o comportamenti nel tempo in risposta al cambiamento dei requisiti di prestazione e delle condizioni al contorno variabili, e lo fa con l'obiettivo di migliorare le prestazioni complessive dell'edificio.

⁴Loonen, R. C. G. M., Trcka, M., Cóstola, D. & Hensen, J. L. M. *Climate adaptive building shells: state-of-the-art and future challenges*. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 25, 483–493, (2013).

Aelenei⁵, ritiene che la facciata di tipo adattiva debba avere la capacità di rispondere o beneficiare delle condizioni climatiche esterne per rispondere in modo efficiente ai più importanti ed efficaci requisiti di comfort e benessere degli occupanti.

Da queste definizioni, diventa chiaro che l'adattabilità garantisce flessibilità sistematica che consente il miglioramento delle prestazioni degli edifici attraverso specifici cambiamenti di "stimolazione".

In altre parole, i sistemi adattativi sono essenzialmente auto-ottimizzanti, ovvero consentono a una facciata di compensare le variazioni climatiche e il cambiamento delle esigenze degli occupanti a seconda delle condizioni transitorie rilevate. In uno scenario adattivo, l'ottimizzazione avviene a livello situazionale piuttosto che a livello globale.

Il sistema ha la capacità di adattarsi continuamente offrendo prestazioni ottimali in relazione a punti specifici che variano nel corso del tempo, piuttosto che a punti statici predeterminati. L'adattamento garantisce una versatilità in grado di tenere conto della variabilità stagionale, dei cambiamenti meteorologici giornalieri o persino delle alterazioni climatiche future. In ogni momento, indipendentemente dalle condizioni della sua idea iniziale, un edificio può essere ottimizzato per le condizioni ambientali circostanti.

⁵Aelenei, L., Brzezicki, M., Knaack U., Luible, A., Perino, M., & Wellershoff, F. (2015). *COST Action TU1403 - Adaptive Facades Network*. In: Aelenei, L., Brzezicki, M., Knaack U., Luible, A., Perino, M., & Wellershoff, F., *Adaptive façade network — Europe*. Delft: TU Delft Open.

“La passione è presente in tutte le grandi ricerche ed è necessaria per tutti gli sforzi creativi”

William Eugene Smith

3 L'approccio metodologico come contributo di innovazione tecnologica dell'involucro metallico

- 3.1 L'approccio prestazionale: i metodi d'indagine**
- 3.2 L'approccio tecnologico funzionale: classificazione dei sistemi di facciata**
- 3.3 Materiali per un involucro adattivo**
- 3.4 Casi studio: esempi di involucri realizzati, progetti, prodotti e prodotti di ricerca**

3.1 L'approccio prestazionale: i metodi d'indagine

Come già scritto nei capitoli precedenti, l'involucro rappresenta un elemento di separazione tra l'ambiente interno dell'edificio e lo spazio esterno.

Esso è costituito da una serie di elementi di interconnessione il cui compito è quello di controllare, filtrare e proteggere l'edificio dagli stimoli esterni, al fine di ottenere il comfort climatico interno desiderato. L'involucro deve soddisfare molti requisiti, ma per questo studio ci limitiamo a trattare quelli ritenuti più importanti:

- Controllo dei flussi di aria,
- Controllo del flusso di calore,
- Controllo della luce solare e di altre forme di radiazione,
- Illuminazione naturale
- Controllo della diffusione del vapore acqueo,
- Protezione dagli agenti atmosferici (pioggia e neve)
- Controllo acustico,
- Controllo e resistenza al fuoco.

Controllo dei flussi di aria

Le correnti di aria facilitano il trasporto di vapore acqueo, aria condizionata, riscaldata e raffreddata, agenti inquinanti e onde sonore.

Tuttavia, la circolazione di aria attraverso un muro può avere anche effetti positivi. Il controllo del flusso di aria di un edificio, deve essere considerato tenendo conto di due aspetti, apparentemente simili, ma in realtà completamente distinti: ventilazione e infiltrazione dell'aria.

La ventilazione avviene attraverso aperture, finestre e prese di aria, e ha lo scopo di fornire ricambi per mantenere gli ambienti salubri o di garantire una ventilazione per il raffrescamento degli spazi interni. La quantità di ventilazione può essere completamente gestita manualmente dagli occupanti o tramite un sistema di gestione automatica.

L'infiltrazione dell'aria invece avviene attraverso giunti, fessurazioni e dettagli inadeguati della facciata. Non può essere controllata e la quantità di scambi d'aria è determinata dalla differenza di pressione tra ambienti interni ed esterni.

Un edificio dotato di involucro ad alta efficienza, necessita, nella maggior parte dei casi, di elevati livelli di isolamento termico, che riducono le dispersioni di calore, ma che allo stesso tempo possono generare problemi di condensa, eliminabili soltanto attraverso un'adeguata ventilazione. La circolazione di aria è essenziale per l'uomo e per gli ambienti in cui viviamo, ed è per questo motivo che diventa fondamentale garantire adeguate condizioni termo-igrometriche, ricambi di aria e trattamenti di filtraggio della stessa, tali da garantire salubrità e livelli di benessere accettabili per gli occupanti.

A questo proposito, possiamo definire tre ragioni per cui il controllo del flusso di aria è importante per le prestazioni energetiche dell'edificio:

- Controllo dell'umidità: il vapore acqueo nell'aria può essere trasportato attraverso l'involucro e generare fenomeni di condensa causando seri problemi di salute e prestazionali.
- Risparmio energetico: le perdite di aria di un edificio deve essere compensate, con altrettanta aria proveniente dall'esterno che richiede energia per condizionarla, circa il 30/50% del consumo di energia per la climatizzazione degli ambienti in edifici ben isolati è dovuta alla perdita di aria attraverso l'involucro dell'edificio. La circolazione convettiva e l'azione del vento, causate da queste perdite, riducono entrambi l'efficacia dell'isolamento termico, aumentando lo scambio termico tra interno e esterno, attraverso l'involucro;
- Comfort e salubrità, le correnti d'aria fredda e l'aria eccessivamente secca durante l'inverno che derivano da una scarsa tenuta all'aria dell'involucro influiscono direttamente sul comfort umano. Il passaggio di vapore acqueo genera fenomeni di condensa e relative efflorescenze batteriologiche, che influiscono sulla qualità dell'aria interna.

Perché ci sia un flusso di aria, devono verificarsi entrambe le seguenti condizioni: una differenza di pressione tra due punti e un percorso continuo e aperto che colleghi i due punti, sebbene i prerequisiti siano ovvi e semplici da affermare, nella progettazione e nell'installazione, non è sempre chiaro quali siano le differenze di pressione o come valutare l'esistenza e la natura dei percorsi di flusso.

L'involucro deve impedire il flusso d'aria indesiderato tra l'ambiente interno e quello esterno. Il requisito di tenuta all'aria e di conseguenza il controllo delle perdite di aria deve essere garantito attraverso una buona progettazione, ma soprattutto attraverso una perfetta installazione dei componenti di facciata. Le piccole perdite d'aria, infatti, causano dispersioni termiche, infiltrazione di acqua piovana e problematiche acustiche.

In generale, l'approccio adottato per controllare le perdite di aria è quello di tentare di sigillare tutte le aperture dell'involucro. Sigillanti, guarnizioni, membrane antivento di diverso tipo, vengono utilizzati per prevenire le perdite d'aria.

Esistono tre meccanismi principali che generano differenze di pressione tali da innescare moti di aria all'interno e attraverso gli edifici:

- Vento: l'azione del vento che agisce sugli edifici innesca una pressione positiva sulla superficie sopravento e pressioni negative, di aspirazione, sulle pareti interne;

¹La norma si applica alla progettazione e alla realizzazione dei sistemi di ventilazione e climatizzazione per gli edifici non residenziali caratterizzati dall'occupazione umana, ad esclusione delle applicazioni in processi industriali.

- Effetto camino: la differenza di pressione dell'aria, legata a differenti densità, variabili a seconda della temperatura della stessa, innesca il fenomeno per cui l'aria calda, che risulta meno densa rispetto a quella fredda, tende a risalire generando una depressione a valle e richiamando aria fredda più densa (moti convettivi).
- Sistemi meccanici di controllo e trattamento aria: i sistemi di riscaldamento, ventilazione, condizionamento dell'aria e sistemi di aspirazione potrebbero generare perdite di aria tali da produrre differenze di pressione, attraverso l'involucro. Esistono due tipi di perdite, quella verso l'esterno e quella verso l'interno. Se da un edificio viene espulsa più aria di quella fornita, si genera una pressione negativa, e viceversa. Di questi aspetti si occupa la UNI 10339, in vigore ormai dal 1995 e aggiornata a seguito, della "Direttiva sull'etichettatura Energetica degli Edifici" con la nuova norma europea UNI EN 13779¹

Controllo del flusso di calore

Il calore migra da elementi che hanno una temperatura più alta a quelli con una inferiore, fino a raggiungere l'equilibrio tra gli elementi. Il trasferimento di calore avviene secondo tre meccanismi fisici: conduzione, convezione e irraggiamento. Senza entrare nel merito di questo argomento, ciò che è importante sottolineare è che, quando le temperature dell'aria esterna e interna sono diverse, avviene un trasferimento di calore tra l'edificio e l'ambiente esterno, attraverso l'involucro.

In termini di prestazione energetica dell'edificio, parliamo di perdite di calore quando la temperatura dell'aria esterna è inferiore a quella interna e di guadagni di calore nella condizione inversa.

La quantità di trasferimento di calore dipende dalle caratteristiche dell'involucro dell'edificio, dalla sua capacità di isolare gli spazi. Questa caratteristica dell'involucro è riassunta in un parametro chiamato trasmittanza termica, o valore U: minore è la trasmittanza termica, minore è la quantità di calore che fluisce tra ambienti interni ed esterni. Il valore U è definito principalmente dalla quantità di isolamento all'interno degli elementi opachi della facciata, dal tipo di finestre / elementi visivi, dalla loro quantità, dal modo in cui i diversi elementi si interfacciano e dalla presenza di ponti termici.

I ponti termici sono dovuti a una discontinuità dell'involucro tale che il flusso di calore tra interno ed esterno sia differente. Si possono avere discontinuità costruttive quando si utilizzano materiali eterogenei o discontinuità di tipo geometrico legate alla conformazione architettonica dell'edificio. Una progettazione adeguata può limitare l'impatto dei ponti termici riducendo la loro presenza e controllando le discontinuità termiche

Ovviamente la trasmissione termica influenza l'efficienza energetica complessiva degli edifici in diversi modi, a seconda della destinazione d'uso, della ubicazione e del suo orientamento. Se le pareti sono ben isolate (il che significa che la trasmittanza termica è bassa), la loro temperatura superficiale sarà molto simile alla temperatura interna dell'aria: questo è importante per fornire buoni livelli di comfort agli occupanti e limitare il rischio di condensa o proliferazione della muffa. Nelle zone dell'involucro, in corrispondenza di ponti termici, serramenti e zone non adeguatamente isolate, il vapore acqueo presente nell'aria, a contatto con le pareti che si trovano ad una temperatura di rugiada², condensa, favorendo la formazione di muffe.

² E' a temperatura di saturazione, ovvero la temperatura limite al di sotto della quale una certa massa di aria umida se raffreddata da luogo a condensazione.

Le trasmittanze termiche ridotte, possono essere ottenute avendo facciate costituite principalmente da pareti opache e ben isolate. Da questo punto di vista, aiuta a mantenere le pareti e gli strati isolanti il più continui possibile: qualsiasi interruzione nello strato isolante rappresenta un ponte termico. Ciò significa che avere elementi strutturali esposti all'esterno dell'edificio può essere estremamente dannoso per le prestazioni termiche della facciata. La quantità di finestre dovrebbe essere ben ponderata, ed è fondamentale avere serramenti a doppio o triplo vetro, con rivestimenti basso emissivi e gas isolanti nell'intercapedine tra i vetri.

È anche importante evitare finestre in cui il rapporto tra l'area del telaio e l'area del vetro è elevato: i telai rappresentano ponti termici e attraverso essi si verificano perdite di calore significative.

Uno dei ruoli dell'involucro è la regolazione del flusso di calore proveniente dalla

radiazione solare; le superfici interne dell'edificio, non dovrebbero mai raggiungere uno stato di stress radiante. Una superficie interna surriscaldata o la luce solare diretta in estate, possono causare aumenti di temperatura in prossimità dell'involucro e discomfort localizzati, nonostante l'utilizzo di impianti di climatizzazione, questo tipo di problema può essere risolto utilizzando dispositivi di protezione solare esterna, adeguato isolamento termico e vetri ad alta prestazione.

Controllo della luce solare e di altre forme di radiazione

Tendenzialmente possiamo affermare che più basso è il valore di trasmittanza, maggiore sarà l'efficienza energetica dell'edificio, ma a volte le condizioni climatiche esterne non sono sempre negative per gli edifici. Esistono molte situazioni in cui l'ambiente interno può beneficiare di scambi con l'esterno.

Quando la radiazione solare colpisce gli elementi vetrati di un involucro, parte della sua energia entra nell'edificio, provocando un aumento della temperatura dell'aria interna.

Gli apporti solari possono essere utili in alcune circostanze, possono ad esempio ridurre il consumo di energia per il riscaldamento. Esistono anche situazioni, in climi molto caldi, o in edifici densamente occupati, in cui è fondamentale limitare il più è possibile gli apporti solari, evitando condizioni di comfort intollerabili e un'eccessiva domanda di energia per il raffrescamento degli ambienti.

D'altra parte, la chiusura di un edificio dovrebbe controllare il passaggio della luce del sole; la luce solare è utile per l'illuminazione, ma potrebbe generare sgradevoli fenomeni di abbagliamento all'interno di un edificio, inoltre i raggi ultravioletti risultano dannosi sia per l'uomo che per i materiali interni che tendono a sbiadirsi e deteriorarsi. Le aperture finestrate dovrebbero essere posizionate e proporzionate tenendo conto di queste considerazioni.

Come intuibile, gli apporti solari si verificano solo attraverso elementi vetrati, ma non tutti i vetri hanno le stesse caratteristiche e la quantità di guadagni solari cambia significativamente per prodotti diversi. Il modo in cui gli elementi vetrati si comportano in termini di controllo solare è espresso mediante il parametro chiamato fattore solare o valore "g" ovvero il rapporto tra il numero di guadagno solare e l'intensità della radiazione del sole che colpisce il vetro.

Il valore g può essere ridotto aggiungendo rivestimenti a controllo solare, ottenendo valori molto bassi, ma in generale, i rivestimenti che riducono molto il valore g tendono ad essere molto scuri e a rendere riflettenti gli elementi vetrati. Quando le facciate degli edifici sono molto vetrate, è importante mantenere il fattore solare piuttosto basso.

Un altro modo per tenere sotto controllo il numero di guadagni solari all'interno di un edificio è introdurre dispositivi di schermatura, che sono efficaci se installati all'esterno dell'edificio. Sono generalmente fissi, ma ci sono anche alcuni esempi di opzioni mobili. È più facile ombreggiare efficacemente le facciate esposte a sud (o nord per le regioni subequatoriali) rispetto a quelle est o ovest, perché nel primo caso la radiazione solare è intensa quando il sole è alto nel cielo e i dispositivi orizzontali possono fornire una buona ombreggiatura. Gli elementi mobili sono potenzialmente i più efficaci perché possono tracciare la posizione del sole, ma sono ovviamente molto costosi e richiedono più manutenzione. Un modo possibile per utilizzare le schermature mobili, riducendo i costi di manutenzione, è proteggerli attraverso una facciata a doppia pelle.

È interessante considerare non solo la quantità di apporti solari, ma anche il modo in cui gli edifici reagiscono ad essi, poiché diverse tipologie costruttive si comportano in modo differente. Le facciate che possiedono un'elevata inerzia termica, possono accumulare il calore dei guadagni solari e restituirlo a distanza di tempo in modo lento e regolare. Ciò offre l'opportunità di sviluppare strategie intelligenti, in grado di fornire ottimi livelli di comfort, riducendo la richiesta di energia necessaria. Una buona massa termica può essere ottenuta attraverso l'utilizzo di materiali con un'elevata capacità termica, ma è importante che questi siano esposti verso l'ambiente interno: le finiture interne non possono essere utilizzate come elementi di accumulo e l'isolamento, per essere maggiormente efficace, deve essere posto sul lato esterno delle facciate. Esistono prodotti innovativi come i materiali a cambiamento di fase, che utilizzati negli involucri leggeri,

garantiscono comunque una massa termica adeguata.

Nei sistemi di facciata continua, una problematica da non sottovalutare, è la deformazione dei rivestimenti opachi, degli elementi vetrati, e delle sottostrutture, dovuta alle dilatazioni termiche. La radiazione solare e le differenze di temperatura giornaliere e stagionali possono causare questo effetto.

In fase di progettazione, la scelta di un corretto giunto di dilatazione è fondamentale per evitare problemi spesso complessi (fessurazioni, deformazioni, distacchi... etc) e garantire il funzionamento e una buona durabilità del sistema di facciata. Alcuni degli elementi da considerare in fase di progettazione per la scelta del giunto da selezionare sono:

- altezza e larghezza del giunto,
- tipologia di materiali impiegati,
- necessità di tenuta all'acqua
- carichi specificati dalla normativa vigente o secondo specifiche richieste progettuali,
- capacità di assorbire ai cedimenti differenziali (sisma, vento).

La dilatazione termica di una qualsiasi struttura, si calcola in funzione della differenza di temperatura espressa in °C, della lunghezza della struttura e del coefficiente α ($\alpha=0,000012$), mediante la formula:

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta T$$

Illuminazione naturale

Avere buoni livelli di illuminazione diurna è uno degli obiettivi principali per una corretta progettazione della facciata.

Le persone si sentono molto più a loro agio in spazi illuminati naturalmente che in edifici che utilizzano prevalentemente luci artificiali, queste inoltre, contribuiscono in modo significativo al consumo complessivo di energia degli edifici e generano calore, aumentando anche la domanda di energia per il raffreddamento.

Un efficace livello di illuminazione diurna non è soltanto una questione di quantità di luce naturale, ma anche di qualità, ovvero il modo in cui viene intercettata, è estremamente importante. Livelli di luce troppo elevati generano abbagliamento e un senso generale di disagio per gli occupanti.

Certamente, destinazioni d'uso differenti richiedono tipi di illuminazione completamente diversi: per i musei è importante evitare che la luce solare raggiunga direttamente le opere d'arte, per gli spazi degli uffici non è possibile accettare l'abbagliamento, poiché impedisce alle persone di lavorare in modo efficiente.

Le caratteristiche degli elementi vetrati possono essere estremamente diverse, a seconda dei prodotti. Il parametro che descrive il grado di trasparenza delle unità vetrate è la trasmissione della luce (LT) che esprime la percentuale di flusso luminoso che attraversa il vetro. Quando vengono applicati rivestimenti a controllo solare (per limitare il valore g , come già detto in precedenza), la trasmissione della luce viene influenzata, anche se non quanto il fattore solare. Questo, perché i rivestimenti a controllo solare sono selettivi ovvero, sono molto più trasparenti alle lunghezze d'onda solari che forniscono luce rispetto alle lunghezze d'onda che trasportano calore. In questo modo è possibile ottenere valori di "trasmissione" della luce molto più alti dei valori g .

La trasmissione della luce, non è l'unico parametro che dobbiamo considerare: è necessario infatti evitare involucri che alterino la qualità della luce. Un modo per controllare questo aspetto è considerare l'indice di resa cromatica (CRI) degli elementi vetrati. Questo parametro esprime quanto il colore degli oggetti sia influenzato dalla luce che penetra attraverso un elemento vetrato. Un CRI di 100 indica che i colori sono perfettamente naturali, quindi dovremmo puntare a prodotti con un CRI il più vicino possibile a 100.

Oltre alle proprietà di diversi prodotti, il design della facciata deve concentrarsi anche sulla posizione e sull'orientamento degli elementi finestrati: la stessa finestra posizionata in zone diverse può portare a qualità completamente diverse di illuminazione diurna.

Controllo della diffusione del vapore

La trasmissione del vapore acqueo è un problema difficile da risolvere; essa può cambiare la propria direzione, al variare delle condizioni climatiche stagionali e all'utilizzo

occupazionale degli ambienti.

La diffusione del vapore è il movimento di vapore acqueo attraverso materiali porosi come legno, materiale isolante, laterizio, cemento... etc) causato dai differenziali di pressione di vapore; ciò dipende anche dalla temperatura dell'aria e dalla concentrazione del vapore acqueo nell'aria.

I materiali da costruzione impermeabili all'acqua sono tutt'altro che ermetici al vapore acqueo. Una molecola d'acqua è grande 1/100.000mm, mentre una molecola di vapore è soltanto 1/10.000.000mm. Ciò significa che attraverso i pori nei quali non può passare una molecola di acqua può pur sempre passare una molecola di vapore acqueo. Il flusso di vapore si diffonde attraverso gli strati dell'involucro, passando dal lato di alta pressione, più caldo, verso il lato con pressione inferiore, più freddo, in considerazione del fatto che l'aria calda può contenere più acqua rispetto all'aria fredda.

Questo significa che, nei climi rigidi, il vapore acqueo migra principalmente dall'interno riscaldato verso l'ambiente esterno più freddo, mentre nei climi caldi, il fenomeno della trasmissione di calore è invertito e si dirige principalmente dall'esterno caldo e umido, verso l'interno climatizzato. La direzione del flusso di vapore si può invertire anche quando la radiazione solare riscalda involucri composti da rivestimenti murali assorbenti, (muratura), spingendo il vapore acqueo verso l'interno.

Comprendere la direzione del flusso di vapore è fondamentale nel sistema involucro per evitarne fenomeni di deterioramento. Non è il processo di diffusione del calore a creare inconvenienti, ma la sua condensazione che si verifica se esso incontra differenti materiali a determinate temperature.

La formazione di condensa si ha sempre quando un volume d'aria subisce un abbassamento della temperatura. In questo caso, l'Umidità Relativa aumenta (saturazione in %) fino a quando non raggiunge il 100%; a questo punto l'umidità che non può più essere assorbita in forma di vapore, viene eliminata sotto forma di acqua.

La temperatura a cui l'aria raggiunge la saturazione e l'umidità inizia a condensare si chiama "Punto di Rugiada"².

La parete esterna dell'edificio deve essere progettata in modo da evitare la formazione di condensa all'interno della stessa o, dove ciò non è possibile, occorre verificare che la quantità di vapor acqueo condensato durante l'inverno sia contenuto entro limiti tali da non compromettere la resistenza termica minima prevista per la parete e che, in ogni caso, possa evaporare interamente durante la stagione estiva.

I processi di degrado termo-igrometrico di un involucro sono principalmente legati a:

- condensazione superficiale del vapore acqueo sul lato interno dell'involucro edilizio;
- condensazione interstiziale del vapore acqueo all'interno delle strutture dell'involucro edilizio

La condensazione del vapore sulle superfici interne di un ambiente confinato è un fenomeno strettamente legato alla temperatura della superficie interna della parete in esame; infatti il fenomeno avviene quando la temperatura di parete eguaglia la temperatura di rugiada dell'aria umida presente nell'ambiente interno (corrispondente ad una umidità relativa del 100%).

Ciò significa che un ruolo importante è rivestito dalle condizioni termoigrometriche dell'ambiente interno, in particolare della temperatura ed umidità relativa dell'aria.

Il fenomeno della condensazione superficiale all'interno di ambienti confinati interessa principalmente quelle superfici che raggiungono più facilmente temperature relativamente basse, a causa della loro elevata trasmittanza.

È il caso delle coperture non ben coibentate, ma anche di vetri, di infissi metallici e ponti termici di vario tipo.

I ponti termici, infatti, in qualità di punti critici dell'involucro edilizio, sono soggetti a maggiore rischio di condensa poiché sono caratterizzati da una minore resistenza termica rispetto alle zone circostanti.

In fase progettuale, per evitare fenomeni di condensa superficiale, è necessario definire correttamente lo spessore dello strato isolante della parete, in quanto, uno scarso isolamento può comportare basse temperature superficiali interne ($T_{s,i}$).

Maggiore è la resistenza termica della parete, più alta sarà $T_{s,i}$. Non si verifica condensa

superficiale, se la temperatura della superficie interna della parete è superiore alla temperatura di rugiada del vapore, (T_R), presente nell'aria dell'ambiente interno, ossia:

$$T_{s,i} > T_R$$

La condensa interstiziale, invece, è un fenomeno che interessa gli strati interni della parete. È noto, che il vapore acqueo presente nell'aria tende a diffondersi attraverso la parete nel verso delle pressioni decrescenti, quindi da un ambiente a pressione maggiore (temperatura maggiore) verso uno a pressione minore (temperatura minore).

Per questo motivo, durante l'inverno, in occasione di un marcato differenziale di temperatura tra aria interna ed esterna, il vapore acqueo presente nell'ambiente interno, migra attraverso i pori dei vari strati costruttivi della parete, verso l'ambiente esterno.

All'interno della parete, temperatura e pressione parziale del vapore contenuto nell'aria, gradualmente decrescono dall'interno verso l'esterno. Quando all'interno della parete, la pressione parziale del vapore contenuto nell'aria con umidità relativa del 100%, (pressione di saturazione), assume un valore pari a quello della pressione parziale del vapore, si forma condensa sulle superfici verticali isoterme corrispondenti e nella fascia di parete tra esse comprese.

Per evitare la formazione di condensazione interstiziale è necessario, quindi, che la pressione di vapore rimanga sempre al di sotto della pressione di vapore alla saturazione. A tal fine, risulta evidente come, per evitare questo fenomeno, sia necessario scegliere adeguatamente i materiali in funzione della loro resistenza al passaggio di vapore.

La proprietà dei materiali di resistere al passaggio di vapore acqueo, viene espressa dal fattore di resistenza al vapore acqueo " μ ", ovvero, un parametro che indica in quale misura la resistenza alla diffusione di vapore è maggiore rispetto a quella dell'aria, in uno strato dello stesso spessore.

Ad esempio, uno strato di materiale dello spessore di 1 cm con un valore μ di 100, contrappone una resistenza alla diffusione di vapore acqueo tale e quale a quella di uno strato di aria di 100 cm.

Dunque, per controllare la migrazione di vapore, ed evitare la formazione di condensa interstiziale all'interno del pacchetto coibente, è auspicabile l'utilizzo di materiali "Freni al vapore", applicati, generalmente, all'intradosso del materiale isolante. Questo permette di mantenere l'isolamento termico asciutto, garantendo la massima efficienza delle sue prestazioni nel tempo. Valori μ compresi tra 10.000 e 100.000

In caso di ambienti con elevata concentrazione di vapore acqueo, (piscine, lavanderie... etc), o nelle stratigrafie dove non sono previste intercapedini ventilate, risulta più opportuno utilizzare "Barriere al Vapore" che impediscono, totalmente, il passaggio di vapore acqueo. Valore $\mu = \infty$

Negli involucri ad alte prestazioni termoigrometriche, bisogna tener conto anche del fattore di "traspirabilità", ovvero, la capacità di un sistema di essere molto permeabile al passaggio di vapore. L'utilizzo di "membrane traspiranti", applicate all'estradosso del materiale coibente, consente la migrazione verso l'esterno del vapore residuo, e garantiscono l'assenza di condense interstiziali. L'altra traspirabilità, permette inoltre lo smaltimento, durante i periodi più caldi, di eventuale condensa accumulata negli inverni freddi e umidi, favorendo così "l'asciugatura" del sistema involucro.

Un altro valido sistema per contrastare la formazione di condensa interstiziale, è l'utilizzo di sistemi tecnologici di ventilazione, che permettono l'evacuazione del vapore residuo, infiltratosi attraverso gli strati che compongono il pacchetto di chiusura.

Protezione dagli agenti atmosferici (pioggia e neve)

Una delle principali funzioni degli involucri è quella di impedire il passaggio di acqua all'interno dell'edificio. L'acqua sotto forma di neve, pioggia e ghiaccio è spesso guidata dal vento e può penetrare attraverso l'involucro causando danni per i materiali costituenti e per gli stessi occupanti. L'acqua, infatti, spinta dall'azione del vento tende ad accumularsi nelle fessure e nelle superfici aggettanti, favorendo la formazione di muffe, ossidazione di materiali metallici e rigonfiamenti dei rivestimenti. Per controllare la penetrazione della

pioggia attraverso l'involucro, l'approccio convenzionale è quello di sigillare la facciata esterna dell'edificio. Tuttavia l'esperienza ha dimostrato che è irragionevole aspettarsi una perfetta sigillatura di una facciata poiché la maggior parte delle strategie di tenuta richiedono attenzione e manutenzione continua.

Gli studi sulla protezione dagli agenti atmosferici hanno rivelato una soluzione migliore rispetto all'approccio della sigillatura della facciata:

³ Per maggiori specifiche vedi pag 137.

I sistemi cosiddetti "Rain Screen Cladding" ³ prevedono la presenza di un intercapedine d'aria tra lo strato di finitura esterna e l'isolante a contatto con il tamponamento dell'edificio, che garantisce la riduzione della penetrazione d'acqua verso lo strato di coibentazione. Questo poiché la soluzione tecnologica ha un approccio a due fasi, secondo il quale, la prima barriera all'acqua è costituita dallo strato di rivestimento esterno ed ha il compito di impedire il passaggio della maggior parte dell'acqua meteorica, mentre l'intercapedine interna ventilata deve drenare verso l'esterno la quota parte di acqua che ha superato la prima difesa, favorendone perciò la sua espulsione. Questa soluzione prevede comunque l'ausilio di isolanti battentati oppure di teli microporosi traspiranti in grado di limitare al minimo che l'acqua possa raggiungere il paramento murario retrostante l'intercapedine.

Controllo acustico

Attenuare i rumori, portandoli a valori convenienti in funzione della destinazione dei locali e della loro specifica utilizzazione, a volte variabile nel corso della giornata, rappresenta l'imperativo sempre più impellente cui bisogna obbedire per evadere in qualche modo da quello stato di nevrosi cui la dinamica della vita quotidiana sembra volerci costringere in ogni momento. Il rumore del "prossimo", il funzionamento delle più disparate macchine, tolgono infatti a ciascuno la necessaria tranquillità. Talvolta, neanche nella propria casa si code dell'indispensabile quiete. Va rivelato che l'orecchio umano è abituato a ricevere un certo livello del rumore di fondo, collegato indubbiamente con la densità media dei suoni e dei rumori degli ambienti in cui l'individuo abitualmente vive lavora; sarà dunque sufficiente provvedere ad un'attenuazione dei rumori, provenienti dall'esterno, in modo che la loro intensità non superi quella conveniente in relazione anche alla destinazione di tali ambienti.

Pavimenti, soffitti e pareti sono gli elementi direttamente sollecitati che trasmettono il rumore le strutture portanti verticali e orizzontali, lo trasportano attraverso i piani. L'evoluzione dei sistemi costruttivi in edilizia e l'assoluta necessità che le costruzioni edili abbiano precisi requisiti acustici, hanno messo in evidenza la necessità di fissare delle norme per la definizione e la misura dei suddetti requisiti.

Il rumore per diffondersi, nell'ambiente, ed essere quindi da noi percepito, ha bisogno di un mezzo elastico (gas, liquido o solido). Nel caso specifico della propagazione del rumore all'interno degli edifici, tale mezzo di propagazione è costituito dagli stessi elementi strutturali che compongono l'edificio, quali pareti e solai.

La trasmissione del suono avviene secondo tre distinti meccanismi di propagazione:

- rumori aerei, che usano l'aria come veicolo di propagazione;
- rumori di impatto, generati dalla collisione di un oggetto su una parete o su di un solaio, la cui propagazione avviene attraverso le strutture solide dell'edificio, tramite vibrazioni elastiche.
- rumori da impianti continui e discontinui, provocati da apparecchiature come ascensori, aria condizionata, tubazioni, condotte d'aria o aperture etc.).

Pertanto, una progettazione efficace del fonoisolamento richiede un'attenzione complessiva alla trasmissione sonora attraverso tutti gli elementi che costituiscono l'edificio.

L'isolamento acustico è spesso erroneamente considerato come l'unico parametro rilevante delle prestazioni acustiche degli elementi strutturali dell'edificio. In realtà, l'isolamento acustico è un parametro fortemente influenzato dalla specifica configurazione dell'ambiente in cui viene misurato e da tutte le condizioni che lo circondano influenzando i la misurazione dei livelli di rumore presenti nei locali sorgente (L1) e ricevente (L2).

A questo proposito, possiamo definire l'isolamento acustico (D), misurato in dB, come la

differenza tra i valori medi dei livelli di pressione sonora rilevati nell'ambiente "sorgente" e quelli misurati nell'ambiente "ricevente", secondo la seguente equazione:

Quando un'onda sonora incide su una parete, espressa sotto forma di potenza sonora (W_i), questa si scompone in più componenti: una parte viene riflessa nell'ambiente sorgente (W_r) e una parte penetra nella parete, trasformandosi in energia vibrazionale. Quest'ultima viene, a sua volta, scorporata: una parte si dissipa in calore (W_q), mentre l'altra viene trasmessa nell'ambiente ricevente (W_t). È quindi evidente che la quantità di energia e trasmessa dalla partizione dipende dalle caratteristiche fisiche del materiale impiegato. A tal proposito l'assorbimento acustico è quella proprietà dei materiali di trattenere una parte dell'onda sonora che li colpisce. Più precisamente il fattore di assorbimento acustico rappresenta il rapporto fra l'energia, o la potenza, apparentemente assorbita dalla parete e l'energia globalmente incidente sulla parete stessa.

I materiali rigidi, compatti e a superficie liscia, (marmo, metalli, vetro, etc.) sono fortemente riflettenti e quindi mentre la parte di energia riflessa è notevole, risultano ridotte le quote di energia sonora assorbita dal materiale costituente la parete e trasmessa dalla parete stessa al locale adiacente.

Al contrario i materiali porosi sono caratterizzati dal fatto di assorbire o trasmettere un'alta percentuale dell'energia sonora che li colpisce e di rifletterne una percentuale minima. Questo fenomeno è dovuto all'attrito che l'onda sonora incontra nell'attraversare gli alveoli di questi tipi di materiali. Al contrario i materiali espansi, quali polistirolo, poliuretano e simili, anche se leggeri e di superficie ruvida, non possono essere considerati prodotti fonoassorbenti a causa appunto della loro struttura a celle chiuse.

Inseriamo di seguito alcune definizioni:

- R (dB) = potere fonoisolante.
- R_w (dB) = indice di valutazione del potere fonoisolante. Secondo la UNI EN ISO 717-1:2013, si ottiene dal potere fonoisolante (R), per bande di frequenza
- R'_w (dB) = indice di valutazione del potere fonoisolante apparente dell'elemento di separazione tra due ambienti: ottiene, secondo la UNI EN ISO 717-1:2013, dal potere fonoisolante apparente (R') per bande di frequenza,

Il D.P.C.M 5/12/1997, "Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici" è il decreto che definisce i limiti da rispettare per l'isolamento ai rumori negli immobili.

In particolare individua le prescrizioni per:

- Isolamento dai rumori aerei tra differenti unità immobiliari (TV, radio, voci, ecc.),
- Isolamento dai rumori provenienti dall'esterno (isolamento di facciata),
- Isolamento dai rumori da impatto (calpestio, ecc.),
- Isolamento dai rumori degli impianti a funzionamento discontinuo e continuo,
- Tempo di riverbero di aule e palestre scolastiche.

Il grado di protezione acustica, è differenziato asseconda della classe attribuita ai diversi ambienti abitativi, definita in relazione alla destinazione d'uso dell'immobile, come di seguito indicato.

categoria A	edifici adibiti a residenza o assimilabili
categoria B	edifici adibiti ad uffici e assimilabili
categoria C	edifici adibiti ad alberghi, pensioni ed attività assimilabili
categoria D	edifici adibiti ad ospedali, cliniche, case di cura e assimilabili
categoria E	edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili
categoria F	edifici adibiti ad attività ricreative o di culto o assimilabili
categoria G	edifici adibiti ad attività commerciali o assimilabili

Tabella 1. Categorizzazione acustica in base alla destinazione d'uso definita dal DPCM 5/12/1997

Per ciascuna categoria sono indicati, per le partizioni verticali e orizzontali (pareti e solai), i valori minimi di isolamento, mentre per i servizi sono riportati i valori massimi ammissibili di rumore da non superare nell'ambiente ricevente, ossia nel locale in cui è avvertito il maggior disturbo. In particolare:

- indice del potere fonoisolante apparente (R'_w), riferito a elementi di separazione tra due distinte unità immobiliari;
- indice di valutazione dell'isolamento acustico standardizzato di facciata ($D_{2m,nT,w}$);
- indice di valutazione del livello apparente normalizzato di rumore da calpestio di solai ($L'_{n,w}$);
- livello massimo di pressione sonora, ponderata A con costante di tempo "Slow" (L_{ASmax}), per i servizi a funzionamento discontinuo;
- livello continuo equivalente di pressione sonora, ponderata "A" (L_{Aeq}), per i servizi a funzionamento continuo.

Categoria dell'edificio	Parametri				
	R'_w	$D_{2m,nT,w}$	$L'_{n,w}$	L_{ASmax}	L_{Aeq}
D	55	45	58	35	25
A, C	50	40	63	35	35
E	50	48	58	35	25
B, F, G	50	42	55	35	35

Tabella 2. Requisiti acustici per gli edifici definiti dal DPCM 5/12/1997

⁴ "Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti"

In particolare, l'isolamento acustico di facciata viene calcolato seguendo quanto indicato dalla normativa UNI EN 12534-3 ⁴, l'isolamento acustico di facciata può essere calcolato a partire dall'indice del potere fonoisolante apparente della facciata (R'_w), ottenuto tenendo conto sia della trasmissione diretta attraverso i vari elementi della partizione che della trasmissione laterale, con la seguente relazione.

$$D_{2m,nT,w} = R'_w + \Delta L_{fs} + 10 \log \frac{V}{6T_0S} \quad (\text{dB})$$

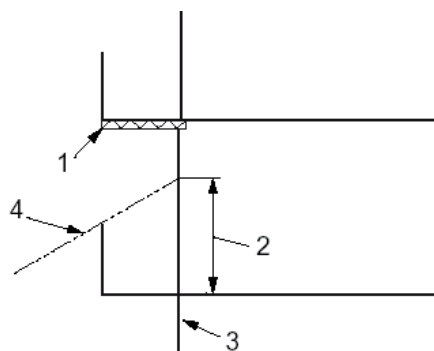
dove:

S è la superficie della parete vista dall'ambiente interno (in m²),

V è il volume dell'ambiente interno (in m³),

T_0 è il tempo di riverberazione di riferimento pari a 0,5 secondi

ΔL_{fs} è la differenza di livello per forma della facciata (dB) definita dalla seguente tabella.



- 1 - Assorbimento
- 2 - Altezza dell'orizzonte visivo
- 3 - Piano della facciata
- 4 - Sorgente sonora

ΔL_{TS} dB	1 facciata piana	2 ballatoio	3 ballatoio	4 ballatoio	5 ballatoio
Assorbimento del tetto (α_w) \Rightarrow	Non applicabile	$\leq 0,3$ 0,6 $\geq 0,9$	$\leq 0,3$ 0,6 $\geq 0,9$	$\leq 0,3$ 0,6 $\geq 0,9$	$\leq 0,3$ 0,6 $\geq 0,9$
Orizzonte visivo sulla facciata <1,5 m	0	-1 -1 0	-1 -1 0	0 0 1	Non applicabile
(1,5 - 2,5) m	0	Non applicabile	-1 0 2	0 1 3	
>2,5 m	0		1 1 2	2 2 3	3 4 6
	6 balcone	7 balcone	8 balcone	9 terrazza	
				Ringhiera aperta	Ringhiera chiusa
Assorbimento del tetto (α_w) \Rightarrow	$\leq 0,3$ 0,6 $\geq 0,9$	$\leq 0,3$ 0,6 $\geq 0,9$	$\leq 0,3$ 0,6 $\geq 0,9$	$\leq 0,3$ 0,6 $\geq 0,9$	$\leq 0,3$ 0,6 $\geq 0,9$
Orizzonte visivo sulla facciata <1,5 m	-1 -1 0	0 0 1	1 1 2	1 1 1	3 3 3
(1,5 - 2,5) m	-1 1 3	0 2 4	1 1 2	3 4 5	5 6 7
>2,5 m	1 2 3	2 3 4	1 1 2	4 4 5	6 6 7

Tabella 3. Requisiti acustici per i componenti delle chiusure degli edifici.

Gli elementi che contribuiscono al calcolo dell'isolamento acustico standardizzato di facciata sono:

- lo strato portante in relazione sua massa;
- l'isolamento, per le sue proprietà fonoassorbenti-fonoimpedenti;
- lo strato di finitura e il sistema di fissaggio contribuiscono ad ostacolare la propagazione del rumore dall'esterno verso l'interno.

Per la determinazione del valore di isolamento acustico standardizzato di facciata, $D_{2m,nT,w}$ sono quindi necessarie le informazioni relative al potere fonoisolante di tutti i componenti di facciata come serramenti, pareti opache, pareti trasparenti, etc.

Controllo e resistenza al fuoco

Con l'attuale esigenza di edilizia sostenibile, l'involucro dell'edificio negli anni ha subito notevoli cambiamenti, infatti, per ridurre le perdite di calore attraverso la facciata,

vengono introdotti nuovi materiali leggeri ad alta efficienza energetica e con buone proprietà di isolamento termico. Tuttavia, l'aspetto importante a cui è stata data meno attenzione è il comportamento di tali facciate in caso di incendio. La facciata dell'edificio, se non progettata tenendo conto di un'adeguata resistenza al fuoco, risulta essere un punto estremamente critico, poiché la propagazione del fuoco è rapidissima e mette a rischio la sicurezza dell'intero edificio e dei suoi occupanti.

L'incendio di Grenfellower, verificatosi il 14 giugno 2017 e ha provocato almeno 80 vittime, è l'ultimo incidente importante, nonché uno spiacevole esempio di quanto le facciate moderne possano essere vulnerabili agli incendi, compromettendo direttamente la sicurezza degli occupanti. L'installazione del sistema di facciata sulla Torre Grenfell era stato ultimato soltanto nel 2016.

Gli aspetti di sicurezza in caso di incendio legati alle facciate sono stati affrontati a livello nazionale con l'emanazione della Circolare Prot. n. 5043 del 15 aprile 2013, avente come oggetto l'aggiornamento della Guida Tecnica su "Requisiti di sicurezza antincendio delle facciate negli edifici civili", risalente al 2010. L'applicazione di tali indicazioni è su base volontaria e si applica ad edifici aventi altezza antincendio superiore ai 12 metri.

Rispetto alla precedente versione, gli aggiornamenti introdotti riguardano un'approfondimento dei casi studio delle facciate da un punto di vista tipologico in relazione agli aspetti di sicurezza antincendio da garantire, fornendo anche una migliore impostazione formale in riferimento soprattutto alle specifiche caratteristiche prestazionali che richiede.

Il documento ha i seguenti obiettivi:

- Limitare la probabilità di propagazione di un incendio originato all'interno dell'edificio, causato da fiamme che fuoriescono da vani, aperture, cavità verticali della facciata, interstizi,
- Limitare la probabilità di incendio di una facciata e la sua successiva propagazione, a causa di un focolare avente origine esterna,
- Evitare o limitare, in caso d'incendio, la caduta di parti di facciata che possono compromettere la sicurezza degli occupanti e dei soggetti intervenuti in soccorso.

La normativa fornisce alcune definizioni distinguendo le seguenti tipologie d'involucro

- Facciata semplice
- Facciate a doppia parete (non ventilata, ventilata non ispezionabile o ispezionabile)
- Curtain wall (facciata continua)
- Parete aperta
- Parete chiusa
- Kit

Il problema del fuoco in una facciata consiste nella propagazione dell'incendio dal piano in cui si sviluppa ai piani superiori, a causa della fuoriuscita di fiamme. Le facciate a doppia pelle incrementano il rischio di propagazione dell'incendio da un piano all'altro, come ha dimostrato l'incendio di Grenfellower, infatti il rischio nelle facciate ventilate è amplificato dalla sua conformazione che riproduce l'effetto camino.

Le caratteristiche della facciata ventilata che influiscono sulla propagazione dell'incendio sono: la larghezza della cavità, la presenza, o meno, di oggetti e il tipo di ventilazione della facciata.

In via generale, non sono richiesti requisiti di resistenza al fuoco per gli elementi della facciata che appartengono a compartimenti aventi carico d'incendio specifico, al netto del contributo rappresentato dagli isolanti eventualmente presenti nella facciata, minore o uguale a 200 MJ/m². Non sono altresì richiesti requisiti di resistenza al fuoco per gli elementi della facciata che appartengono a compartimenti all'interno dei quali il valore del carico di incendio specifico è superiore a 200 MJ/m² se essi sono provvisti di un sistema di spegnimento ad attivazione automatica.

La facciata deve presentare in corrispondenza di ogni solaio e di ogni muro trasversale, con funzione di compartimentazione, una fascia costituita da uno o più elementi costruttivi di

classe di resistenza al fuoco E60-ef (o →i).

Nel caso delle facciate di tipo curtain walls ovvero in tutti i casi in cui l'elemento di facciata non poggia direttamente sul solaio è inoltre richiesto che l'elemento di giunzione della facciata ai solai e ai muri trasversali dei compartimenti sia di classe di resistenza al fuoco EI60.

Schema A

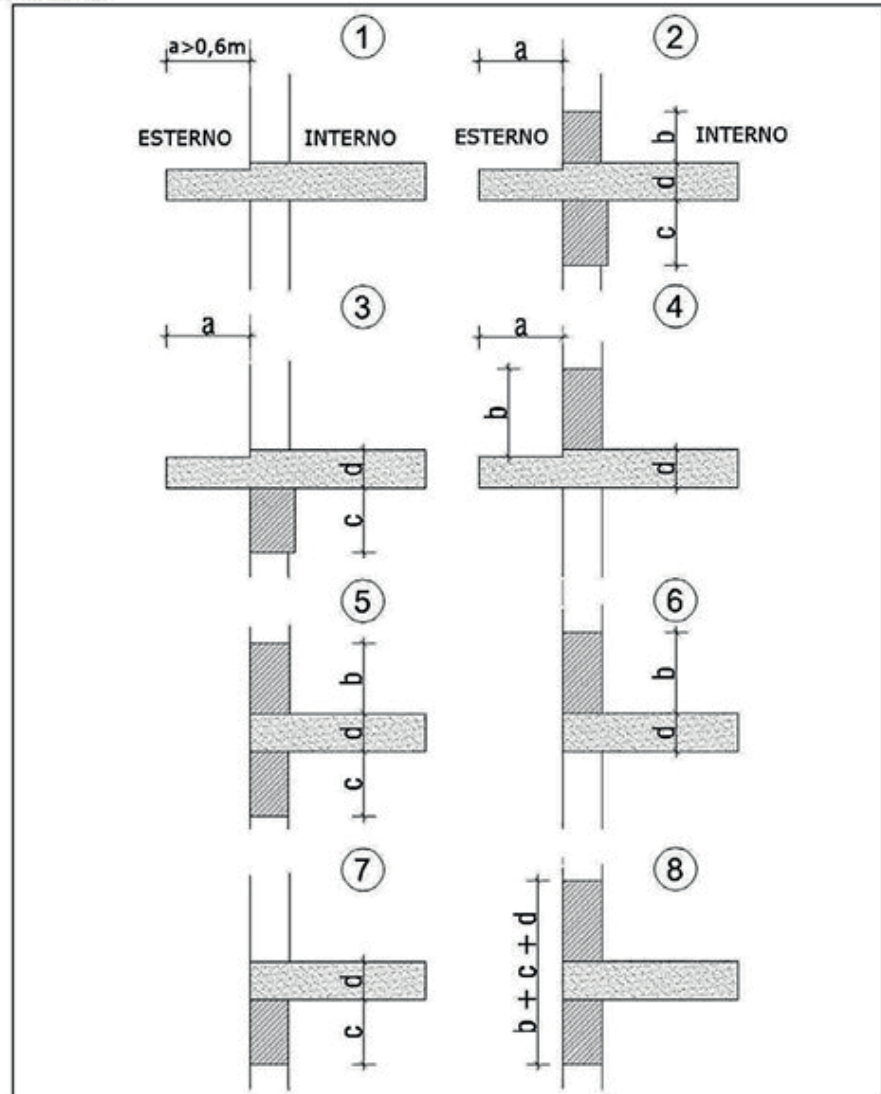


Figura 1. Schema A della circ. n° 5043 dei VVF

- a. La fascia di separazione orizzontale tra i compartimenti, al fine di evitare la propagazione verticale dell'incendio, deve essere realizzata con uno o più elementi costruttivi resistenti al fuoco e secondo gli schemi A e B, come di seguito specificato: una sporgenza orizzontale continua a protezione della parte della facciata situata al di sopra del solaio, di larghezza "a" uguale o superiore a 0,6 m, raccordata al solaio oppure
 - b. un insieme di elementi come di seguito descritti:
 - una sporgenza orizzontale continua a protezione della parte della facciata situata al di sopra del solaio di larghezza "a", raccordata al solaio;
 - un parapetto continuo di altezza "b" al piano superiore, raccordato al solaio;
 - un architrave continuo di altezza "c", raccordato al solaio.
- La somma delle dimensioni a, b, c e d (spessore del solaio) deve essere uguale o superiore

ad un metro; ciascuno dei valori a, b o c può eventualmente essere pari a 0.

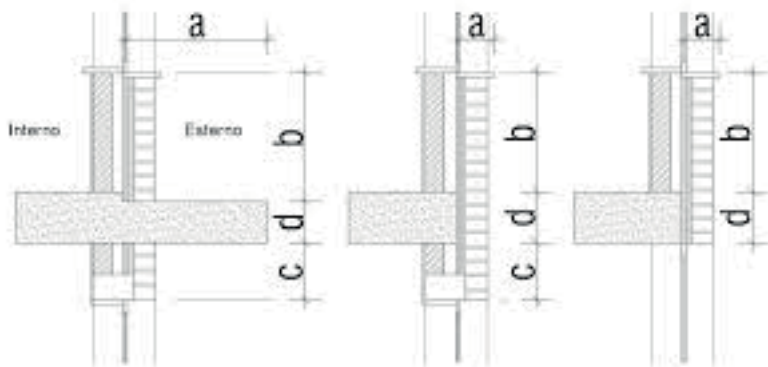


Figura 2. Schema B della circ. n° 5043 dei VVF

- I prodotti isolanti presenti in una facciata, comunque realizzata secondo quanto indicato nelle definizioni, devono essere almeno di classe 1 di reazione al fuoco ovvero classe B-s3-d0, in accordo alla decisione della Commissione Europea 2000/147/CE del 8 febbraio 2000. La predetta classe di reazione ai fuoco, nel caso in cui la funzione isolante della facciata sia garantita da un insieme di componenti unitamente commercializzati come kit, deve essere riferita a quest'ultimo nelle sue condizioni finali di esercizio.
- I prodotti isolanti, con esclusione di quelli posti a ridosso dei vani finestra e porta-finestra per una fascia di larghezza 0,60 m e di quelli posti alla base della facciata fino a 3 m fuori terra, possono non rispettare i requisiti di reazione al fuoco richiesti purché siano installati protetti, anche all'interno di intercapedini o cavità, secondo le indicazioni seguenti: prodotto isolante C-s3-d2 se protetto con materiali almeno di classe A2;
- Possono essere adottate ulteriori soluzioni protettive purché supportate da specifiche prove di reazione al fuoco su combinazione di prodotti (supporti, isolanti, protettivi) rappresentativi della situazione in pratica che garantiscano una classe di reazione al fuoco non inferiore ad 1 ovvero a B-s3-d0.
- Le guarnizioni, i sigillanti e i materiali di tenuta, qualora occupino complessivamente una superficie maggiore del 10% dell'intera superficie della facciata, dovranno garantire gli stessi requisiti di reazione al fuoco indicati per gli isolanti.
- Tutti gli altri componenti della facciata, qualora occupino complessivamente una superficie maggiore del 40% dell'intera superficie della facciata, dovranno garantire gli stessi requisiti di reazione al fuoco indicati per gli isolanti.
- Per gli elementi in vetro non viene richiesta alcuna prestazione di reazione al fuoco. Qualora elementi metallici (staffe, perni, viti, ecc.) o impianti, suscettibili in condizioni di esercizio di raggiungere temperature superiori a 150°C, attraversano prodotti isolanti che non rispettano i requisiti di reazione al fuoco richiesti, è necessario separare tali elementi dal contatto diretto con il prodotto isolante.

Ecco dunque che la prestazione dell'involucro, in relazione alle normative europee e nazionali, al cambiamento delle condizioni climatiche esterne, alla richiesta di spessori sempre più ridotti in combinazione con sistemi tecnologici sempre più complessi, è un fattore imprescindibile nella progettazione architettonica e nella ricerca di sistemi costruttivi di facciata a secco le cui prestazioni energetiche, sono affidate a materiali altamente efficienti.

Per raggiungere questo obiettivo è necessario tener conto di molteplici fattori: controllare il flusso di calore, controllare il lusso d'aria, controllare l'ingresso di inquinanti esterni,

controllare il flusso di vapore acqueo, evitare la penetrazione della pioggia, controllo della luce solare e delle altre radiazioni, controllo del rumore e protezione dal fuoco. Questi requisiti vengono soddisfatti selezionando elementi e materiali che forniscono la resistenza appropriata a ciascuno dei flussi. Inoltre, è importante definire anche la disposizione degli elementi chiamati a rispondere ai diversi quesiti, poiché questa influisce sulle condizioni all'interno della parete, come temperatura e pressione del vapore acqueo. La disposizione degli elementi, può inoltre migliorare la durata degli stessi e del sistema involucro nel suo insieme. Ad esempio, la posizione dell'isolamento termico condiziona le temperature dei singoli elementi dell'involucro. La temperatura influisce sulla durata dei materiali, sulle dilatazioni termiche a cui gli elementi saranno sottoposti e di conseguenza sulla capacità dei materiali stessi di adattarsi a questi movimenti.

L'involucro edilizio, nella sua complessità deve rispondere a molteplici questioni, in primis deve fornire risposte adeguate in termini di prestazione termica, ovvero soddisfare i requisiti che riguardano il controllo del trasferimento di calore, aria e umidità tra l'interno e l'esterno di un edificio.

3.2 L'approccio tecnologico funzionale: classificazione dei sistemi di facciata

Nell'architettura moderna gli architetti sono stati preparati a conoscere le differenti tipologie e usi di materiali e i loro sistemi di assemblaggio. Gli edifici sono diventati più complicati del passato, così come scegliere i materiali e le tecnologie da utilizzare in un panorama sempre crescente di innovazione di nuovi prodotti e sistemi.

In molti casi l'architetto non è totalmente consapevole delle origini e della gamma prodotti che compongono le parti di un sottocomponente.

La progettazione e la successiva realizzazione degli elementi di involucro si caratterizza, essenzialmente, per un generale processo di alleggerimento della materia affiancato dalla riduzione progressiva degli spessori e per la possibilità di progettare le qualità superficiali degli strati esterni, non solo riferite ad aspetti protettivi, ma anche in relazione allo studio e alla definizione di nuove qualità estetiche.

L'involucro è diventato ormai il "sottosistema" più importante di un edificio, per tutti gli aspetti architettonici e di durabilità ad esso legati, ma soprattutto per lo scambio energetico tra interno ed esterno che esso rappresenta. E' evidente quindi quanto sia importante conoscere al meglio le sue tecnologie e saper disegnare, calcolare, ingegnerizzare, produrre, realizzare e infine gestire le facciate degli edifici moderni in modo da ottenere un'effettiva corrispondenza tra prestazioni reali e requisiti di progetto. L'involucro contemporaneo si è caratterizzato, inoltre, per la totale indipendenza dalla struttura portante, infatti, rispetto all'edilizia tradizionale, che impiegava la muratura

per la definizione dell'involucro esterno, i tamponamenti esterni sono ora sorretti da strutture portanti che consentono scelte progettuali e formali molteplici, appoggiandosi semplicemente alla struttura portante interna.

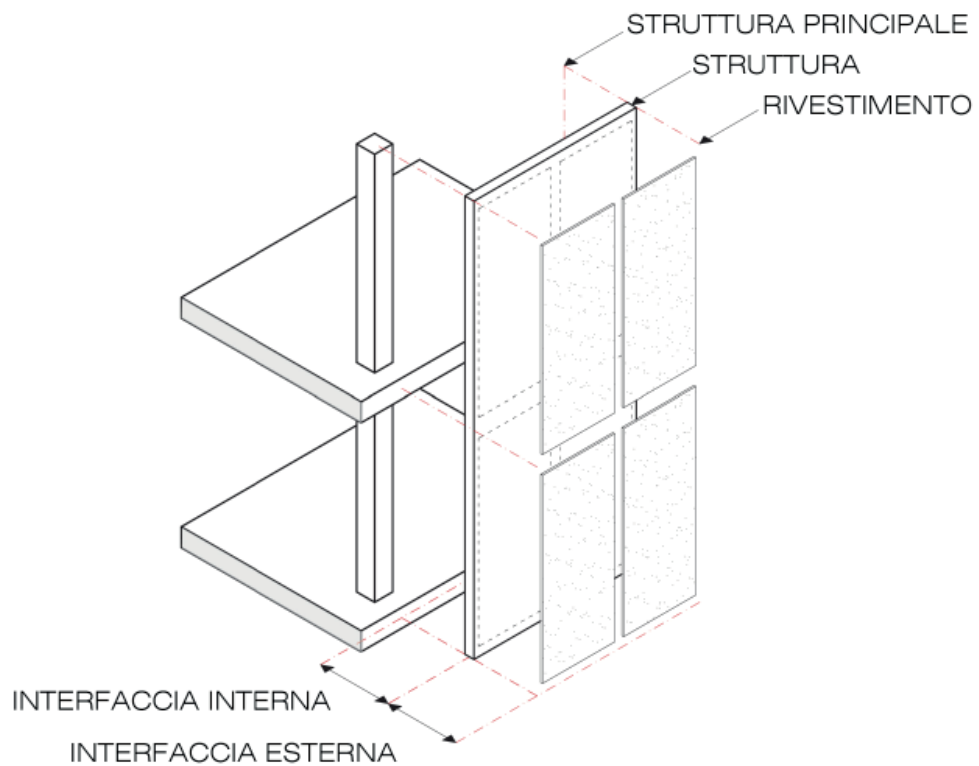


Figura 1. Rappresentazione schematica degli elementi che costituiscono le facciate

L'introduzione di materiali artificiali e di processi di evoluzione tecnologica ed industriale, hanno determinato la trasformazione delle murature da elemento di chiusura gettato in opera a sistema di frontiera leggero prefabbricato e montato a secco.

Un sistema di chiusura realizzato a secco è costituito da un elemento portante in grado di sorreggere gli strati che compongono l'involucro attraverso sistemi di ancoraggio meccanici assemblati a secco e dimensionati in funzione del tipo di superficie, dei carichi accidentali e permanenti in esercizio, del tipo di rivestimento e della distanza tra questo e la struttura di supporto.

Una sempre più diffusa evoluzione della componentistica permette di ottenere elementi caratterizzati da molteplici combinazioni con le quali è possibile sfruttare le potenziali sinergie tra materiali diversi e consentire un'integrazione di più sistemi costruttivi e abitativi.

Dal punto di vista del sistema costruttivo, possiamo individuare le seguenti le tipologie di involucro a secco:

- Strutture composte da montanti e traversi
- Strutture a cellule o unità
- Facciata continua strutturale
- Facciata a fissaggio puntuale

La facciate continue con montanti e traversi

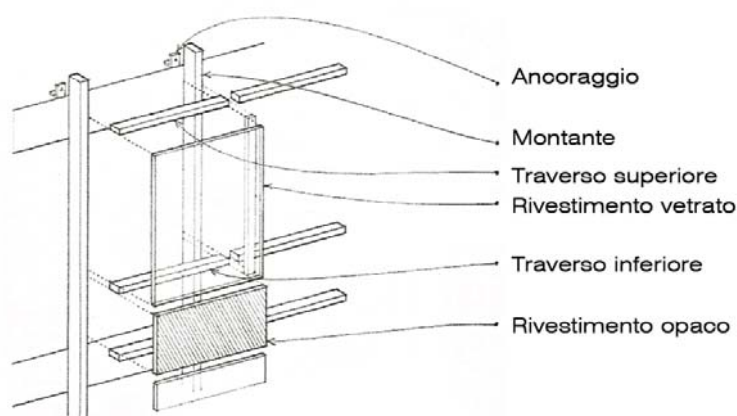


Figura 2. Schema della facciata a montanti e traversi

La facciate continue con montanti e traversi, denominate anche "stick system", sono costituite da una struttura secondaria posta di fronte alla parte anteriore del solaio.

Esse vengono definite, secondo la normativa UNI EN 13119:2016 - Facciate continue - Terminologia, come uno scheletro portante leggero di componenti assemblati in loco che sostengono elementi di tamponamento opachi e/o traslucidi prefabbricati e serramenti apribili. L'intelaiatura strutturale della facciata è costituita dall'assemblaggio di montanti verticali e traversi orizzontali collegati tra loro meccanicamente e ancorati in corrispondenza dei solai interpiano dell'edificio.

In genere sono utilizzati profili di acciaio a C ammortati alle travi di bordo o nelle solette con modalità diverse:

- sul fronte, causa un aumento della distanza tra solaio e facciata,
- sulla parte superiore del solaio, si riduce la distanza, ma si crea un'interferenza tra la finitura del solaio e la posa della facciata, all'interno del solaio, oneroso per la realizzazione dell'incasso,
- sotto il solaio, ma in questo caso l'elemento lavora a trazione.

Generalmente i montanti hanno uno spessore maggiore del pannello e spesso sporgono verso l'interno della facciata. Montanti e traversi di solito hanno un profilo scatolare e sono dotati di complementi che consentono l'inserimento di vetri, bloccati meccanicamente da pressori che accolgono anche le guarnizioni di tenuta. Nella maggior parte dei casi i profili sono a taglio termico, ovvero dotati di un inserto plastico che interrompe la continuità della sezione metallica migliorandone le prestazioni dal punto di vista termico. Solitamente la lunghezza di ogni montante corrisponde con l'altezza interpiano dell'edificio, mentre i traversi hanno una lunghezza variabile tra gli 80 e i 150 cm

Montanti e traversi hanno la funzione di trasferire i carichi agenti sulla facciata alla struttura portante dell'edificio. A tal proposito, essi sono dotati di giunti di compensazione delle dilatazioni termiche e delle deformazioni differenziali tra struttura e facciata, poiché le variazioni di temperatura, l'azione del vento, del sisma e i sovraccarichi accidentali determinano sulla facciata e sulla struttura forze di spostamento orizzontali, verticali, di torsione e di flessione che devono essere assorbite. I montanti sono infatti collegati tra loro tramite un vincolo a carrello che ne permette gli spostamenti verticali, mentre i traversi sono connessi ai montanti tramite un incastro ad una estremità e un carrello all'altra, agevolando gli spostamenti orizzontali.

Alla struttura della facciata può essere agganciata un ulteriore sistema sporgente verso l'esterno, formato da mensole e tiranti di fissaggio che sostengono uno schermo di

protezione dalla pioggia o dalla luce diretta.

La facciata a cellule o unità

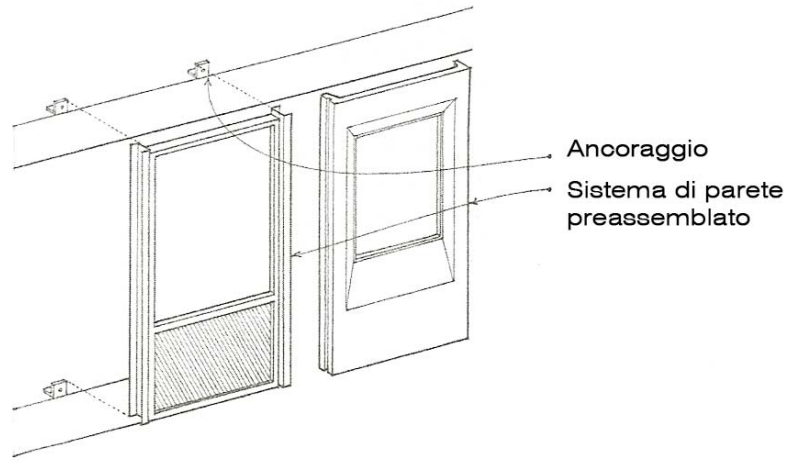


Figura 3. Schema della facciata a cellule o unità pre-assemblate

La facciata a cellule o unità, denominata anche "unit-system" o "panel system", è costituita da cellule pre-assemblate contenenti sia il profilo di alluminio (l'elemento portante), che lo strato di tamponamento, cieco od opaco e vetrate fisse o apribili (elemento portato). I moduli prefabbricati in officina, sono trasportati in cantiere dove vengono montati a secco sull'edificio, mediante staffe di collegamento, in modo analogo al sistema a montanti e traversi.

Gli elementi presentano un'altezza pari all'interpiano dell'edificio e sono dotati di incastri maschio-femmina ricavati nei profili dei montanti che consentono gli accoppiamenti tra un telaio e l'altro, sia sul piano orizzontale che verticale. Esternamente la scansione delle unità è ben visibile, le fughe tra una cellula e l'altra infatti hanno uno spessore variabile da 1 a 2 cm. Il fissaggio delle parti vetrate può essere meccanico, con pressori avvitati ai telai, oppure effettuato attraverso l'impiego di siliconi strutturali.

Questo sistema garantisce uno standard qualitativo elevato grazie ai processi di industrializzazione, che riducono gli sprechi e le possibilità di errori in cantiere, ottimizzando i tempi della posa in opera, che avviene dal basso e prosegue verso l'alto di pari passo con l'elevazione delle strutture verticali ed orizzontali, utilizzando l'edificio stesso come impalcatura.

Inoltre il sistema a cellule garantisce livelli di tenuta altamente efficienti e una maggiore flessibilità degli elementi nel piano della facciata attraverso giunti telescopici, oltre a minori costi di montaggio che non prevedono l'utilizzo di opere provvisorie di cantiere e un minor numero di manodopera specializzata.

L'installazione degli elementi richiede, però, ampi spazi per lo stoccaggio e la movimentazione in cantiere, nonché particolari precauzioni da adottare in fase di trasporto, al fine di evitare danneggiamenti ai pannelli e fessurazioni alle guarnizioni di tenuta.

La facciata continua strutturale, o structural glazing

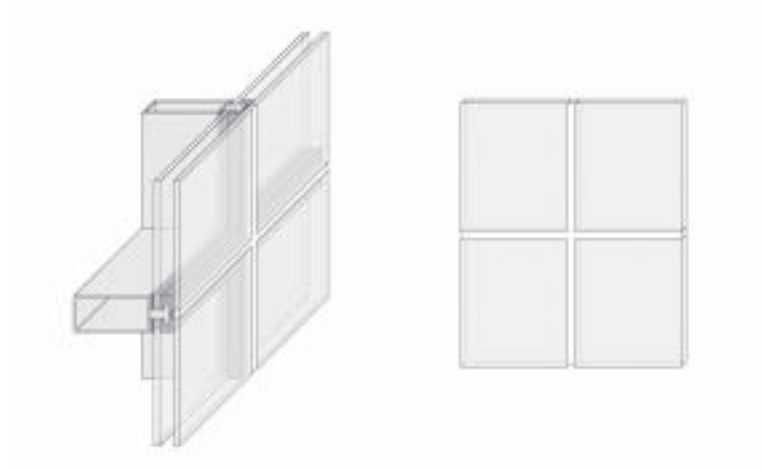


Figura 4. Schema dei facciata continua strutturale

¹ J.Iker, c. Nemeth, *structural Glazing: una nuova tecnica per facciate interamente vetrate*, Doc. Dow Corning, p.2, riportato in P.Rebuffo, C. Redaelli, *Vetrate Strutturali*, in "aprire" n.1, 1994, p.43

Esiste da più di 50 anni: "il concetto dello Structural Glazing è stato sviluppato nei laboratori di produttori americani di materiali ermetizzanti e sottoposto a collaudi intensivi durante gli anni sessanta e settanta. I primi edifici nei quali è stato impiegato il sistema di vetratura structural glazing risalgono al 1963."¹

Può essere costituita da pannelli di tamponamento trasparenti, opachi, fissi o apribili, incollati mediante siliconi strutturali a telai metallici, di solito in alluminio.

L'incollaggio dei pannelli ai telai può avvenire esclusivamente in officina in quanto l'operazione necessita di particolari condizioni ambientali che in cantiere non è possibile garantire.

Gli elementi possono essere installati ad una struttura di montanti e traversi o, come nei sistemi a cellula, applicati direttamente al corpo di fabbrica, senza l'ausilio di un ulteriore sotto-struttura metallica. Un ruolo fondamentale è affidato ai sigillanti siliconici che devono resistere ai carichi del vento, del peso proprio della parete, alle dilatazioni termiche dei vari elementi della facciata (vetri, telai, struttura portante) e all'eventuale azione sismica, trasferendo le sollecitazioni all'intelaiatura metallica.

Le facciate strutturali vengono generalmente divise in due categorie:

- su quattro lati, i pannelli in vetro non presentano ritegni metallici e sono incollati lungo tutto il perimetro
- su due lati, i pannelli in vetro presentano ritegni metallici lungo i due lati orizzontali e sono incollati sui due lati verticali.

Ciononostante nel caso di facciate a quattro lati, spesso si prevede l'inserimento di un ritegno meccanico di sicurezza in corrispondenza dei giunti orizzontali, per evitare che l'eventuale perdita di tenuta del sigillante provochi la caduta delle lastre di vetro.

Il silicone strutturale non ha soltanto il compito di "incollare" le lastre di vetro, ma svolge anche la funzione di giunto di dilatazione termica, in grado di assorbire le deformazioni della facciata, a tal proposito il suo spessore non può essere inferiore a 1 cm o negli edifici molto alti, inferiore a 2 cm.

Per una buona riuscita della facciata strutturale vetrata è richiesta la massima precisione nel taglio e nella molatura delle lastre di vetro, evitando ogni piccola imperfezione o irregolarità dei bordi.

Se si utilizzano vetri isolanti è necessaria una particolare attenzione nella sigillatura dell'intercapedine, poiché un'errata sigillatura del perimetro non garantisce la tenuta al vapore acqueo, causando fenomeni di appannamento delle lastre e deterioramento dell'intero sistema.

Esistono due tipi fondamentali di silicone strutturale: monocomponente e bicomponente. Il primo è più economico e di facile applicazione ma richiede un lungo tempo di

polimerizzazione (due o tre settimane). Il secondo è più costoso e più difficile da applicare ma polimerizza in un tempo minore (tre -cinque giorni).

A prescindere dal tipo impiegato, in un sistema strutturale, il silicone deve assolvere i seguenti compiti:

- sostenere il peso delle lastre e trasferire i carichi orizzontali accidentali alla sottostruttura metallica;
- assorbire le dilatazioni termiche degli elementi della facciata;
- resistere ai raggi UV, all'umidità e alla pioggia;
- assorbire le deformazioni della struttura dell'edificio sotto l'azione delle forze orizzontali (vento e componente orizzontale del sisma) e verticali (carichi accidentali e permanenti dei solai, componente verticale del sisma).

La facciata a fissaggio puntuale

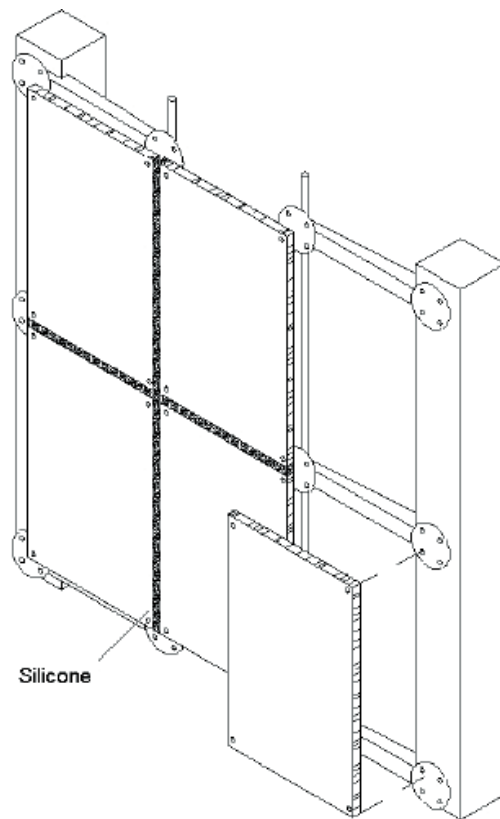


Figura 5. Schema di facciata a fissaggio puntuale Clamp angolare

Caratterizzata da elementi che supportano la lastra in punti necessari e sufficienti, e non in modo continuo. L'ancoraggio può avvenire sia attraverso la foratura della lastra per l'inserimento dell'accessorio di sostegno previsto, fissaggio passante, che non passante (fissaggio tramite clamp).

Una vetrata a fissaggi puntuali passanti si ottiene ancorando le lastre di vetro mediante vincoli strutturali denominati "rotules", che hanno il compito di trasferire i carichi alla struttura secondaria, solitamente costituita da componenti metallici denominati "ragni". Le rotules presentano uno snodo sferico che di fatto trasforma il punto di connessione tra vetro ed elemento metallico in una vera e propria cerniera, evitando una connessione di tipo rigido.

Il fissaggio tramite clamp è paragonabile ad una pinza che fissa il bordo della lastra e che quindi non implica la foratura della stessa. Le soluzioni possono variare a seconda di dove

viene posizionato l'elemento di fissaggio:

- il clamp perimetrale, realizzato attraverso pinze a due vie che stringono due lastre una superiore e una inferiore, generalmente ogni vetro è sorretto da quattro elementi, due superiori e due inferiori.
- il clamp angolare, costituito da una pinza a quadrifoglio posizionato nel punto di incontro di quattro lastre.

Nel evoluzione dei sistemi di involucro edilizio, le diverse tipologie di soluzioni sono state denominate, in letteratura e nella pratica, in diversi modi. Le distinzioni che vengono riportate di seguito, non vogliono essere una classificazione, si sottolinea infatti che una stessa soluzione può essere definita in più modi a seconda delle caratteristiche qualificanti che si vogliono evidenziare.

Sistema stratificato a secco Struttura/Rivestimento

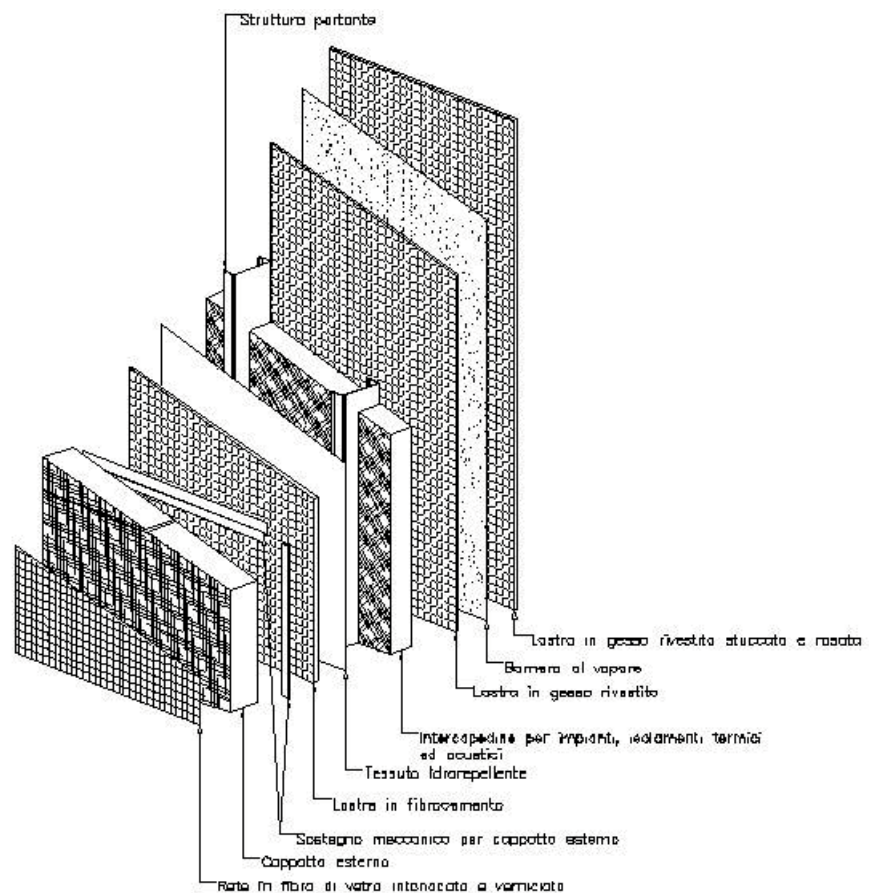


Figura 6. Schema di un sistema di facciata stratificato con doppia struttura

Si tratta di un sistema costituito dalla scelta di una adeguata successione di strati più o meno sottili, leggeri e ad alte prestazioni. Nelle strutture stratificate, ogni "layer" tecnologico assolve una funzione specifica, ma il risultato del sistema è complessivo e necessita di opportune valutazioni in fase progettuali e verifiche prestazionali conclusive. La principale caratteristica del sistema stratificato a secco consiste nella possibilità di combinare i differenti elementi attraverso l'utilizzo di collegamenti meccanici. Ciò, lascia presupporre l'idea di avere un processo costruttivo trasformabile e flessibile, che consente lo smontaggio o la sostituzione degli elementi del sistema nel tempo. Il concetto di reversibilità in realtà non può essere applicato sempre in maniera rigorosa, poiché in alcuni casi, anche piuttosto frequenti, il progettista adotta soluzioni che prevedono

l'assemblaggio irreversibile tra due o più componenti, o per ragioni di carattere costruttivo si rendono necessarie getti o incollaggi eseguiti in opera.

Il concetto di stratificazione dell'involucro è strettamente connesso alle scelte dei materiali funzionali, estetici ed economici, tali da creare un "pacchetto muro", che nel caso di costruzioni ex-novo sarà assemblato e sostenuto dalla struttura prevalentemente a telaio, mentre nel caso di riqualificazione energetica, sarà applicato come sistema aggiuntivo sulle pareti di chiusura esistenti.

Definito l'impianto strutturale, i fattori che influiscono sulla definizione dei pacchetti di chiusura aumentano considerevolmente, rendendo sempre più complesso il processo progettuale. In questa fase, un ruolo chiave viene affidato alla selezione e alla disposizione degli strati di isolamento all'interno del sistema, non solo per ciò che concerne il risultato prestazionale, ma anche in riferimento alle interferenze con le sotto-strutture di supporto ed i rivestimenti.

La scelta del materiale isolante è legata alle condizioni climatiche di riferimento, all'apparato strutturale, fattori di carattere economico, nonché alle proprietà dei materiali e dei sistemi tecnologici su cui essi vanno applicati; infatti, l'applicazione di un materiale su un sistema a cappotto termico piuttosto che su una facciata ventilata condiziona la scelta del prodotto finale.

Anche il ruolo e la posizione degli strati di controllo del trasferimento di vapore, sia con freni e barriere sul lato interno, sia con membrane impermeabili traspiranti su quello esterno, assumono un'importanza rilevante. La configurazione della stratigrafia deve anche tenere conto degli spessori di struttura e sotto-struttura, nonché delle discontinuità derivanti dai molti punti di collegamento meccanici che possono essere causa di ponti termici. Inoltre, la scelta della finitura di rivestimento esterno, oltre a fattori di ordine estetico, deve essere fatta tenendo conto delle prestazioni di tenuta all'aria e all'acqua, tali da garantire la protezione ed il mantenimento degli stati sottostanti.

La facciata continua o Curtain wall

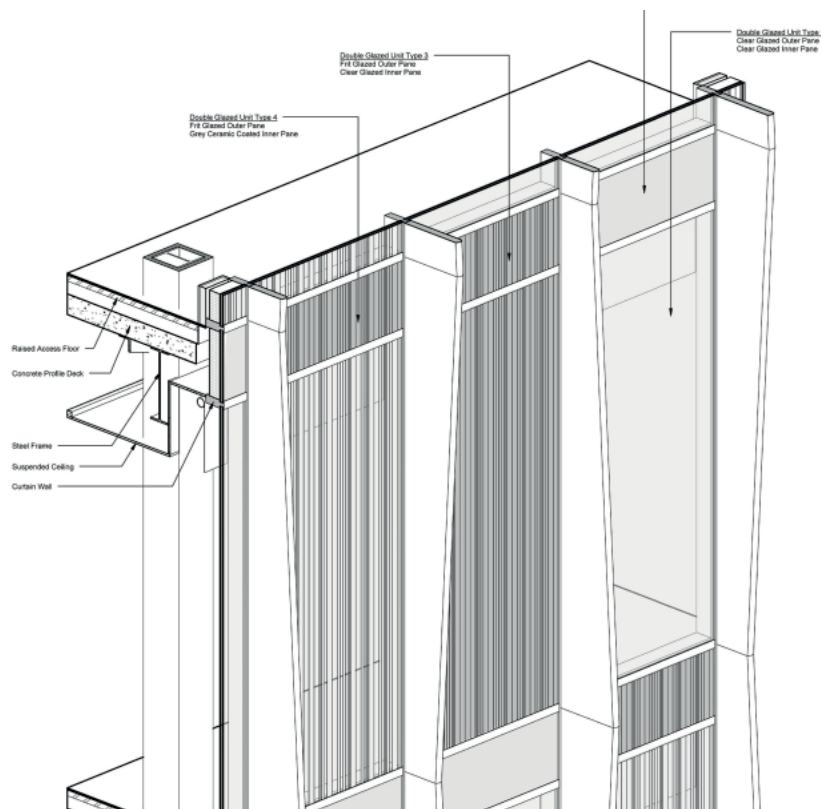


Figura 7. Sezione assonometrica, esempio di facciata continua

Le facciate continue sono una categoria particolare di pareti esterne non portanti composte da elementi modulari ripetuti, eseguiti in officina e montati in opera.

L'accezione "facciata continua" traduce il termine inglese "curtain wall" che letteralmente sta a significare "muro cortina" o "muro tenda", e che nella terminologia tecnica viene associato ad una superficie geometrica continua.

Anche se la definizione di "curtain wall" è spesso identificata esclusivamente con il sistema di facciata a montanti e traversi, con l'avvento di nuovi processi costruttivi, l'evoluzione di nuove tecnologie produttive e la ricerca verso nuove forme architettoniche, oggi, tale definizione accoglie un'ampia gamma di possibilità costruttive e formali, grazie ad una tecnologia di settore in continua evoluzione.

La normativa europea EN 13830 "Curtain walling - Product standard" definisce la facciata continua come: una chiusura esterna verticale costituita da una ossatura realizzata principalmente in metallo, PVC o legno. Generalmente essa è composta da una maglia reticolare portante di elementi verticali ed orizzontali tra di loro connessi e vincolati alla struttura dell'edificio, al fine di supportare lo strato di rivestimento costituito da specchiature estese a tutta la superficie leggere trasparenti e/o opache.

Questo sistema presenta un'elevata complessità costruttivo-funzionale, dovendo compiere i ruoli tradizionalmente svolti dalla parete perimetrale e dagli infissi. Per assolvere a tali funzioni, esso è costituito da due livelli funzionali: il livello di supporto e quello di protezione. Il primo di solito è realizzato con estrusi di alluminio ancorati alla struttura portante dell'edificio attraverso elementi di giunzione in acciaio. Esso ha il compito di sostenere sia il peso proprio dei componenti e della facciata sia di resistere alle sollecitazioni ad essa applicate, inoltre ha il compito di connettere il livello di protezione con gli elementi portanti dell'edificio.

Il livello di protezione si compone generalmente dai seguenti elementi:

- I tamponamenti, che possono essere traslucidi e/o opachi, svolgono il compito di separare l'ambiente indoor da quello outdoor, controllando i flussi di calore, aria, rumore, e consentendo la visuale esterna. Il tamponamento è completamente indipendente dagli elementi portanti dell'edificio e i carichi verticali e laterali incidono su ogni singolo piano; in alcuni casi possono essere aggiunti elementi speciali che permettono di sorreggere il carico della facciata a piani alternati.
- Le guarnizioni e i sigillanti, generalmente in silicone, devono resistere agli agenti atmosferici, ridurre le dispersioni termiche ed assorbire le deformazioni della facciata e le dilatazioni termiche dei componenti;
- Eventuali protezioni o elementi per il controllo e la regolazione della radiazione solare.

La parete ventilata

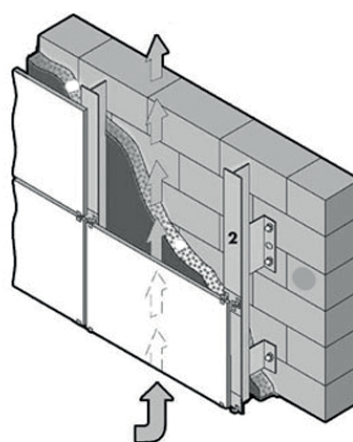


Figura 8. Schema di funzionamento della facciata ventilata

Rappresenta un particolare sistema di facciata leggera che consiste nell'installazione di pannelli prefabbricati, montati a secco e sorretti da una sotto-struttura ancorata alla struttura portante dell'edificio o al tamponamento e consente di ricavare un'intercapedine d'aria tra lo strato coibente e quello di finitura esterna.

Secondo la UNI 8369-2:1987 - Edilizia. Pareti perimetrali verticali. Classificazione e terminologia, punto 2.6, la parete ventilata è una tipologia di chiusura caratterizzata dalla presenza di uno strato di ventilazione e da efficienti prestazioni termo-igrometriche, basando il suo funzionamento sulla discontinuità fra il rivestimento più esterno e la parete interna.

Il principio di funzionamento delle pareti ventilate è quello di innescare un flusso d'aria generalmente ascensionale azionato naturalmente dal differenziale termico tra la temperatura interna all'intercapedine e quella dell'aria proveniente dall'esterno. Questo fenomeno fisico anche detto "effetto camino", è caratterizzato da una portata di aria, dimensionata tenendo conto delle condizioni ambientali esterne.

Così come definito nella norma UNI 11018:2003, nei sistemi tecnologici di facciata ventilata "l'intercapedine tra il rivestimento e la parete è progettata in modo tale che l'aria in essa presente possa fluire per effetto camino in modo naturale e/o in modo artificialmente controllato, a seconda delle necessità stagionali e/o giornaliere, al fine di migliorarne le prestazioni termo-energetiche complessive".

Infatti, durante il periodo estivo, la quantità della radiazione solare incidente sulla superficie esterna dell'involucro, viene riflessa in misura variabile in funzione del coefficiente di assorbimento ad essa riferito, mentre l'energia solare che attraversa lo strato di rivestimento superficiale genera un aumento di temperatura dell'aria presente nell'intercapedine, attivando moti convettivi che permettono all'aria surriscaldata presente nella camera di ventilazione, di essere espulsa, riducendo gli apporti termici dall'esterno e svolgendo anche la funzione di schermatura solare, assorbendo e riflettendo una grande quantità di radiazione

In inverno invece, poiché la temperatura della camera d'aria è pressoché analoga a quella dell'ambiente esterno, la ventilazione si riduce notevolmente, tuttavia l'aria presente oltre a fungere da ulteriore strato di isolamento, favorisce l'eliminazione del vapore acqueo proveniente dall'interno, riducendo sensibilmente il fenomeno della condensa.

Lo strato di finitura esterno, combinato con la ventilazione dell'intercapedine, preserva gli strati più interni dall'azione degli agenti atmosferici.

La parete ventilata, considerando la flessibilità e la facilità d'installazione del sistema, che avviene meccanicamente, garantisce una rapida esecuzione e la possibilità di smontaggio di ogni singolo elemento di rivestimento, nonché la pulizia in opera. Ciò premesso, il sistema può essere montato sia su edifici di nuova costruzione, che su quelli oggetto di riqualificazione o ristrutturazione, potenziando le prestazioni dell'involucro e soddisfacendo i requisiti termo-igrometrici richiesti dalle normative vigenti.

Partendo dall'interno, le pareti ventilate sono quindi formate dai seguenti strati funzionali:

- Strato portante, costituito da una parete di tipo collaborante con le strutture primarie o non collaborante di chiusura esterna, realizzata con muratura tradizionale, in cemento armato, in legno o stratificata a secco;
- Strato di isolamento continuo, applicato sulla parete perimetrale esterna mediante sistema di fissaggio meccanico, può essere di origine naturale o sintetica;
- Strato di ventilazione o camino d'aria, è l'intercapedine necessaria a determinare la discontinuità fisica tra il rivestimento esterno e il pacchetto di tamponamento interno, nel quale si innescano fenomeni di ventilazione o micro-ventilazione. Al suo interno, possono essere integrati sistemi impiantistici. Per fare in modo che la ventilazione sia efficiente, la distanza tra gli elementi del rivestimento e lo strato isolante, deve essere almeno di 20 mm e devono essere previste come minimo due aperture di ventilazione, una alla base dell'edificio ed l'altra in sommità, con sezioni trasversali di almeno 50 cm² per metro lineare.
- Sotto-struttura di sostegno, collega meccanicamente o con vincolo chimico-fisico, il rivestimento esterno allo strato portante dell'edificio, assorbendo le tolleranze di costruzione e integrando la posa dell'isolante. E' generalmente realizzata con

montanti e traversi, o con sistemi di fissaggi puntuali di legno, materiali metallici o plastici, tra loro connessi e indispensabili a realizzare il piano sul quale posare il rivestimento;

- Strato di rivestimento, composto da pannelli, lastre o elementi prefabbricati di vario genere, materiale, forma, colore e finitura superficiale, posati in opera attraverso elementi di fissaggio sulla sotto-struttura e caratterizzanti l'estetica dell'edificio.

Rivestimento anti-pioggia (Rain Screen Cladding)

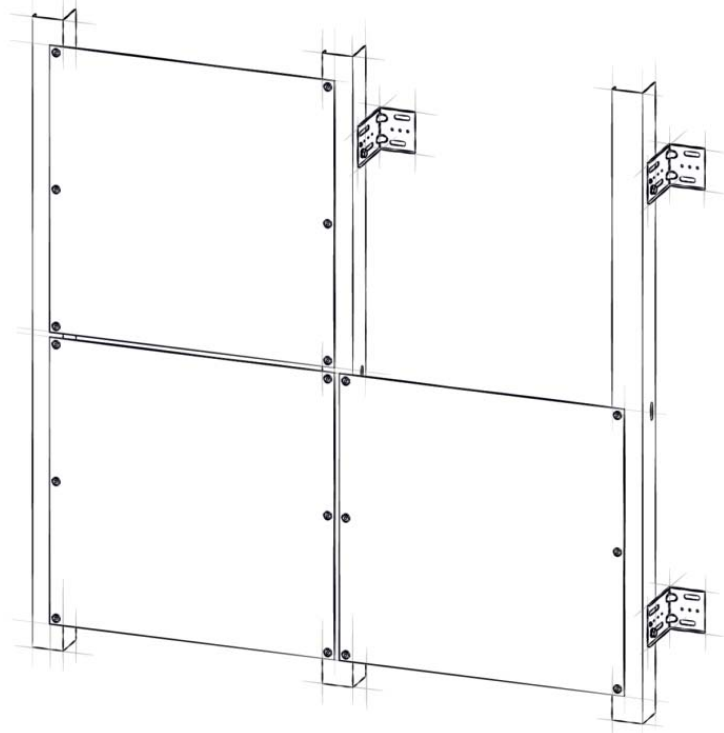


Figura 9. Esempio di rivestimento anti-pioggia, i pannelli sono collegati meccanicamente alla sotto-struttura, attraverso dei rivetti metallici

Il principio di funzionamento del rivestimento anti-pioggia, può essere definito come un sistema tecnologico, applicato alle facciate degli edifici, in grado di impedire la penetrazione dell'acqua piovana. Ciò che viene chiamato rivestimento anti-pioggia è lo strato di finitura esterna supportato da una intercapedine di aria progettata in modo tale da proteggere il paramento murario retrostante. Il CWCT (Centre for Window and Cladding Technology) definisce il sistema di rivestimento con schermo anti-pioggia come una parete costituita da una pelle esterna di pannelli a giunti aperti ed una parete di supporto isolata ermeticamente, separate da una cavità ventilata. Un pò di acqua può penetrare nella cavità, ma lo schermo esterno ha lo scopo di proteggere dalla pioggia diretta. La quantità di acqua penetrata nell'intercapedine viene portata via attraverso la ventilazione.

Viene fornita pertanto una protezione a due livelli: il filtro anti-pioggia, costituito da pannelli prefabbricati relativamente sottili, che impedisce la penetrazione di quantità significative di acqua e la parete interna che deve garantire la tenuta all'aria, l'isolamento termico e l'eventuale stabilità strutturale.

Il documento di riferimento fondamentale che stabilisce il principio della schermatura anti-pioggia è il Canadian Building Digest, Rain Penetration and its Control, che utilizza il termine "open rain screen": è dimostrato infatti che la penetrazione della pioggia attraverso la parete, può essere impedita inserendo una camera d'aria in cui la pressione dell'aria è sempre uguale a quella esterna. In sostanza lo strato esterno è quindi uno

“schermo di pioggia aperto” che impedisce alla parete interna di bagnarsi.

Il sistema è quindi formato dai seguenti strati funzionali:

- Strato portante di tamponamento esterno;
- Strato di ventilazione, con il compito di asciugare la quantità di acqua penetrata all'interno
- Sotto-struttura di sostegno,
- Strato di rivestimento a giunti aperti.

Facciata a doppia pelle

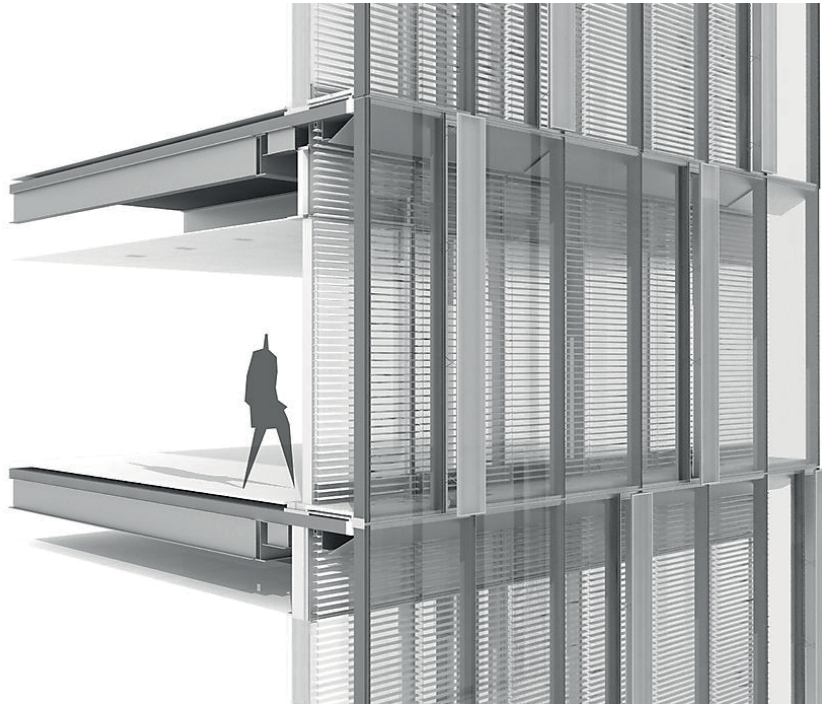


Figura 10. Esempio di facciata a doppia pelle

La facciata a doppia si basa sul principio della facciata ventilata. In questo caso però lo strato esterno di rivestimento deve essere necessariamente trasparente e l'intercapedine ha delle dimensioni rilevanti, tanto da poter essere considerata, come una vera e propria estensione dello spazio abitato, una sorta di anticamera che permette a ventilazione diretta con gli ambienti interni. Spesso la tecnologia utilizzata per la realizzazione “pelle” interna è il sistema a montanti e traversi, mentre lo strato esterno può essere realizzato con strutture a telaio, montanti e traversi, o fissaggio puntuale. Con la facciata a doppia pelle si è in grado di controllare i flussi di energia naturale riducendo i consumi che influiscono sulla climatizzazione invernale ed estiva, oltre a contribuire in maniera efficiente all'isolamento acustico dell'edificio.

L'intercapedine a seconda delle necessità stagionali, può avere la funzione di ventilazione, o di accumulo degli apporti solari. Nei mesi estivi la ventilazione consente di portare via l'aria calda e satura degli ambienti interni, mentre nei mesi invernali si verifica il fenomeno fisico dell'effetto serra attraverso il quale si utilizzano efficientemente gli apporti solari per il riscaldamento globale dell'edificio.

Un involucro costituito da un sistema di facciata a doppia pelle, consente un risparmio di energia considerevole per la climatizzazione degli ambienti interni.

Durante il periodo estivo, l'aria presente nell'intercapedine si surriscalda e attraverso delle bocchette poste in sommità alla facciata, viene espulsa, evitando il suo ingresso presso gli spazi interni.

In inverno, invece, la camera d'aria, funge da collettore solare, capace di raccogliere le radiazioni del sole, accumularne il calore, riducendo di fatto lo scambio termico interno-

esterno.

In alcuni casi, l'intercapedine viene progettata soltanto per garantire migliori prestazioni di isolamento termico e acustico, senza interferire con il ricambio di aria degli ambienti interni. In questo caso la ventilazione avviene attraverso apposite finestre costituite da un doppio telaio che si integrano nella facciata. Questo sistema tecnologico viene definito "a cuscinetto termico".

In relazione ai processi che danno vita ai moti ascensionali all'interno dell'intercapedine, si possono distinguere facciate a doppia pelle con ventilazione forzata o con ventilazione naturale.

Nelle facciate a ventilazione forzata, l'aria satura riscaldata, presente all'interno degli spazi interni, viene prelevata attraverso un impianto meccanico di aspirazione e condotta, attraverso l'intercapedine, verso una centrale di trattamento dell'aria. In questo caso la camera d'aria della doppia pelle, agisce come un vero e proprio canale d'aerazione e pertanto può essere considerato come un componente integrante dell'impianto di climatizzazione.

Per limitare le dispersioni di calore, lo strato esterno della doppia pelle viene realizzato con un vetro isolante le cui prestazioni saranno valutate, tenendo conto delle condizioni stagionali specifiche e della possibilità di prevedere un'intercapedine più o meno profonda, adattandosi anche a situazioni ambientali sfavorevoli.

Le facciate a doppia pelle a ventilazione naturale, come intuibile, basano il loro funzionamento sul principio fisico dell'effetto camino, innescato dal differenziale di pressione dell'aria all'interno dell'intercapedine che diventa progressivamente sempre più calda con l'aumentare dell'altezza. In questo modo l'aria calda viene espulsa in alto, mentre l'aria fredda di ricambio viene aspirata dal basso.

In questo caso si possono catalogare le facciate a doppia pelle in quattro versioni differenti:

- Facciata a canale unico, costituita da un intercapedine continua, priva di interruzioni, sia in senso orizzontale, che in senso verticale. Questo permette una ottima flessibilità costruttiva e la possibilità di avere la facciata totalmente trasparente. I limiti di questo sistema risiedono nella difficoltà di gestire correttamente la portata dei flussi d'aria nell'intercapedine, con il rischio che l'aria, espulsa ai piani più bassi potrebbe entrare nuovamente ai livelli più alti.
- Facciata a corridoi. In questo caso l'intercapedine viene suddivisa, orizzontalmente, in piani posti in corrispondenza dei diversi solai interpiano, formando dei veri e propri "corridoi" percorribili. I flussi di aria vengono gestiti singolarmente in ciascun corridoio, tutti dotati di una bocchetta di immissione di aria fredda (in basso) e di una bocchetta di estrazione di aria calda (in alto). Per evitare che le correnti di aria in ingresso, si mescolino con quelle in uscita, è opportuno che le bocchette sia sfalsate lateralmente e poste, l'una dall'altra, ad una distanza tale da non interferire tra loro. Rispetto alla facciata a canale unico, questo sistema è più efficiente poiché si riesce ad evitare che il calore ristagni nella parte superiore della facciata, ma allo stesso tempo richiede un impegno costruttivo e di costi superiore.
- Facciata a cella, costituita da piani orizzontali e piani verticali, che suddividono lo spazio dell'intercapedine in tante unità indipendenti e non comunicanti tra loro, dotate di bocche per l'ingresso e la fuoriuscita dell'aria. Questo sistema di facciata necessita di una progettazione più articolata, ed in generale è condizionata da una rigidità compositivo-formale dettata dallo schema reticolare di base. Generalmente, la componente di trasparenza complessiva si riduce rispetto ai precedenti sistemi.
- Facciata a canali. L'intercapedine si costituisce da canali verticali chiusi che si alternano a cellule equipaggiate di bocchette di aerazione per l'immissione di aria dall'esterno e per la ventilazione degli ambienti interni. I condotti chiusi sono dotati in sommità, di fori per l'espulsione dell'aria satura, prelevata per via dell'effetto camino, dalle cellule adiacenti e aspirata grazie alle bocchette poste in corrispondenza delle partizioni verticali. Questo sistema combina la tipologia di facciata ad intercapedine continua, con la facciata a celle.

Indipendentemente dal tipo di facciata adottata, le dimensioni dell'intercapedine variano

da 40 cm a 100 cm. Dopo gli 80 cm le fasi di manutenzione della facciata avvengono direttamente all'interno dell'intercapedine munita di passerelle metalliche grigliate che non interrompono il moto di ventilazione.

Maggiori sono le dimensioni della camera d'aria e più alte sono le possibilità di poter integrare all'interno dell'intercapedine sistemi di schermatura della radiazione solare, contribuendo a ridurre i fenomeni di surriscaldamento estivo e contribuendo alla regolazione dei flussi luminosi.

Un edificio dotato di un involucro a doppia pelle, può portare a ridurre i consumi energetici annuali del 20% rispetto ad un edificio con facciata tradizionale.

Involucro integrato per la produzione di energia

La necessità di ridurre le emissioni di CO₂, ha guidato, negli ultimi 30 anni, la ricerca scientifica e le politiche nazionali ad investire nello sviluppo di energie alternative pulite e nello specifico, si è puntato lo sguardo verso le tecnologie fotovoltaiche e per la produzione di acqua calda sanitaria, riconosciute come fondamentali, per via delle loro possibili applicazioni in architettura e in particolar modo nel settore degli involucri edilizi.

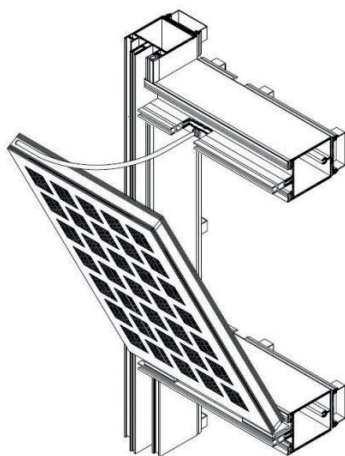


Figura 11 . Schema dei facciata fotovoltaica (Schüco FW50)

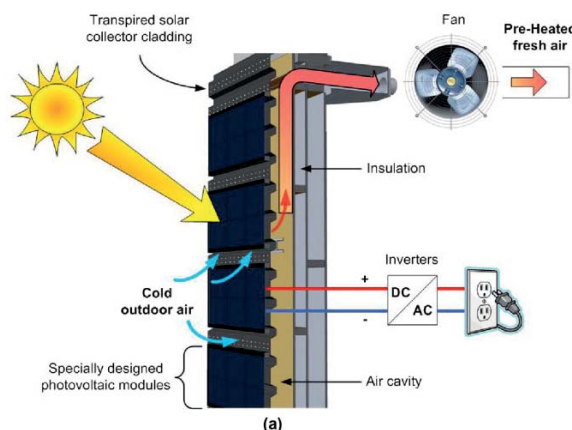


Figura12. Schema del funzionamento di una facciata fotovoltaica

La radiazione solare incidente su una superficie fotovoltaica, viene trasformata in energia elettrica. I moduli solari, applicati in copertura o integrati nelle facciate, sono costituiti da pannelli di vetro camera stratificato, che contengono al loro interno, celle fotovoltaiche in silicio. Il rendimento di un pannello fotovoltaico è direttamente proporzionale con le caratteristiche chimiche del silicio, infatti, tanto maggiore è la purezza del minerale, tanto più alta è l'efficienza dei moduli solari.

Anche la temperatura superficiale dei moduli è un fattore determinante per la produttività di un sistema fotovoltaico, in questo caso, minore è la temperatura superficiale e più alto sarà il rendimento dell'impianto. Per questo motivo, l'applicazione di moduli solari in facciata è spesso accompagnata dall'installazione di un sistema di retro-ventilazione.

Per ottenere un adeguato irraggiamento delle facciate fotovoltaiche, è consigliato avere le superfici captanti orientate nella direzione di massima esposizione e soprattutto che non ci siano ostacoli, come la presenza di vegetazione o di altri edifici, causa di ombreggiamento.

L'energia elettrica prodotta, può essere impiegata per alimentare i diversi dispositivi impiantistici degli edifici, può essere utilizzata per integrare la richiesta di energia elettrica nei momenti di picco, può essere conservata, mediante stoccaggio in apposite batterie o immessa nella rete di distribuzione.

L'integrazione di moduli fotovoltaici in facciata, non garantisce la completa copertura di tutto il fabbisogno di energia elettrica di un edificio. Per ottimizzare al massimo la produzione di energia fotovoltaica, bisogna tener conto sia dei fattori che riguardano la configurazione stessa dell'impianto solare, (orientamento, inclinazione, rendimento celle), sia gli aspetti inerenti la destinazione d'uso dell'edificio.

I moduli fotovoltaici possono essere applicati anche in sistemi di chiusura trasparente a singolo strato o doppia pelle, su superfici orizzontali, verticali o inclinate o possono essere integrati direttamente su sistemi di schermature solari tipo frangisole, orientabili o fissi.

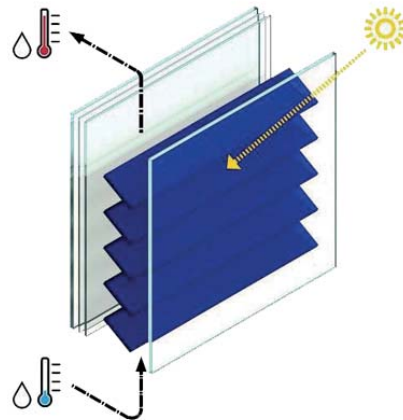


Figura 13 . Sistema di produzione solare termico a strisce

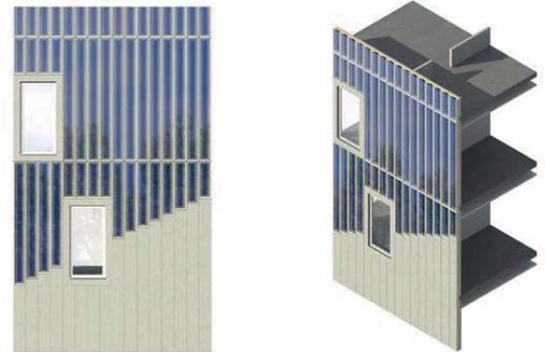


Figura 14 . Sistema di produzione solare termico a veneziane solari

Anche per quanto riguarda la produzione di energia solare termica, i collettori solari possono essere integrati su sistemi di schermatura solari tipo tende veneziane o frangisole. La superficie superiore della secca ombreggiante funge da assorbitore della radiazione solare incidente. Un scambiatore termico permette di trasferire il calore dagli elementi orizzontali al tubo di raccordo verticale, consentendo allo stesso tempo di sollevare e inclinare le lamelle come una tradizionale veneziana. Il sistema può essere inserito anche all'interno di un'intercapedine di una facciata a doppia pelle, ottenendo risultati prestazionali migliori. La produzione di energia termica in facciata può avvenire attraverso l'utilizzo di strisce solari termiche che permettono una maggiore flessibilità nella progettazione architettonica, possono essere usate singolarmente o affiancate sia orizzontalmente che verticalmente e con la possibilità di essere applicate con lunghezze variabili.

Involucro adattivo

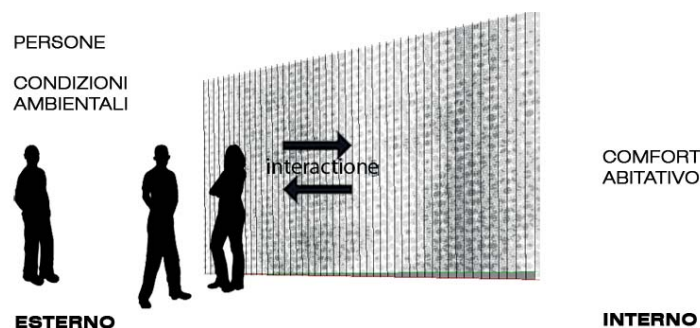


Figura 15 . Sistema di involucro adattivo

L'involucro adattivo è un particolare sistema di chiusura di un edificio che interagisce con l'ambiente outdoor, cambiando le proprie caratteristiche al variare delle condizioni climatiche esterne. L'interazione può avvenire mediante l'azione diretta dell'utente o, nei sistemi più avanzati, attraverso dispositivi di controllo automatico che consentono di regolare il livello di efficienza della facciata, modificando i parametri termo-igrometrici e ambientali del microclima interno.

In alcune occasioni, la tecnologia interattiva viene utilizzata anche per scopi multimediali, tramite la proiezione di immagini fisse o dinamiche su pannellature costituite da materiali traslucidi accoppiati tra loro, le cui proprietà consentono alle illustrazioni pubblicitarie di essere visualizzate all'esterno.

Per concludere, in riferimento anche alle definizioni riprese nel testo "Façades: Principles of Construction di Knaack U. et al., Pubblicato nel 2007 in Germania, esistono sistemi e tecnologie differenti con le quali è possibile costruire un involucro edilizio. Alcuni sono portanti, come le pareti in muratura, altri sono invece svincolati da compiti di sostegno strutturale, come le facciate in Curtain wall.

Questi ultimi sono dotati di una struttura indipendente e fungono soltanto da elemento di protezione tra interno ed esterno.

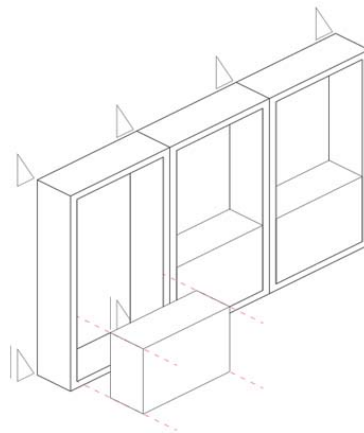
Inoltre, esiste anche una distinzione sui sistemi costruiti interamente in cantiere o attraverso moduli prefabbricati e assemblati in loco. Lo sviluppo di quest'ultimo sistema ha favorito il risparmio delle risorse in termini di manodopera ed attrezzature, garantendo una rapida ed economica installazione degli elementi che compongono la facciata.

Si può fare un'ulteriore distinzione tra involucri semplici composti da strati funzionali che nel loro insieme costituiscono una barriera tra ambienti interni ed esterni offrendo riparo per gli utenti, ed altri più complessi che integrano componenti meccanici ed impiantistici.

Facciata Curtain Wall



Federai Center. Chicago
Ludwig Mies van der Rohe.
1964

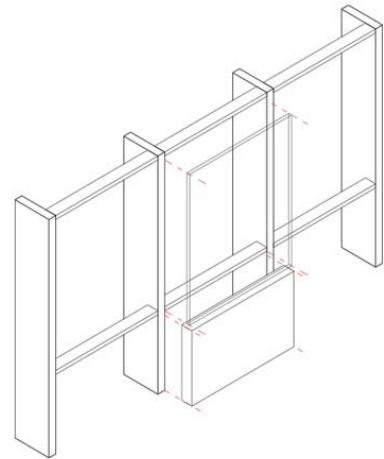


1. Sospeso dall'alto con l'aiuto di tiranti;
2. Grande grado di indipendenza dalla struttura principale;
3. Estrema flessibilità, la facciata può essere suddivisa quasi a piacimento;
4. I rivestimenti o i vetri soddisfano i vari requisiti estetici o funzionali;
5. I carichi verticali e laterali sono generalmente riportati al piano terra;
6. Le campate più lunghe possono essere colmate aggiungendo speciali elementi portanti.

Facciata a montanti e traversi



TU Delft Library. Delft
Mecanoo
1998

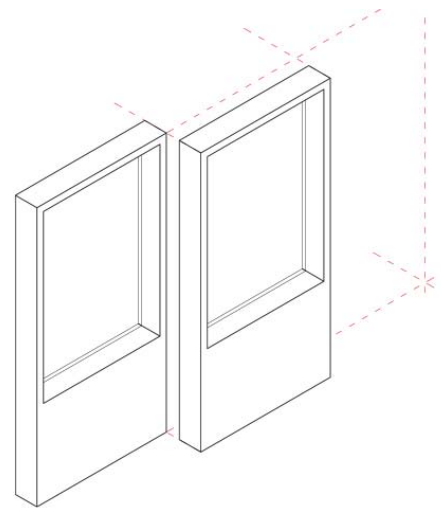


1. Montanti collegati a traversi orizzontali
2. Le funzioni sono inserite negli spazi tra questi elementi;
3. I montanti servono per il trasferimento dei carichi e il supporto del rivestimento e per altre funzioni.

Sistema di facciata unitario



Westhafen Haus. Frankfurt
Schneider + Schumacher.
2005



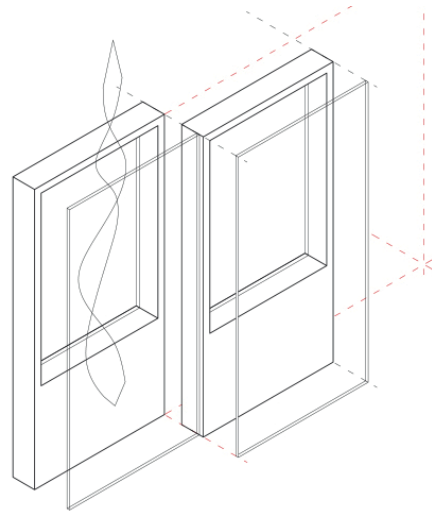
1. Prefabbricazione in officina di elementi di facciata;
2. Montato in loco;
3. Qualità di produzione garantita, assemblaggio rapido e bassa richiesta di manodopera specializzata in cantiere;
4. Limitato utilizzo, prevalentemente per ad applicazioni speciali come grattacieli;

5. È richiesto un livello elevato di investimenti logistici.

Doppia facciata



Triangle Building. Cologne
Gatermann + Schossig
2006

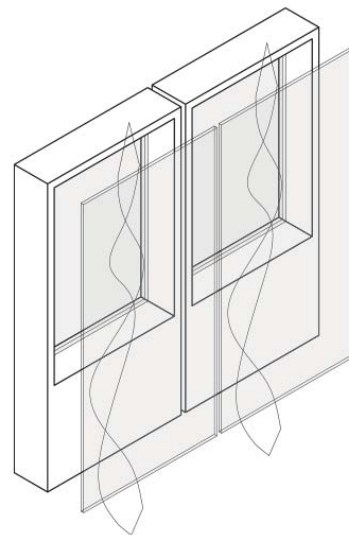


1. Un ulteriore strato di vetro all'esterno della facciata per fornire ventilazione o ulteriore isolamento termico e acustico;
2. Può essere realizzato in vari modi, a seconda delle funzioni desiderate e dei requisiti della facciata.

Facciata a doppia pelle



Torre Agbar, Barcelona
Jean Nouvel
2004



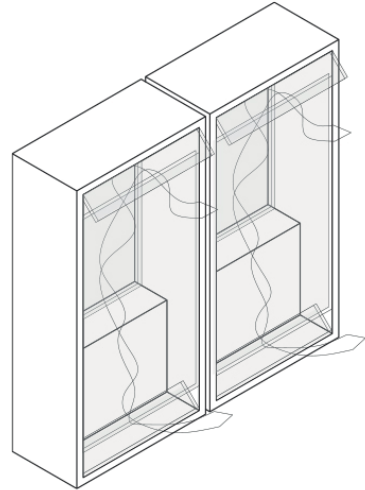
1. Un secondo strato di vetro su tutta la superficie esterna dell'edificio;
2. Semplicità tecnica e strutturale;

3. Non è previsto un gran numero di parti mobili;
4. Lo strato esterno di vetro è semplicemente montato sulla struttura della facciata interna;
5. Facilità di installazione;
6. I sistemi di ventilazione devono essere previsti solo nelle zone superiore e inferiore della facciata;
7. Possibilità di controllo limitato dell'ambiente interno - rischio di surriscaldamento.

Facciata Box-window



ARAG Tower, Dusseldorf
Foster + Partners & RKW
2001

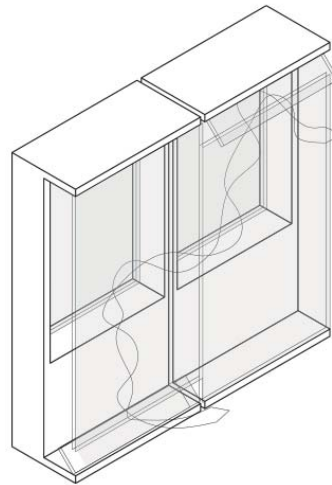


1. Elementi di facciata per ogni piano, con bocchette di ventilazione nella parte superiore e inferiore;
2. Le bocchette di ventilazione possono essere controllate dai singoli utenti;
3. Libertà degli utenti di controllare il proprio ambiente interno;
4. La libertà data a un occupante può avere un effetto negativo sulle condizioni sperimentate da un altro utente.

Facciata a corridoio



Stadttor, Dusseldorf Petzinka
Pink und Partner
1998

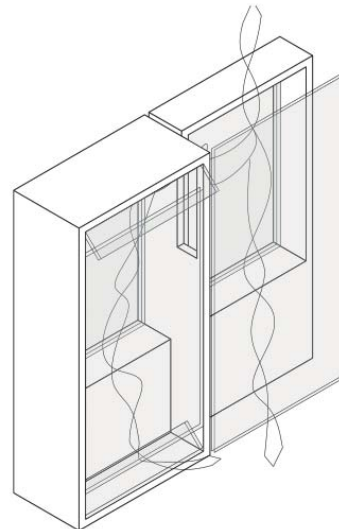


1. Collegamento degli elementi affiancati che costituiscono una doppia facciata;
2. Ventilazione sfalsata dello spazio tra le due pelli;
3. Il flusso orizzontale dell'aria è impedito dai deflettori verticali nello spazio tra le due pelli.

Facciata Shaft-box



Photonics Centre. Berlin
Sauerbruch Hutton Architects
1998



1. Versione più efficace della doppia facciata;
2. Uno impegno di ingegneria costruttiva e di controllo più grande;
3. L'aria delle finestre a cassonetto viene scaricata in un pozzo montato sulla

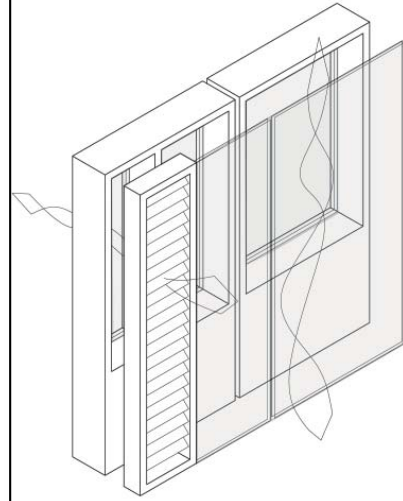
facciata che si estende su più piani;

4. Un effetto camino assicura il movimento verticale dell'aria nell'intercapedine.

Facciata alternata



Debitel. Stuttgart
RKW Architektur + Stadtebau.
2002

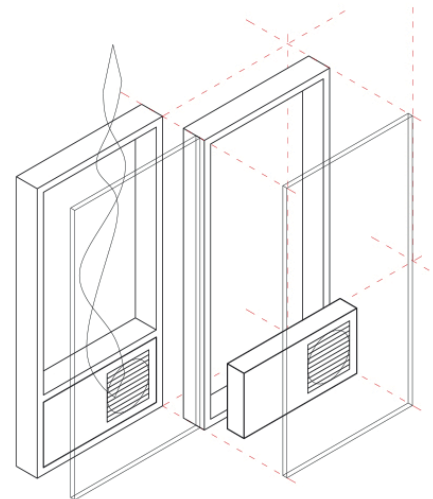


1. Costruzioni di facciate a singola pelle convertite puntualmente in doppie facciate con l'aggiunta di una seconda pelle;
2. Vantaggi dell'effetto "buffering" della doppia facciata.

Facciata integrata



Post Tower.
Bonn Helmut Jahn
2003



1. Integrazione di funzioni diverse dalla ventilazione come il controllo ambientale attivo o l'aggiunta di sistemi per l'illuminazione;
2. Generalmente chiamata "facciata modulare" o "facciata ibrida"

3.3 Materiali per un involucro adattivo

L'ambiente è in continua evoluzione e produce nuove sfide da affrontare. Luce (solare radiazione), temperatura, umidità relativa, acqua piovana, vento (movimento dell'aria), protezione dai rumori e riduzione dell'anidride carbonica per il miglioramento della qualità dell'aria, sono le questioni ambientali di base che interessano un edificio. Questi problemi influiscono in modo significativo sulle richieste di comfort degli occupanti e sulle prestazioni dell'edificio.

Le grandi potenzialità delle nuove tecnologie di materiali e i sistemi di materiali adattivi possono cambiare radicalmente il processo di progettazione e costruzione, che negli ultimi anni hanno trovato sempre una maggiore applicazione ed integrazione nei sistemi tecnologici dell'edificio. Diventa chiaro perché è importante prendere questi materiali in considerazione già nelle prime fasi del processo di progettazione e non solo nella semplice applicazione degli stessi, ma è importante valutarne le possibili alterazioni di essi nel tempo e al variare delle condizioni al contorno.

L'esigenza di progettare gli ambienti architettonici in modo confortevole, rispondere alle esigenze degli utenti, ha permesso la diffusione di strategie di progettazione adattiva per pensare architetture capaci di rispondere in modo dinamico e adattivo alle condizioni alle condizioni ambientali.

È importante, quindi comprendere il ruolo che assume il "sistema materiale intelligente" all'interno del processo di adattabilità sugli edifici e gli effetti che essi hanno nel

creare ambienti costruiti migliori, che spingono ulteriormente questo processo verso il raggiungimento dello stato di "adattabilità".

Nel ambito dei materiali adattivi, vengono utilizzati una varietà di termini fare riferimento a materiali o persino a sistemi che coinvolgono l'applicazione di materiali che sono considerati intelligenti. Ne sono esempi i sistemi adattivi, materiali reattivi, materiali informatici, sistemi intelligenti ...etc.

Con il recente sviluppo nella tecnologia dei materiali, quelli adattivi vengono recentemente definiti come:

Materiale con sensore/i incorporato/i intrinseco/i, attuatore/i e meccanismi di controllo in base ai quali è in grado di rilevare uno stimolo, rispondendo ad esso in modo e misura predeterminati, in un breve tempo appropriato. Esso ripristina il suo stato originale non appena lo stimolo viene rimosso.

Sistema di classificazione adattivo dei materiali

Grazie ai nuovi sviluppi nel campo della tecnologia dei materiali, non è stato più possibile classificare i materiali secondo i tradizionali sistemi, pertanto, viene introdotto un nuovo sistema di classificazione dei materiali intelligenti, che ne hanno permesso una divisione in base al loro funzionamento:

- 1 - Materiale che modificano le proprietà
- 2 - Materiali che scambiano energia

La classificazione adattiva dei materiali è multi-strato; uno strato riflette il comportamento fisico del materiale, cosa fa, il suo comportamento, e l'altro riflette il comportamento fenomenologico, quindi l'effetto del comportamento fisico. I materiali adattivi hanno una serie di caratteristiche che li distinguono dai materiali tradizionali noti. Sia come un singolo materiale sia se considerato un sistema, piccolo come una molecola o grande come un involucro edilizio.

I materiali adattivi esprimeranno le seguenti caratteristiche:

- Immediatezza _ I materiali intelligenti rispondono agli stimoli in tempo reale-tempo.
- Transitorietà _ I materiali intelligenti rispondono a più di uno stimolo proveniente dall'ambientale.
- Auto-attuazione _ ci indica cosa controlla il materiale intelligente per rispondere agli
- Selettiva _ La risposta dei materiali intelligenti è distinta e può essere prevedibile.
- Diretta _ La risposta dei materiali intelligenti è locale all'evento di "attivazione"

Tipo 1: tipi di materiale per cambio di proprietà

Questi materiali sono sottoposti a cambiamenti di una o più delle loro proprietà: chimica, meccanica, elettrica, magnetica o termica - in diretta risposta a un cambiamento negli stimoli esterni associati all'ambiente che circonda il materiale. Questi cambiamenti sono diretti e reversibili, quindi non è necessario un controllo esterno del sistema per attivare questi cambiamenti.

Un esempio è riconducibile al materiale fotocromatico, esso infatti, ha la capacità di cambiare colore in risposta al variare della quantità di radiazione ultravioletta incidente sulla sua superficie.

I materiali più comuni per il cambio di proprietà sono termocromico, magnetoreologico, termotropico, materiali a memoria di forma.

Tipo 2 - Tipi di materiali per lo scambio di energia

Questo tipo include materiali che hanno la capacità di trasformare l'energia da una forma a un'energia di uscita di altra forma. Può compiere questo lavoro in modo diretto e reversibile.

Un esempio è riconducibile ad un materiale elettro-restrittivo, che trasforma l'energia elettrica in energia elastica (meccanica) che a sua volta si attua attraverso un cambiamento

fisico di forma.

Può essere ripristinato facilmente nella sua forma originale nella stessa maniera. Alcuni dei più comuni tipi di materiali per lo scambio di energia sono materiali che emettono luce, piezoelettrici, termoelettrici, fotovoltaici, piroelettrici, fotoluminescenti e altri. Con i materiali di tipo 2, tuttavia, dovremmo esserne consapevoli che l'uso del termine "materiale" può essere leggermente fuorviante, infatti molti "materiali" di questa classe sono in realtà assemblati da molti altri materiali di base per adempiere a un tipo particolare di funzione. Un termoelettrico, per esempio, in realtà è costituito da più strati di diversi materiali. L'assemblaggio risultante è forse meglio descritto come un semplice dispositivo. A causa del modo in cui sono concettualmente pensati e usati, tutti questi dispositivi, vengono associati al termine "materiale".

Nel loro ruolo di sensori, un materiale adattivo risponde a un cambiamento nel suo ambiente generando una risposta percepibile; per questo motivo un materiale termocromico potrebbe essere utilizzato direttamente come dispositivo per rilevare una variazione della temperatura di un ambiente grazie alla sua capacità di rispondere al calore. Molti sensori e attuatori di uso più comune si basano sull'uso di materiali intelligenti.

Classificazione di materiali, componenti ed elementi adattivi

Nella tabella di seguito, viene presentata una classificazione di materiali, componenti ed elementi adattivi allo scopo di presentare le loro caratteristiche e acquisire conoscenza su di essi. L'obiettivo finale è quello di mostrare le nuove tecnologie adattive indipendentemente da quanto siano sviluppate o ampiamente utilizzate.

Pertanto, gli esempi mostrati nella Tabella 1 variano dalla finestra tradizionale, ai nanomateriali come il grafene, che sono ancora in fase di test. Per raggiungere questo obiettivo, ogni esempio presentato viene analizzato in base a parametri specifici che verranno spiegati in questa sezione e basati su approcci di classificazione esistenti. Molti di questi parametri sono comuni a quelli utilizzati per la classificazione di edifici, prodotti e progetti di ricerca adattivi, che verrà presentato nella sezione successiva.

Di seguito elencati i parametri definiscono la maggior parte delle variabili di progettazione:

Tipo di controllo: questo criterio dimostra come si ottiene l'adattamento e quindi quale tipo e quanto controllo è possibile avere sul materiale. L'adattamento può essere realizzato manualmente, meccanicamente o in nessuno dei due modi precedenti. Questo significa che è un materiale intelligente che risponde da solo ed è quindi è un materiale che si autoregola.

Agente di adattamento: i meccanismi adattivi dovrebbero rispondere a un impulso o stimolo, che può provenire da un essere umano, dall'ambiente esterno o interno o un oggetto (Basarir e Altun. 2017). L'ambiente esterno e interno può essere ulteriormente suddiviso in parametri più specifici, come mostrato nella Tabella 1.

Risposta all'agente di adattamento: una facciata risponde allo stimolo di adattamento in modo statico o dinamico. Il modo statico può essere ad esempio un cambiamento nella forma di un materiale [cambio di proprietà, materiali che scambiano energia] mentre il modo dinamico è riferito a facciate che coinvolgono il movimento. (Basarir e Altun. 2017). Scopo: questo criterio si riferisce al cambiamento che si verifica nelle caratteristiche di un componente / elemento materiale dopo che si è verificato l'impulso dell'adattamento. (Loonen et al .2015)

Tempo di risposta: l'adattabilità si realizza attraverso il tempo e in diverse scale temporali. Il tempo di risposta fino al verificarsi dell'adattamento può durare da secondi, minuti, ore, giorni fino a stagioni. Ciò può essere giustificato se traduciamo il movimento in natura.

Rapide variazioni di vento si verificano in pochi secondi, le nuvole si muovono in pochi minuti, il sole richiede ore per muoversi attraverso il cielo e le condizioni meteorologiche

cambiano in base alle stagioni.

Controllo dell'adattabilità: esistono due tipi con cui una facciata adattiva risponde alle mutevoli condizioni: il controllo ad anello chiuso e il controllo ad anello aperto. La loro distinzione può essere tracciata dal fatto che un sistema a circuito chiuso è "automatizzato", mentre un sistema a circuito aperto è "automatico". (Loonen, 2010)

Nel sistema a circuito chiuso, ci sono tre elementi di base coinvolti, come mostrato nella Figura 4 [a]: sensori, processori e attuatori. C'è anche un possibile quarto componente, il controller, che non è sempre presente. Un sensore può rilevare le condizioni ambientali, il processore raccoglie questi dati da tutti i sensori e l'attuatore traduce questi dati in un'azione meccanica, chimica o fisica. I sistemi a circuito chiuso implicano sempre l'uso dell'azione di controllo del feedback, che è ciò che lo distingue da un sistema a circuito aperto. Pertanto, un sistema a circuito chiuso è progettato per raggiungere e mantenere automaticamente la condizione di uscita desiderata confrontandola con la condizione effettiva. (Loonen, 2010).

D'altro canto, un sistema aperto, come nel caso della facciata adattiva, possiede la caratteristica intrinseca che il sottosistema è autoregolante.

Il comportamento adattativo è causato automaticamente da stimoli ambientali e non coinvolge sensori e quindi non utilizza energia esterna per il suo funzionamento.

Per questo motivo, si hanno un numero limitato di componenti, e quindi anche una minore complessità, che risulta essere senza dubbio un vantaggio. Tuttavia, non è possibile alcun intervento dopo che il sistema è stato realizzato, poiché lavora in autocontrollo. (Loonen, 2010)

Grado di adattabilità: il cambiamento adattivo avviene gradualmente, direttamente o in modalità ibrida ossia una combinazione delle due (Basarir e Altun, 2017). L'apertura di una finestra provoca un'alterazione diretta nell'ambiente interno, mentre l'uso del PCM porta a un adattamento graduale poiché ci vogliono ore affinché il PCM cambi il suo stato da solido a liquido e da liquido a solido. Un sistema ibrido, può essere ad esempio considerato il pannello fotovoltaico, che inizia ad assorbire immediatamente la luce solare quando la radiazione solare raggiunge la sua superficie, ma questa procedura può durare per tutto il tempo che il sole colpisce la superficie stessa, il che la rende una procedura graduale allo stesso tempo.

Parametri di classificazione												
Prodotto				Bimetallo	Elettrocromico	Fluorescente	Idrogel	Cristallo liquido	Meccanocromico	PCM		
Tipo di controllo	Manuale											
	Meccanico											
	Materiale intelligente			x	x	x	x	x	x	x		
Agente di adattamento	Utente											
	Ambiente	Ambiente esterno	Radiazione solare	x	x	x						
			Temperatura		x						x	
			Umidità				x					
			Vento						x			
			Precipitazione									
			Rumore									
	Ambiente interno	Ambiente interno	Temperatura								x	
			Umidità				x					
			Luce		x							
			Ricambio d'aria									
			Velocità dell'aria									
			Livello sonoro									
Oggetti							x					
Risposta all'agente di adattamento	Statica				x	x		x	x	x		
	Dinamica			x			x					
Obiettivo	Comfort Termico			x	x		x	x		x		
	Qualità dell'aria interna (IAQ)			x								
	Prestazioni visive e illuminazione				x	x		x	x			
	Prestazioni acustiche											
	Prestazioni energetiche			x	x	x	x				x	
Tempo di risposta	Secondi				x	x		x				
	Minuti			x			x		x	x		
	Ore										x	
	Giorni											
	Stagioni											
Controllo adattabilità	Ciclo chiuso				x			x				
	Ciclo aperto			x		x	x		x	x		
Grado di adattabilità	On-off				x			x				
	Graduale			x		x	x		x	x		
	Ibrido											

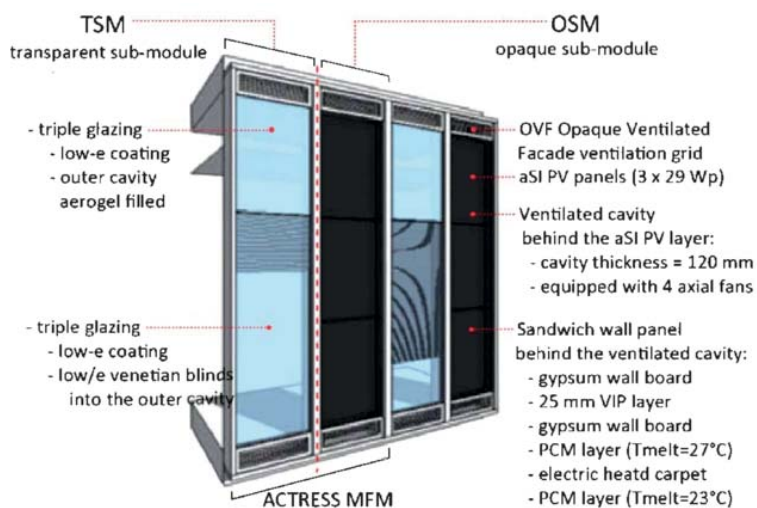
Tabella 1. Classificazione di materiali, componenti ed elementi

Materiali												Componenti		Elementi				
Fotocatalitici (TiO2)	Fotoelettrici (grafene)	Fotocromico	Fosforescente	Piezometrico	Memoria di forma	Gel di silice	Particelle sospese	Termocromico	Termoluminescente	Termotropico	ETFE stratificato	Intercapedine d'aria	Fotovoltaico	Vegetazione	Finestra	Tende	Frangisole	Sistemi di regolazione
												x			x	x	x	x
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x				
x				x												x	x	x
	x	x	x						x			x	x	x	x	x	x	
					x			x		x				x				
				x										x	x			
											x			x				
															x		x	
															x			
																	x	
																		x
x	x	x	x	x		x	x	x		x	x	x	x	x				x
					x				x						x	x	x	
		x			x			x		x		x		x	x		x	
x						x						x		x	x			x
	x	x	x	x	x								x			x	x	
	x	x		x	x	x	x	x	x	x			x		x	x	x	x
x			x	x	x							x						
														x				
														x				
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		x					x								x	x	x	x
x			x	x	x	x		x	x	x	x	x		x				
	x												x					

Esempi applicativi di materiali adattivi

Di seguito, alcuni dei progetti di interesse saranno analizzati in modo più approfondito poiché direttamente collegati all'obiettivo principale di questa tesi. Verranno approfonditi materiali e sistemi adattivi utilizzati, in progetti di rilievo ed interesse che hanno condotto alle scelte necessarie per l'ideazione del progetto finale. Subito dopo, questi progetti, insieme ad alcuni altri ritenuti rilevanti, sono stati raccolti in una tabella riepilogativa per evidenziarne i vantaggi e gli svantaggi.

ACTRESS



ACTRESS (ACTIVE RESponsive and Solar) è un modulo multifunzionale per facciate (MFM) sviluppato dal gruppo TEBE del Politecnico di Torino.

Incorpora diverse tecnologie con l'obiettivo di migliorare l'efficienza energetica dell'edificio e convertire l'energia da fonti energetiche rinnovabili (FER). Ha un "atteggiamento autonomo", il che significa che non richiede connessioni o comunque estremamente limitate, con altri elementi. È composto da un sotto-modulo opaco (OSM) e un sotto-modulo trasparente (TSM) costituito da vari strati di materiali diversi. Il sotto-modulo opaco può essere utilizzato come cuscinetto termico o come facciata ventilata sia in estate che in inverno, il sotto-modulo trasparente è costituito da due diversi sistemi di triplo vetro.

Un modulo ACTRESS è stato testato a Torino per quasi due anni e le conclusioni hanno dimostrato che è possibile risparmiare più del 50% dell'energia primaria totale. Inoltre, l'isolamento termico ottenuto è stato eccellente e l'attivazione passiva del PCM ha mostrato un'inerzia termica soddisfacente. Tuttavia, le prestazioni dell'LHTES (accumulo di energia termica a base di calore latente) accoppiato al sistema fotovoltaico sono state parzialmente deludenti perché non soddisfano le elevate aspettative di riduzione delle perdite di calore. Nonostante ciò, i guadagni di calore sono stati sempre più alti rispetto alle perdite di calore. Le vetrate con gas aerogel hanno avuto prestazioni molto buone, ciononostante, si è concluso che non sono adatte per un MFM, poiché non hanno mostrato alcuna capacità di adattamento, sollevando, tra l'altro, alcune preoccupazioni sul surriscaldamento durante il periodo estivo.

ADAPTIWALL

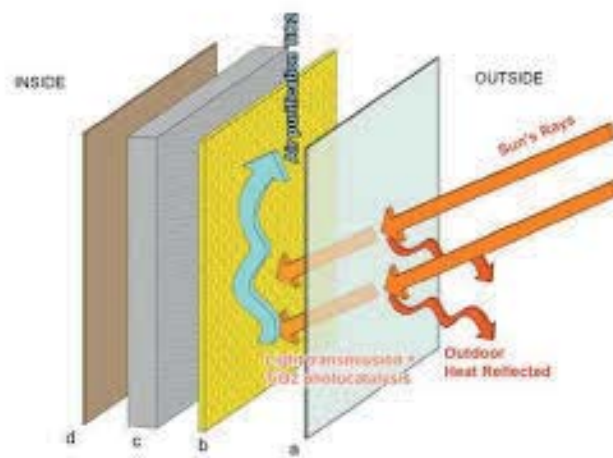


Il progetto ADAPTIWALL (pannello leggero multifunzionale basato su isolamento Adattivo e nanomateriali per edifici a basso consumo energetico) è un pannello prefabbricato leggero multifunzionale che si adatta al clima, ideale per la costruzione di facciate economiche, rapide ed efficienti dal punto di vista energetico, ideato da TNO Delft & Partners.

Questa facciata è in grado di ridurre la domanda di riscaldamento e raffreddamento del 50-80% rispetto alle tipiche soluzioni altamente isolanti ed è anche in grado di eliminare quasi completamente gli impianti ausiliari di recupero di calore e ventilazione. Oltre al risparmio energetico, ADAPTIWALL offre un'elevata flessibilità architettonica, poiché adattabile in diverse tipologie di edifici e regioni climatiche differenti.

L'elemento centrale del pannello è uno strato di calcestruzzo leggero, portante, con nano-additivi e impregnato di PCM, che viene utilizzato come tampone per immagazzinare calore e freddo. Inoltre, su entrambi i lati del tampone viene installato un isolamento adattivo costituito da materiali polimerici non tradizionali utili per controllare i flussi di calore. Inoltre, viene utilizzato uno scambiatore di calore totale con membrana nano-strutturata per fornire una ventilazione compatta e un sistema di recupero di energia che consente il controllo di temperatura, umidità. Il rivestimento e le finestre non sono considerati componenti chiave, tuttavia, per raccogliere energia vengono utilizzati un rivestimento in vetro e un collettore solare.

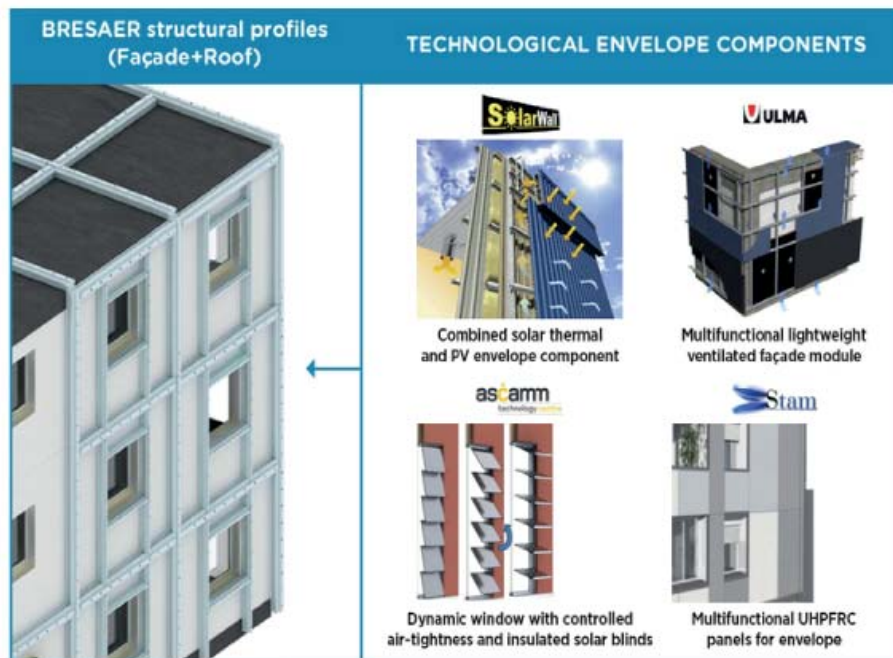
SELFIE



La facciata SELFIE (Smart and Efficient Layers for Innovative Envelopes) è un sistema di facciata continua unitaria che consente non solo una facile installazione in loco, ma anche la personalizzazione attraverso la possibilità di posizionare i componenti modulari con diverse configurazioni geometriche, diversi tipi di materiali e diversi colori. Inoltre, la scelta di utilizzare elementi modulari garantisce un'azione isolata di manutenzione, il che significa che in caso di riparazione le prestazioni globali della facciata non vengono influenzate.

La facciata SELFIE è composta da tre componenti modulari con dimensioni 0,90 x 1,40m, due opachi e uno trasparente con diversi strati di materiale. Tali strati sono PCM, speciali vetri accoppiati innovativi con trattamento IR interno, ceramica fotoattivabile visibile e/o metalli e/o vernici speciali dedicate al trattamento dell'aria. Tutti e tre i componenti hanno sensori e apparecchiature integrati per la gestione dei dati, al fine di garantire un controllo intelligente dei flussi di energia all'interno dell'involucro dell'edificio e la capacità di modificare le prestazioni energetiche in base a condizioni climatiche esterne. Tuttavia, il sistema offre agli utenti anche la possibilità di gestire la facciata autonomamente anche in assenza di un sistema di controllo automatizzato.

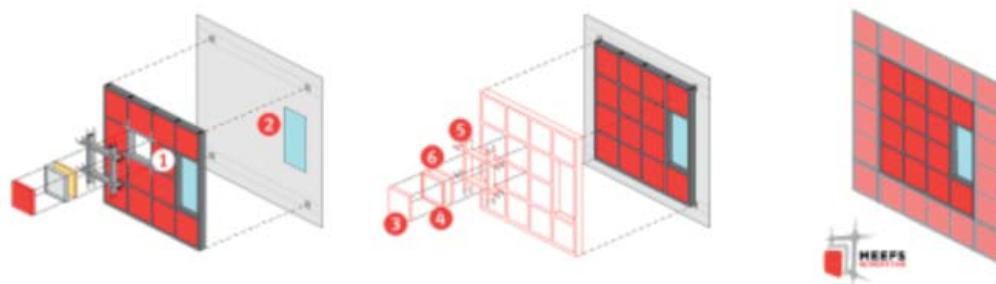
BRESAER



Il progetto BRESAER (BREakthrough Solutions for Adaptable Envelopes in building Refurbishment) (Figura 30) è un innovativo sistema di involucro ideato da Acciona Infraestructuras & Partners, che combina componenti attivi e passivi, integrandoli in una maglia strutturale leggera. È composto da pannelli isolanti multifunzionali e multistrato in calcestruzzo rinforzato con fibre ultra-performanti, moduli per facciate ventilate leggere multifunzionali e finestre dinamiche automatizzate con tende solari isolate, che si regolano automaticamente in base alla posizione del sole e al comfort degli occupanti. Inoltre, i componenti combinati dell'involucro solare termico e dell'involucro fotovoltaico sono utilizzati per il riscaldamento e la ventilazione degli ambienti interni, l'isolamento termico e la generazione di elettricità. Per di più, l'aria preriscaldata può essere utilizzata per il riscaldamento e la deumidificazione degli ambienti interni.

Il progetto è stato testato attraverso quattro dimostrazioni virtuali, situate in diverse zone climatiche europee e con un vero e proprio prototipo ad Ankara, prevedendo di registrare una riduzione di almeno il 60% del consumo totale di energia dell'edificio principale e di raggiungere un edificio ad energia quasi zero.

MeeFS



Il progetto MeeFS (Multifunctional Energy Efficient Facade System) è un sistema di facciata multifunzionale ad alta efficienza energetica per l'adeguamento degli edifici, sviluppato da Acciona Infraestructuras. Questo nuovo sistema consentirà una riduzione del 27% della domanda energetica totale, al fine di aumentare l'efficienza energetica e il comfort interno degli edifici residenziali nelle zone climatiche europee. Incorporerà soluzioni innovative mediante la combinazione di soluzioni tecnologiche attive e passive. Il progetto MeeFS è costituito da sette unità tecnologiche: isolamento, facciata verde, facciata ventilata, protezione solare, fotovoltaico integrato nell'edificio (BIPV), un dispositivo di protezione solare passivo avanzato/unità mobile automatica ad assorbimento di energia e un modulo collettore solare/ventilazione passiva avanzata. Queste unità tecnologiche hanno proprietà sia opache che trasparenti e sono integrate nei moduli e quindi nei pannelli strutturali e nelle facciate esistenti. Inoltre, i moduli includono anche sensori che consentono il monitoraggio in tempo reale, al fine di ottimizzare il consumo di energia. Il progetto è stato testato in un vero edificio in Spagna, superando con successo non solo i test prestazionali, ma anche le valutazioni tecniche dettagliate.

Classificazione e valutazione dei materiali applicati in base alla funzione.

Di seguito alcuni materiali incontrati nei progetti precedentemente descritti e altri che si troveranno nelle schedature dei casi studio del capitolo successivo, poiché considerati interessanti per le applicazioni future, sono stati raccolti in tabelle in base alla loro funzione per farne una valutazione che né analizza i loro vantaggi e svantaggi. Conclusioni che saranno necessarie per poter studiare un componente di facciata adattiva.

Funzione	Materiali	Vantaggi	Svantaggi
Protezione Solare	Tende esterna.	Risparmio di energia; Migliora il comfort termico; Controllo della luce e del calore; Molto efficace contro i guadagni termici solari.	Vista limitata; Forte impatto visivo; Aspetto – estetica; Pulizia, manutenzione, riparazione.
	Tende interne.	Controllo della luce; Non influenzano l'estetica dell'edificio.	Vista limitata; Forte impatto visivo; Prestazioni termiche inferiori rispetto alle tende esterne.
	Tende/Persiane nella cavità della finestra.	Risparmio di energia; Controllo della luce e del calore; Riduzione del rischio di danno e quindi della necessità di manutenzione.	Vista limitata; Aspetto – estetica.

Funzione	Materiali		Vantaggi	Svantaggi
Produzione di energia	Alta concentrazione fotovoltaica - HCPV		Efficienza fotovoltaica raddoppiata; Coefficienti di bassa temperatura; Aumento e produzione di energia stabile durante il giorno grazie al monitoraggio	Necessità di localizzazione solare - deve essere perpendicolare al sole; Geometria specifica - mancanza di standardizzazione; Aspetto estetico; Funziona meglio in alcune aree soleggiate con elevata irradianza normale diretta (DNI)
	Fotovoltaico integrato - BIPV		Può essere trasparente; Può funzionare come sistema di ombreggiatura.	Efficienza più bassa rispetto al Fotovoltaico tradizionale.
	Fotovoltaico o Termico Integrato - BIPV/T		Produzione sia di energia elettrica che termica.	
	Solare Termico	aria	Anti congelamento o anti bollizione; Non corrosivo;	
	integrato - BIST		Struttura semplice; Basso costo.	
		acqua	Non tossico; Conveniente; Lavora bene nei climi freddi.	
		refrigerante	Volume fluido piccolo. Prestazioni stabili; Elevata efficienza.	
		Tubo di calore	Compatto ed eccellente capacità di scambio termico; Flusso di liquido costante; Versatilità, scalabilità e adattabilità del design; Leggero; Facile da assemblare e da installare.	Difficoltà di manutenzione e sostituzione.
		PCM	Incremento del comfort termico; Versatilità di applicazione negli edifici;	Difficoltà di applicazione; Comportamento complesso; Uso di liquido.

Funzione	Materiali	Vantaggi	Svantaggi
Illuminazione Trasparenza	Tripla vetro riempito con aerogel granulare.	Aerogel: bassa conducibilità termica.	Possibilità di surriscaldamento del vetro; Temperature superficiali molto elevate; Trasmissibilità in condizioni di scarsa luminosità.
	Tripla vetratura con rivestimento a basso emissivo con argon nell'intercapedine esterna	Altamente riflettente	
	ETFE	90-95% trasparente; Controllo solare; Leggero; Durevole: non si degrada; Sostenibile e facilmente riciclabile; Proprietà autopulenti; Conveniente.	Offre prestazioni migliori solo in un multistrato (di solito 2-3) Sistema pneumatico: necessità di alimentazione per i cuscini gonfiati.

Funzione	Materiali	Vantaggi	Svantaggi
Isolamento	Calcestruzzo ad altissime prestazioni - UHPC	Leggero, Molto resistente; Ciclo di vita più lungo; Poca manutenzione	Molto più costoso del calcestruzzo convenzionale; Sono richiesti tempi di miscelazione molto lunghi e miscelatori ad alta energia.
	Materiale a Cambiamento di Fase - PCM	Migliora il comfort termico; Versatilità di applicazione negli edifici.	Difficile da lavorare; Comportamento complesso; Uso di Liquido.
	Vacuum Insulation Panel - VIP	Conducibilità termica eccezionale; È possibile ottenere prestazioni di isolamento migliori con un isolamento molto più sottile rispetto ai materiali isolanti convenzionali.	Spessori inferiori riducono la durata e richiedono una pressione del gas maggiore

Funzione	Materiali	Vantaggi	Svantaggi
Ventilazione	Scambiatore di calore totale.	Ventilazione compatta e recupero di energia.	Uso di liquido
	Camera ventilata	Eliminazione dei ponti termici e problemi di condensa; Eccellenti prestazioni termo-igrometriche.	
	Intercapedine	Ventilazione ibrida con diverse modalità per l'inverno e l'estate; Diversi percorsi del flusso d'aria; Isolamento termico e acustico.	Si possono formare punti freddi sulle pareti interne - condensa; Limiti nell'installazione dell'isolamento.

Funzione	Materiali	Vantaggi	Svantaggi
Ottimizzazione microclima interno/esterno	Giardino verticale	Migliora il comfort termico. Mitigazione dell'effetto isola di calore urbana; Proteggere dalle radiazioni solari dirette; Effetto di raffreddamento attraverso l'evaporazione; Assorbimento del rumore; Risparmio energetico; Nessun terreno necessario.	Vista limitata - impatto visivo; Manutenzione, irrigazione, problemi di cura

Funzione	Tipo		Vantaggi	Svantaggi
Rivestimento	Rivestimento antiriflesso applicato su celle fotovoltaiche.		Riduzione della riflessione della luce; Aumento della trasmissione della luce.	Nessuna adattabilità.
	Basso emissivo		Riduzione del Coefficiente di guadagno del calore solare SHGC - riflette la radiazione solare nel vicino infrarosso; Alti livelli di trasmissione della luce diurna; Basso fattore di trasmittanza; Controllo solare.	Riduce il guadagno solare benefico che potrebbe essere utilizzato per compensare i carichi di riscaldamento.
	Riflessione Infrarosso		Riduzione del Coefficiente di guadagno del calore solare SHGC - riflette le lunghezze d'onda della radiazione solare che provocano il surriscaldamento delle superfici; Controllo del bagliore; Aspetto esteriore uniforme.	Riduzione della trasmittanza visibile; Utilizzato di solito in climi caldi; Nessuna capacità di adattamento.
	Passivo	Biossido di titanio TiO ₂	Autopulente; Antibatterico; Fotocatalitico; Proprietà idrofobiche; Ignifugo; Maggiore durata;	
			Minori esigenze di manutenzione; Riflette lo spettro visibile e infrarosso.	
		Termocromico	Riduzione della luce infrarossa; Elevato risparmio energetico; Nessuna elettricità di attivazione.	Difficile controllare il cambiamento; Nessuna visibilità esterna; Adatto a regioni con climi caldi.

			<p>Risparmio energetico;</p> <p>Potenza a bassa tensione necessaria;</p> <p>Potenza richiesta solo al momento dell'interruttore;</p> <p>La trasmissione spettrale viene mantenuta durante il cambiamento dei livelli di trasparenza;</p> <p>Il cambio graduale della trasmissione è vantaggioso per gli occhi dell'occupante.</p>	<p>La velocità di commutazione è legata alle dimensioni e alla temperatura della finestra;</p> <p>È richiesta l'attivazione dell'elettricità.</p>
	Attivo	Cristallo liquido	<p>Cambiamento molto veloce (1sec);</p> <p>Controllo della privacy.</p>	<p>È richiesta l'elettricità di attivazione - ogni volta che è necessaria la luce;</p> <p>Nessun risparmio energetico;</p> <p>Nessuna visibilità esterna.</p>
		Particella sospesa	<p>Controllo istantaneo della luce (1 secondo);</p> <p>Visibilità esterna;</p> <p>Ampia gamma di trasmittanza;</p> <p>Protezione UV;</p> <p>Riduzione della luce infrarossa;</p> <p>Risparmio energetico.</p>	<p>Dimensioni limitate;</p> <p>È richiesta l'attivazione dell'elettricità;</p> <p>La trasmissione ottica diretta nello stato chiaro è scarsa.</p>

Tabella 2. Analisi swot

3.4 Casi studio: esempi di involucri realizzati, progetti, prodotti e prodotti di ricerca

L'analisi dei casi studio è stata condotta attraverso una suddivisione in tre categorie di indagine: progetti, prodotti e prodotti di ricerca.

All'interno della categoria progetti, rientrano tutti quei casi studio, realizzati o in fase di costruzione, nei quali l'involucro edilizio, di tipo adattivo, ricopre un ruolo fondamentale sull'efficienza energetica degli edifici. La ricerca è volta ad identificare le diverse categorie di adattività dell'involucro, rilevandone le caratteristiche e il comportamento, in riferimento agli obiettivi specifici del progetto.

La categoria prodotti riprende alcuni degli interessanti sistemi di facciata adattiva sviluppati da aziende private e destinati ad essere commercializzati. I prodotti catalogati sono stati selezionati per l'utilizzo di materiali e tecnologie capaci di rispondere dinamicamente alle sollecitazioni climatiche alle quali vengono sottoposti.

I prodotti di ricerca fanno invece riferimento, prevalentemente, al mondo accademico; questi, ancora in fase di sperimentazione, non hanno ancora completato il processo di ingegnerizzazione e di industrializzazione, ma possono comunque fornire uno spunto di indagine interessante dal quale partire per la fase ideativa della presente ricerca.

Per ognuna delle precedenti categorie è stata prodotta una scheda sintetica riepilogativa. La scheda messa a punto per l'analisi dei casi studio selezionati, è caratterizzata da un modello schematico, realizzato per evidenziare agli aspetti tecnologico-costruttivi ed energetico-ambientali ed è organizzata in tre sezioni:

- Descrizione sintetica dell'edificio/sistema nella quale si riportano precedute dai dati identificativi del caso del progetto, il luogo e l'anno di realizzazione oltre che delle

- immagini caratterizzanti del caso studio;
- Classificazione del sistema tecnologico dell'involucro nella quale l'edificio di riferimento viene identificato, in base alle caratteristiche costruttive, al sistema di ventilazione e al grado di prefabbricazione.
 - Classificazione del sistema adattivo attraverso la quale vengono specificate le caratteristiche dell'agente di adattamento, gli obiettivi, il controllo di tutto il sistema adattivo e la sua influenza sulla progettazione, nonché gli aspetti relativi ai costi.

#PROGETTI

Istitut du monde Arabe

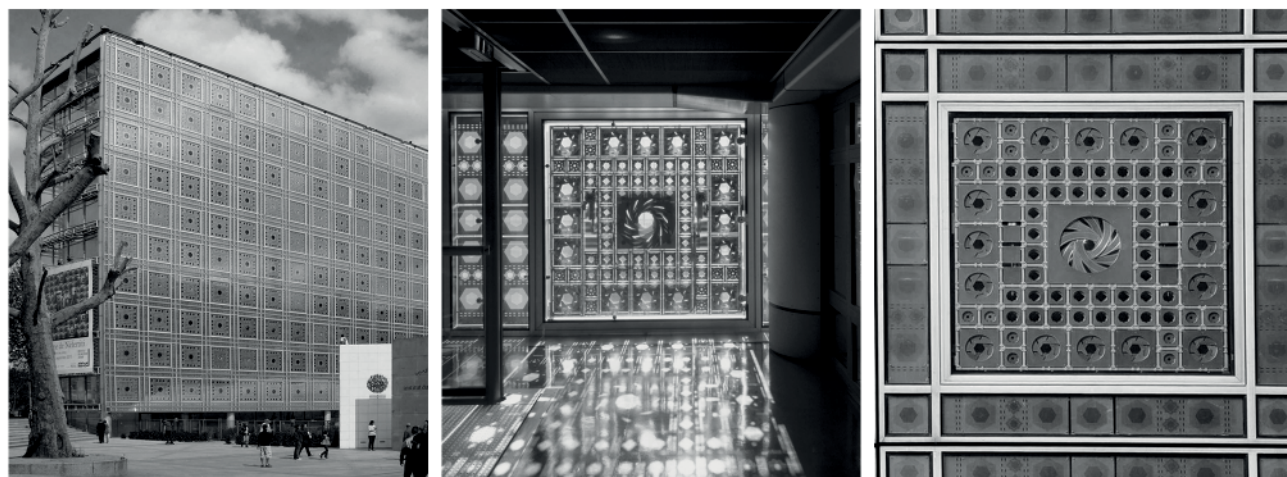
Jean Nouvel Architecture studio - Pierre Soria and Gilbert Lezenes

Parigi - Francia

1987

La facciata sud dell'Istitut du Monde Arabe è composta da un modulo Brise Soleil metallico reattivo e tecnologicamente avanzato, che si ispira al mashrabiya, un elemento archetipo, caratteristico dell'architettura araba. Il sistema è stato usato per secoli in Medio Oriente per proteggere l'ambiente interno dalle radiazioni solari e per garantire la privacy.

La quantità di luce che entra nell'edificio è regolata da diaframmi sensibili alla luce che muovono i motivi geometrici, regolandone la dimensione e controllando la trasparenza della superficie opaca. I pannelli sono composti da quadrati, cerchi e forme ottagonali che variano nella loro dimensione cambiando configurazione in un movimento fluido.



CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

OBIETTIVO

- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

Post Tower Bonn

Helmut Jahn Architects

Bonn - Germania

2003

Post Tower Bonn ha una facciata a doppia pelle con lo strato esterno completamente in vetro. Il sistema utilizzato è una facciata continua unitaria con lo strato esterno progettato su misura. La doppia pelle permette di ridurre gli apporti di calore attraverso il sistema di ventilazione naturale. Le tonalità dei vetri e le finestre azionabili facilitano il controllo del clima, mentre i sensori di luce diurna regolano automaticamente i livelli di luce degli ambienti, riducendo i costi energetici.

Post Tower offre ai suoi occupanti un enorme controllo sugli ambienti, essendo in grado di regolare sia l'apertura delle finestre che il sistema di ombreggiatura inserito nella facciata continua a due strati. L'obiettivo del progetto è fare in modo che l'edificio sia in grado di modulare il proprio clima attraverso il suo involucro.



CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

OBIETTIVO

- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

Kiefer Technic Showroom

Ernst Giselbrecht and Partner
Bad Gleichenberg - Austria
2007

La facciata del Kiefer Technic Showroom è costituita da persiane elettroniche con protezione solare in alluminio preformato. Queste si possono regolare automaticamente per l'ottimizzazione del clima interno, oppure possono essere personalizzate dagli utenti in base alle loro necessità. La facciata dell'edificio Kiefer Technic si espande e si contrae per regolare la quantità di luce solare che penetra all'interno. Questo design adattivo riduce al minimo la necessità di aria condizionata, mantenendo uno scudo contro il calore esterno in costante movimento. La facciata cambia aspetto durante il giorno in base alla posizione del sole, pertanto, l'edificio può passare da una configurazione completamente chiusa ad una facciata vetrata, trasparente e aperta.



CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

OBIETTIVO

- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

Capricorn Haus

Gatermann + Schossig

Dusseldorf - Germany

2008

Capricorn Haus è costituito da una geometrica trama modulare che alterna superfici opache arancio fuoco a superfici vetrate. Il modulo di facciata multifunzionale integra i sistemi di ventilazione e gli impianti di condizionamento in meno di 200 mm di profondità. Queste unità forniscono riscaldamento, raffreddamento, ventilazione e accolgono nel loro ridotto spessore 850 unità di trattamento aria decentralizzate e indipendenti per cui il singolo utente ha la possibilità di regolare il clima.

Ogni modulo è composto, infatti, da una parte vetrata che assicura piena luce agli ambienti interni e piena visibilità esterna grazie ad una trasparenza a tutta altezza, ed una parte opaca "dentro" la quale si nasconde l'unità di trattamento.



CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

OBIETTIVO

- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

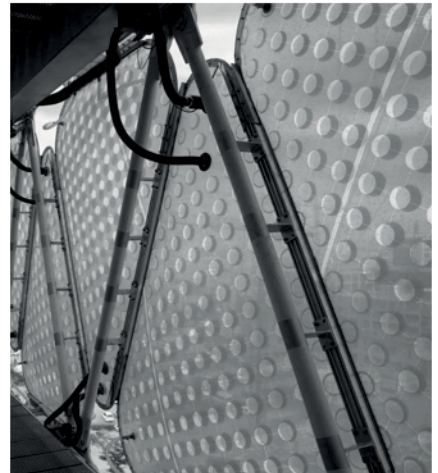
Media-TIC Office Building

Enric Ruiz Geli

Barcelona- Spagna

2009

Il tema del Media-TIC Office Building è come l'architettura sia in grado di trovare un nuovo equilibrio attraverso l'uso digitale dell'energia. Questo hub, dotato di tecnologia dell'informazione e della comunicazione, utilizza elementi "performanti" in due delle quattro facciate, attraverso l'impiego di materiali eco-efficienti in etilene tetrafluoroetilene (ETFE) dotate di sensori per controllare l'ombreggiatura solare. La facciata sud-ovest filtra la radiazione solare attraverso uno schermo di pannelli imbottiti verticali pieni di azoto, che ricordano una "nuvola". La facciata sud-est è disposta in triangoli convessi e concavi, per cui le tre camere gonfiabili all'interno di ogni telaio triangolare forniscono sia ombra, che isolamento termico. In totale, l'edificio ottiene un risparmio energetico di circa il 20%, utilizzando 2500 m² di rivestimento ETFE.



CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

OBIETTIVO

- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

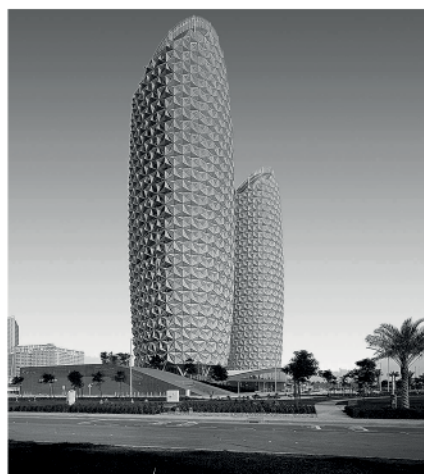
Al Bahr Towers

Aedas Architects

Abu Dhabi - Emirati Arabi

2012

Al Bahr Towers incorpora un sistema di ombreggiatura ispirato al "mashrabiya". La facciata continua, sospesa su una cornice indipendente, è composta da triangoli, ognuno dei quali è rivestito in fibra di vetro ed è programmato per rispondere al movimento del sole, con l'obiettivo di ridurre gli apporti solari e i fenomeni di abbagliamento. Lo schermo protettivo, prima di essere realizzato, è stato simulato dal team di calcolo dello studio per conoscere e verificare la sua risposta all'esposizione al sole e ai cambiamenti degli angoli di incidenza nel corso dell'anno. Inoltre, dai test si è potuto evincere che fosse possibile utilizzare un vetro colorato più naturale, offrendo, non solo una vista migliore, ma consentendo alla luce di entrare maggiormente nello spazio interno, riducendo così il fabbisogno energetico per la luce artificiale.



CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

OBIETTIVO

- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

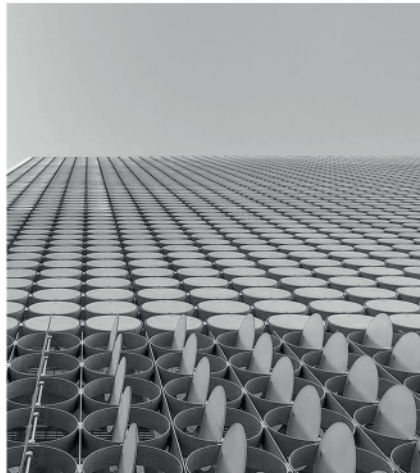
RMIT Design Hub

Sean Godsell

Melbourne - Australia

2012

Il progetto per l'istituto di tecnologia di Melbourne, RMIT, incorpora strategie di gestione per l'acqua, rifiuti e riciclaggio. In particolare, è costituito da una seconda pelle dotata di un meccanismo di frangisole mobile automatizzato, che include celle fotovoltaiche e prese d'aria per il raffrescamento, allo scopo di migliorare il comfort interno, riducendo i costi di gestione. La seconda pelle è composta da dischi di vetro sabbiato, fissati ad assi di alluminio orizzontali e verticali. Ogni pannello di facciata è formato da 21 dischi, di cui 12 orientabili e 9 fissi. L'intera facciata è progettata per essere facilmente sostituita e aggiornata progressivamente con l'evoluzione tecnologica dell'energia solare, auspicando, un giorno, di poter produrre energia elettrica sufficiente per coprire l'intero fabbisogno energetico dell'edificio.



CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

OBIETTIVO

- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

SDU Campus Kolding

Henning Larsen Architects

Kolding Campus, - Danimarca

2014

La facciata del SDU Campus Kolding è dotata di pannelli frangisole dinamici, che si adattano alle condizioni climatiche specifiche e ai modelli dell'utente, fornendo luce diurna ottimale e spazi climatici interni confortevoli. La facciata infatti, modifica la sua composizione in base alla radiazione solare, con lo scopo di regolare la luce del giorno e migliorare comfort termico.

1600 pannelli triangolari di acciaio perforato cambiano posizione in base alla quantità di luce naturale, misurata attraverso sensori capaci di rilevare la quantità di luce ed il calore. Quando i pannelli sono chiusi, giacciono piatti lungo la facciata, mentre sporgono quando sono parzialmente o completamente aperti, conferendo all'edificio un carattere molto espressivo.



CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

OBIETTIVO

- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

NEST - EDIFICIO PER LA RICERCA APPLICATA DELL'EMPA

Gramazio Kohler Architects

Dübendorf - Svizzera

2016

Il NEST è un edificio a tre piani composto da una "spina dorsale", la parte statica dell'edificio, e unità di ricerca che ne costituiscono la parte dinamica. La facciata multifunzionale dell'unità SolAce presenta diversi aspetti innovativi, tra i quali il "Light/Heat redirecting 3D microstructures", un nuovo tipo di vetro con microspecchi incassati e invisibili a occhio nudo che permette di migliorare l'illuminazione diurna degli ambienti direzionando la luce solare al soffitto. Una nuova vetrata, laser-treated selective glazing, è stata sviluppata per fornire un elevato isolamento termico tramite, un innovativo rivestimento selettivo adatto per l'applicazione sia in climi caldi che freddi. Altre vetrate colorate incorporano la tecnologia "colored glazing for PV & solar thermal collectors", costituiti da film nanometrici multistrato al plasma.



CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

OBIETTIVO

- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

GENERALI TOWER

Zaha Hadid Architects

Milano - Italia

2012

La Torre Generali, con i suoi 44 piani fuori terra e i suoi 170 m di altezza è un edificio complesso che utilizza le più recenti tecnologie costruttive e tecniche di progettazione BIM, attraverso le quali è stato possibile raggiungere la certificazione LEED Platinum. Tra i molti aspetti tenuti in considerazione per giungere a questo obiettivo ci sono sicuramente le facciate a doppio involucro con i loro sistemi di schermatura interni, la ventilazione naturale e i trattamenti sulle superfici dei vetri, oltre una strategia impiantistica complessiva.

La pelle esterna è costituita da una facciata a cellule, che definisce e segue la forma curva della Torre, mentre la pelle interna è stata realizzata con cellule piane e rettangolari a taglio termico più semplici, che la rendono barriera termica e all'acqua per l'edificio.



CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

OBIETTIVO

- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

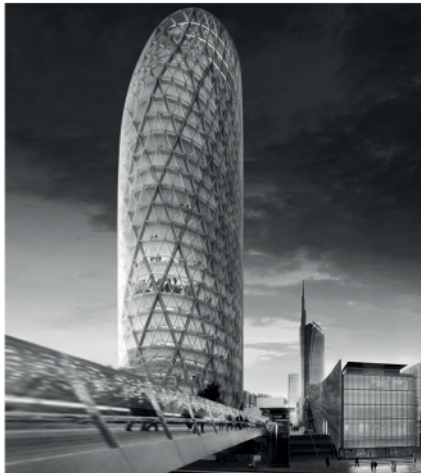
CENTRO DIREZIONALE GRUPPO UNIPOL

Mario Cucinella Architects

Milano - Italia

2015 - in corso

L'edificio, ribattezzato da molti "il nido verticale" per la particolare trama lignea che avvolge la struttura romboidale, sarà costituito da una doppia pelle vetrata e da un cavedio ellittico a tutta l'altezza, che contribuiranno a garantire il corretto comfort termico interno in tutte le stagioni. L'aria presente tra le due pelli, nel periodo invernale, per effetto dell'irraggiamento solare, si riscalda creando un ambiente intermedio con temperatura superiore a quella esterna. Nel periodo estivo invece, l'aria surriscaldata presente nell'intercapedine verrà asportata per mezzo di ventilazione naturale. Sull'involucro vetrato, l'esigenza di massimizzare il rapporto tra trasmissione luminosa e fattore solare, si ha con la scelta di rivestimenti selettivi e basso emissivi.



CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

OBIETTIVO

- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

THE SHED

Diller Scofidio + Renfro

New York - USA

2019

Il centro culturale The Shed si sviluppa su 5 livelli, in un edificio mutante e dinamico, la cui struttura telescopica scorre lungo binari posti sull'edificio sottostante, aumentando così la sua superficie sulla piazza antistante. Il guscio esterno telescopico è costituito da un telaio in acciaio rivestito da "cuscini" traslucidi (in etilene tetrafluoroetilene) teflon, le cui proprietà termiche e isolanti garantiscono le qualità mobili della struttura e la certificazione LEED.

Con le proprietà termiche del vetro isolante ed un peso decisamente più leggero, a parità di trasmittanza, l'ETFE consente il passaggio della luce e garantisce livelli di resistenza al vento e alle intemperie davvero significativi.



CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

OBIETTIVO

- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

ARTICULATED CLOUD

Ned Kahn

Pittsburgh - Pennsylvania - USA

2011

Articulated Cloud è sia una facciata che un'installazione artistica. Realizzata per il Museo dei bambini di Pittsburgh, l'artista Ned Kahn ha collaborato con lo studio Koning/Eizenberg, gli appaltatori e un produttore di materie plastiche. Essa è composta da migliaia di quadrati di plastica bianca traslucida che si muovono nel vento, lasciando suggerire l'idea che l'edificio sia stato avvolto da una nuvola digitale. Le condizioni naturali, come il movimento del sole ed il tempo, cambiano le qualità ottiche della pelle in modi unici e imprevedibili. La pelle articolata è sostenuta da una struttura spaziale in alluminio, tale da farlo sembrare sospeso di fronte all'edificio. La luce modulata che raggiunge l'involucro posto dietro la pelle principale, produce configurazioni visive e suoni in base alle condizioni di vento e luce.



CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

OBIETTIVO

- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

CITTA' DEL DESIGN

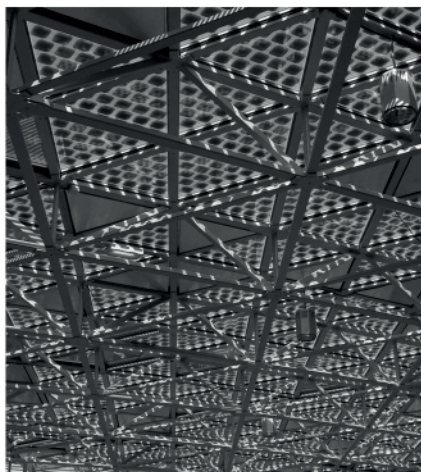
LIN (Finn Geipel + Giulia Andi)

Saint-Etienne - Francia

2009

Il progetto è un contenitore, a metà strada tra una serra e un laboratorio bioclimatico capace di accogliere numerose attività legate al design. L'involucro, è composto da elementi geometrici standard: 15.000 triangoli equilateri di vetro, di lato 120 cm.

Le caratteristiche termiche dell'involucro, permettono di modulare le prestazioni climatiche dell'edificio. L'integrazione di pannelli solari fotovoltaici e sperimentali, consente la produzione di energia elettrica e di testare tecnologie solari innovative basati sul principio della fotosintesi. Il rivestimento regola non solo il microclima, ma anche l'illuminazione, modificando gli angoli per bloccare la luce. La luminosità varia in funzione delle condizioni esterne e delle esigenze interne fornendo un'illuminazione artificiale controllata.



CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

OBIETTIVO

- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

**#PRODOTTI
INDUSTRIALI**

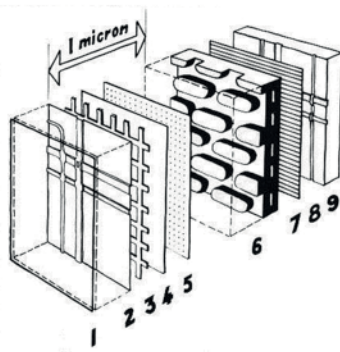
Polyvalent Wall for Lloyd's of London

Mick Davies

London - Regno Unito

1981

Polyvalent Wall è un modello di facciata multifunzionale costituita da diversi strati funzionali integrati in un unico modulo. Polyvalent Wall è composta da diversi livelli tecnologici all'interno di un elemento di vetro ed è in grado di controllare il flusso di energia dall'esterno verso l'interno usando strati estremamente sottili: ha la capacità di assorbire, riflettere, filtrare, ventilare e trasferire energie dall'ambiente. Possiede le proprietà del vetro, ma anche la capacità di adattamento di una finestra elettrocromica, raccoglie energia come una cella fotovoltaica e riesce a produrre livelli di calore confortevoli come le pompe di calore termoelettriche, adattandosi continuamente a seconda alle condizioni circostanti e fungendo da filtro in entrambe le direzioni, interna ed esterna.



- 1 Silica weather skin and deposition substrate.
- 2 Sensor and control logic layer – external.
- 3 Photo electric grid.
- 4 Thermal sheet radiator/selective absorber.
- 5 Electro reflective deposition.
- 6 Micro pore gas flow layers.
- 7 Electro reflective deposition.
- 8 Sensor and control logic layer – internal.
- 9 Silica deposition substrate and inner skin.



CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

OBIETTIVO

- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

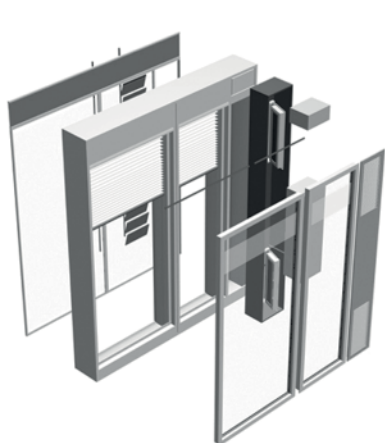
TEmotion

Hydro Building Systems

WICONA global company & University of Dortmund

2005

TEmotion è una sintesi di tecnologia ed emozione, ed il risultato di tutto questo è una facciata che risponde ai cambiamenti delle condizioni esterne e interne, come luce e temperatura, incorporando componenti tecnici, sensori e sistemi di controllo. La facciata intelligente controlla la tecnologia integrata di ventilazione, climatizzazione e riscaldamento, regola la protezione solare e impedisce il surriscaldamento degli interni. Inoltre, le celle fotovoltaiche vengono utilizzate per generare energia elettrica utile per gli impianti tecnologici degli edifici. Tutti i componenti dei servizi integrati nell'elemento funzionale, possono essere controllati attraverso un sistema centrale di gestione o dall'utente stesso, con l'obiettivo di ottenere risparmi energetici e un elevato livello di benessere.



CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

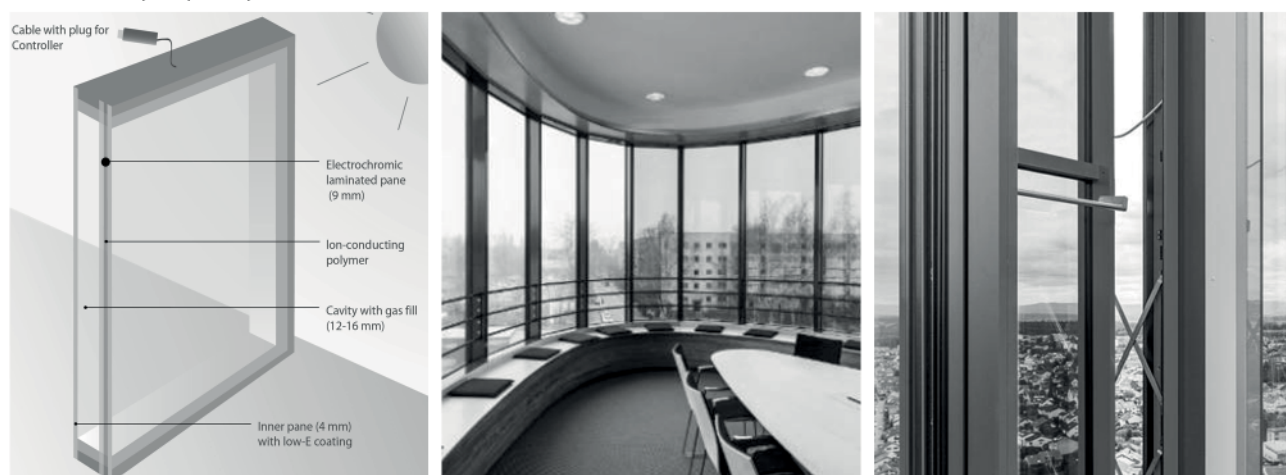
OBIETTIVO

- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

ECONTROL

EControl-Glas GmbH & Co.
Plauen - Germania
2005

ECONTROL® è un vetro a controllo solare regolabile sviluppato da EControl-Glas che utilizza il vetro elettrocromico per cambiare il colore del vetro e quindi la sua trasmissione della luce e il suo fattore solare. A seconda dell'ombra del vetro, la luce può essere trasmessa con un'intensità che va dal 10 al 56%, mantenendo un livello di luminosità anche nel suo stato più scuro. Come tutti i vetri intelligenti, questa soluzione riduce l'abbagliamento mantenendo la vista verso l'esterno durante l'estate. Il materiale ha la capacità di memorizzare le informazioni e conservarle fino a quando non viene fornito un nuovo input. Il controllo può essere automatizzato o manuale, con la possibilità per gli utenti di controllare il livello di regolazione in base alle proprie preferenze.



CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

OBIETTIVO

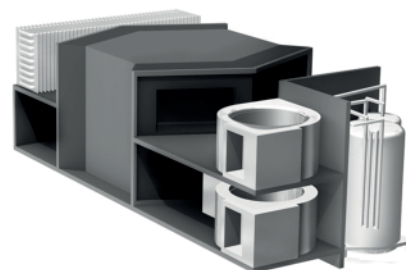
- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

Smartbox Energy Facade

Cepezed & Energy Research Center of Netherlands

2006

Smartbox integra i componenti dei servizi tecnologici, all'incrocio tra la parete esterna verticale e la soletta orizzontale, con il vantaggio di una vista esterna libera, priva di ostacoli. La Smartbox Energy Facade contiene una grande quantità di apparecchiature avanzate di regolazione del clima, una pompa dell'acqua, ventilatori ad azionamento elettrico e uno scambiatore di calore. Il progetto fa un uso intelligente della luce solare incorporando celle fotovoltaiche integrate per generare elettricità. Il progetto mirava a sviluppare un concetto di facciata attiva che utilizzasse l'energia solare attiva e passiva. Il risultato è una potenziale riduzione del 50% dell'utilizzo di energia, combinato con un maggiore comfort termico.



CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

OBIETTIVO

- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

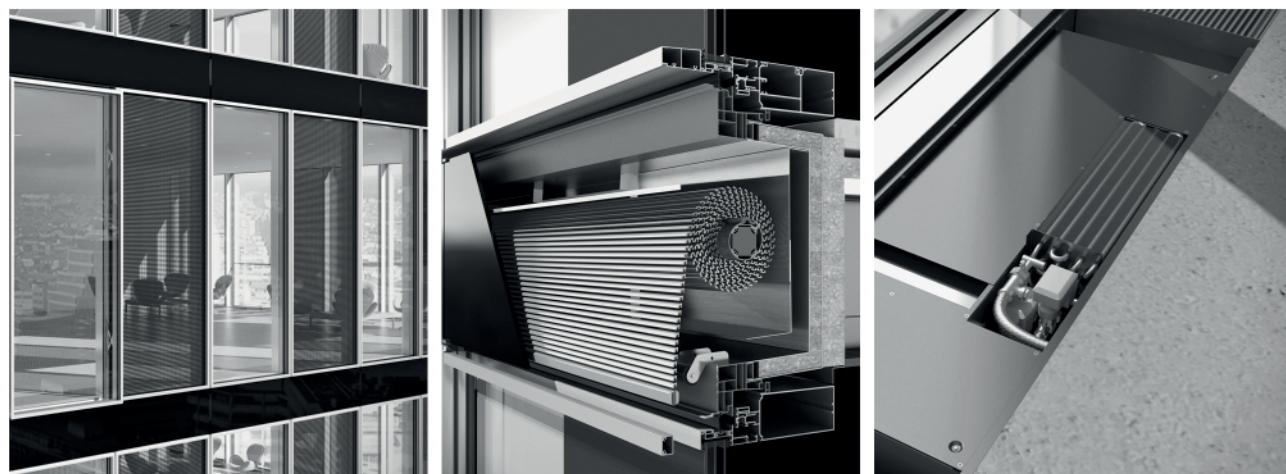
Schuco E² Facade

Prof. Stefan Behling

Schuco

2007

Schuco E² Facade è una facciata multifunzionale che ha l'obiettivo di risparmiare e generare energia in tempo reale, attraverso la tecnologia. È una combinazione rivoluzionaria della facciata composta da quattro diversi moduli funzionali che ne consentono la personalizzazione. Questi moduli sono: ventilazione decentralizzata nascosta, moduli a film sottile, frangisole integrato e unità di apertura integrate a filo. Questa facciata offre trasparenza e allo stesso tempo protezione dall'eccessiva radiazione solare consentendo un'illuminazione naturale ottimale. Il nuovo sistema è una combinazione tra una facciata continua e un sistema di vetrata strutturale che offre la possibilità di integrare i componenti impiantistici in uno spazio nascosto, posto di fronte al solaio, lasciando così, la visuale esterna completamente libera.



CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

OBIETTIVO

- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

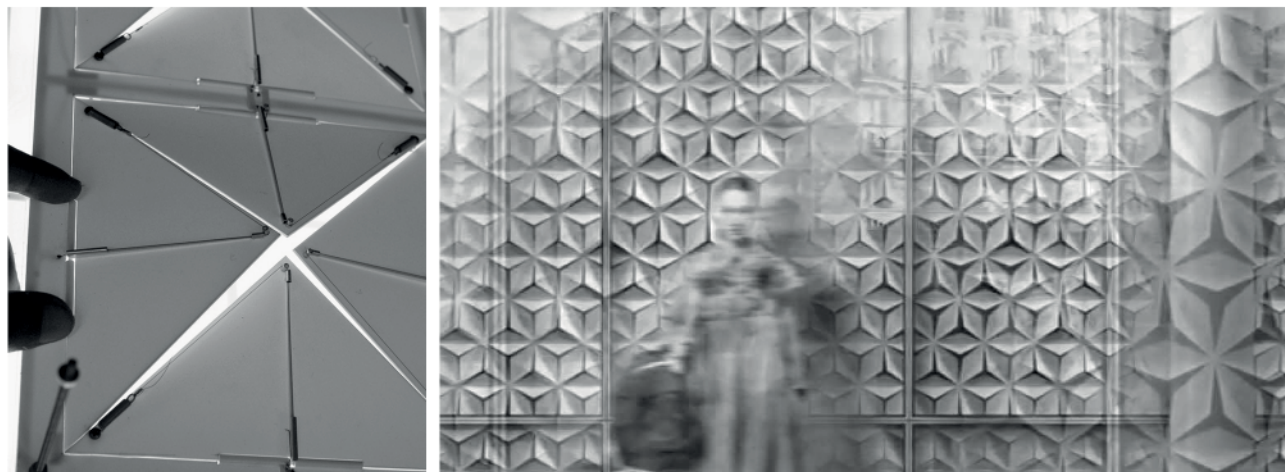
PixelSkin02

Sachin Anshuman

Regno Unito

2008

Pixel Skin02 è una superficie composta da tessere in lega a memoria di forma (SMA). Descritto come "architettura elettrografica", PixelSkin02 crea un campo visivo trasparente che genera anche immagini a bassa risoluzione e video a bassa frequenza di aggiornamento, attraverso strumenti elettromeccanici. Ogni tessera è costituita da quattro pannelli triangolari, azionati con fili SMA da 200 mA. Console incorporate nelle superfici controllano il grado di apertura di ciascun pannello regolando l'alimentatore venti volte al secondo. Ogni pannello, da completamente aperto a chiuso, ha 255 possibilità di regolazione. Una tecnica chiamata "multiplexing" consente il controllo delle tessere al fine di creare modelli e immagini in movimento.



CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

OBIETTIVO

- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

NEXT Active Facade

Kawneer
global company
2010

Alcoa Architecture Systems, Somfy e Trox hanno utilizzato le conoscenze e le competenze degli architetti Cepezed, dell'Università tecnica di Delft, Hurks Facade Technology e Warema Nederland per sviluppare un concetto unico di facciata. NEXT Active Facade ha una configurazione modulare e offre strutture completamente integrate con sistemi di raffrescamento climatico, riscaldamento, ventilazione e regolazione della luce solare. La facciata può essere divisa liberamente e offre un consumo energetico operativo piuttosto ridotto. I filtri nella facciata risucchiano l'aria esterna e la portano all'interno degli spazi senza ricambio d'aria. Uno scambiatore di calore rigenera l'aria di scarico, mentre la ventilazione notturna e la protezione solare automatica utilizzano risorse naturali.



CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

OBIETTIVO

- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

Adaptive Fritting (GSD)

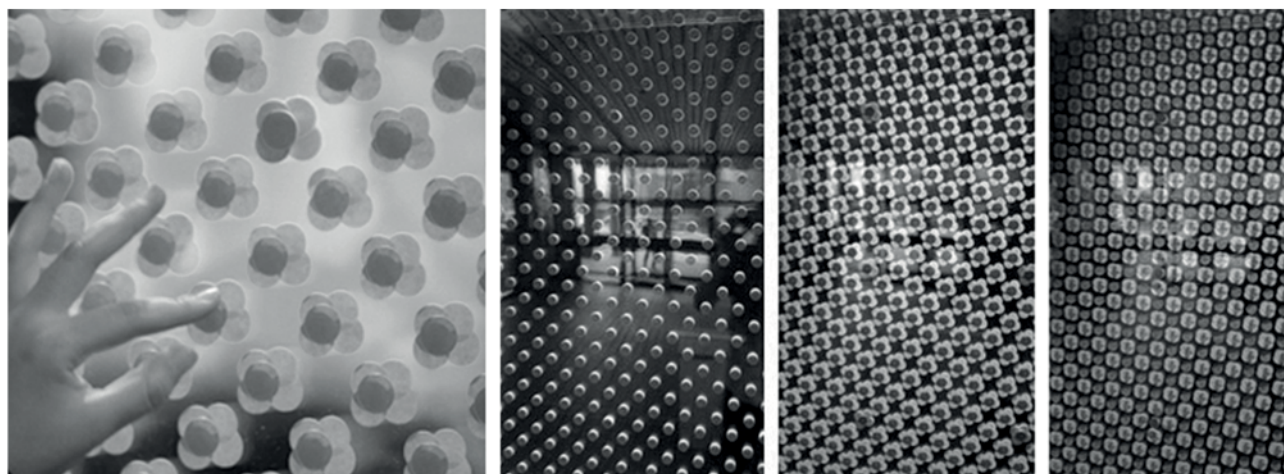
Hoberman

Harvard Graduate School of Design, Cambridge - Massachusetts - USA

2009

Adaptive Fritting si basa sulla pratica della "Fritta" con l'aggiunta del movimento dinamico in tempo reale tramite controllo motorizzato. Mentre la fritta convenzionale si basa su un modello fisso, Adaptive fritting può controllare la sua trasparenza modulando gli stati opachi e trasparenti. Questa prestazione si ottiene spostando una serie di strati di vetro increspato in modo che il motivo grafico si allinei o diverga in modo alternato.

Come per il vetro standard increspato, questa tecnologia utilizza un motivo grafico per controllare il guadagno di calore e modulare la luce, consentendo una trasparenza sufficiente per l'ingresso della luce naturale.



CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

OBIETTIVO

- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

Solar Thermal Facade Collectors with Evacuated Tubes

Universitat Stuttgart. IBK 2

Stoccarda - Germania

2013

Il collettore solare termico per facciate con tubi evacuati offre comfort termico e garantisce una corretta illuminazione. In particolare, raccoglie il calore solare alle alte temperature e grazie alla semitrasparenza degli elementi, protegge lo spazio interno dall'abbagliamento assicurando una corretta diffusione della luce. I tubi evacuati ad alte prestazioni sono coperti con specchi parabolici perforati che dirigono la radiazione solare sui tubi evacuati, aiutando a ridurre gli apporti solari e, quindi, riducendo la richiesta di raffrescamento in estate. Dal punto di vista del comfort visivo, il sistema si presenta come tende alla veneziana, con il vantaggio di essere più trasparente, consentendo la visuale verso l'ambiente esterno.



CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

OBIETTIVO

- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

Smart Window & Power Window

PHYSEE

Delft - Olanda

2014

PowerWindow è un prodotto brevettato di Physee. Sembra esattamente una finestra comune perché è trasparente e incolore, ma ha il vantaggio di convertire la luce in elettricità. La SmartWindow collega l'ambiente interno a quello esterno mediante sensori intelligenti che misurano l'intensità della luce, la temperatura, la pressione e la qualità dell'aria, contribuendo al miglioramento delle condizioni interne e alla riduzione della domanda di energia per il riscaldamento ed il raffrescamento. Attraverso un software specifico, SmartWindow acquisisce continuamente informazioni dall'esterno per migliorare le condizioni climatiche interne. Questo sistema autonomo plug & play è la spina dorsale del prodotto.



CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

OBIETTIVO

- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

licrivision™ - Liquid Crystal Window

Merck Window Technologies B.V.
Modular Innovation Center in Darmstadt
2015

I vetri a controllo solare LCW consentono di controllare la quantità di luce diurna attraverso la finestra. Il vetro ha uno strato composto da cristalli liquidi che, in 2 secondi, possono cambiare il loro orientamento e quindi regolare la trasmissione di luce. Ciò si ottiene con un passaggio da chiaro a scuro ed è possibile scegliere sia la scala di grigi che i diversi colori. La trasparenza del vetro non cambia, ma è solo il colore che varia. Il sistema è applicabile a diverse dimensioni e forme senza modificarne le prestazioni. Licrivision™ previene la dispersioni di energia e controlla il calore solare, migliorando le prestazioni della facciata in termini di efficienza energetica e sostenibilità.



CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

OBIETTIVO

- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

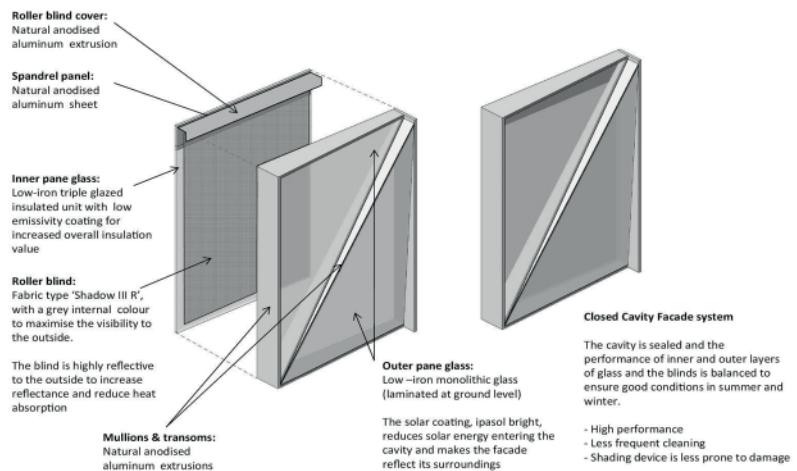
Closed Cavity Facade, JTI Headquarters

JosefGartner GmbH

Ginevra - Svizzera

2015

L'innovativo sistema di facciata a cavità chiusa offre un nuovo approccio al sistema di facciata a doppia pelle, in cui l'intercapedine, dotata di una tenda a rullo in tessuto tra la pelle interna ed esterna, è completamente sigillata. L'aria secca e pulita viene costantemente immessa nella cavità della facciata per prevenire la formazione di condensa sui vetri. Questa facciata è in grado di rispondere alle condizioni climatiche esterne, mantenendo allo stesso tempo le qualità visive di una facciata interamente in vetro con un basso valore g e U. Le condizioni esterne sono monitorate elettronicamente al fine di apportare modifiche al comfort degli occupanti. Di conseguenza, il consumo di energia e le emissioni di CO₂ sono ridotte al minimo.



CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

OBIETTIVO

- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

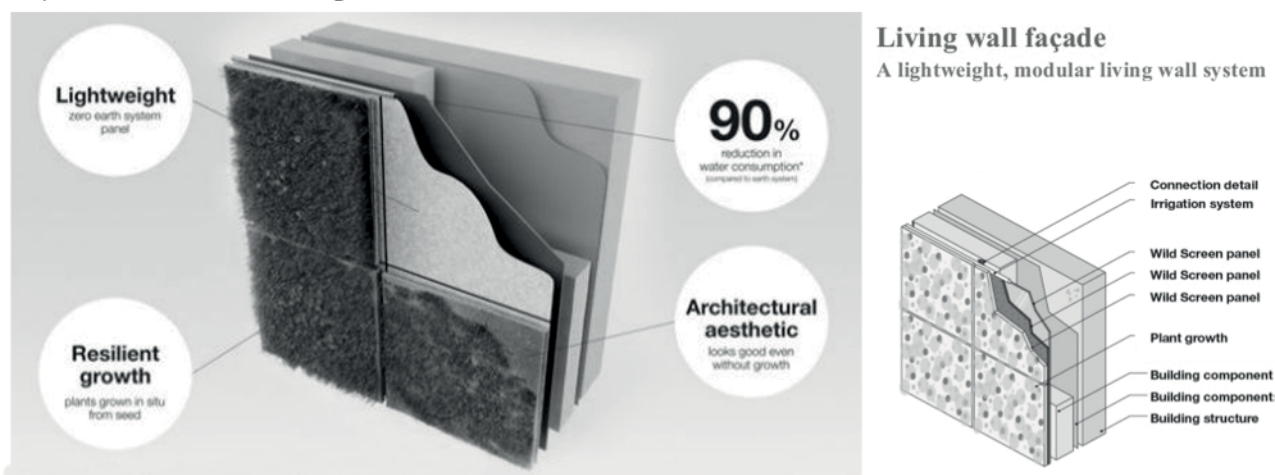
Living Wall Facade

Arup

Leeds - Regno Unito

2016

La Living Wall Facade è un innovativo sistema a terra zero, che lo rende davvero leggero rispetto alle tipiche pareti verdi. Inoltre, attraverso l'utilizzo di un sistema idroponico per la fertilizzazione, si ottiene una riduzione del 90% nel consumo di acqua. I semi crescono sul posto e ci vogliono fino a due mesi per la piena crescita, tuttavia, la facciata resta visivamente accattivante anche senza il verde. La facciata Living Wall migliora il comfort termico dell'edificio, grazie all'evapotraspirazione del verde, protegge dalle radiazioni solari dirette, smorza l'inquinamento acustico, riduce l'inquinamento atmosferico e contribuisce alla mitigazione degli effetti di surriscaldamento delle isole urbane di calore, il tutto, ottenendo un considerevole risparmio dei costi energetici.



CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

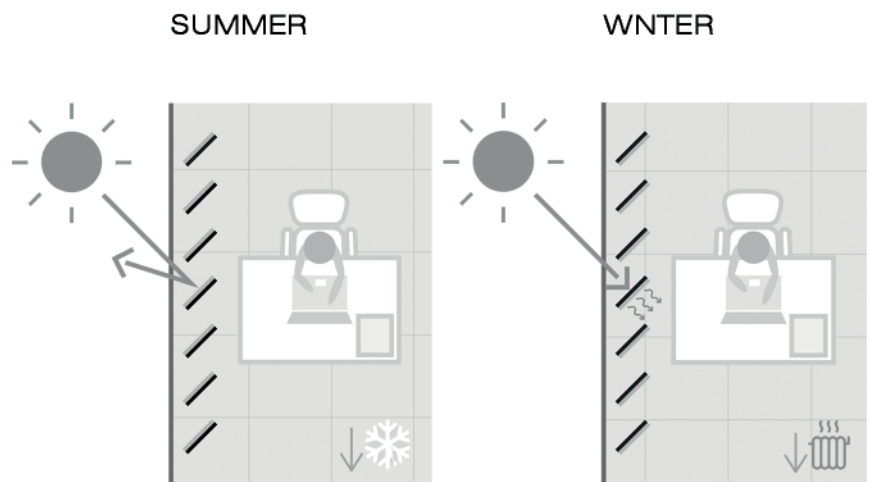
OBIETTIVO

- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

Kindow Blinds

Kindow BV
Delft - Olanda
2017

"Kindow Blinds" sono tende da interno costituite da doghe verticali che ruotano durante il giorno grazie a un sistema di localizzazione solare. Le doghe sono realizzate con due materiali diversi: da un lato un materiale altamente riflettente che riespinge la radiazione solare della finestra in estate e dall'altro, un materiale che assorbe l'oscurità contribuisce all'aumento del calore durante l'inverno. La faccia esposta alla luce solare dipende dalla stagione ed è sempre perpendicolare ai raggi solari. Il risultato è il 25% di energia risparmiata per l'illuminazione, il riscaldamento e il raffreddamento.



CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

OBIETTIVO

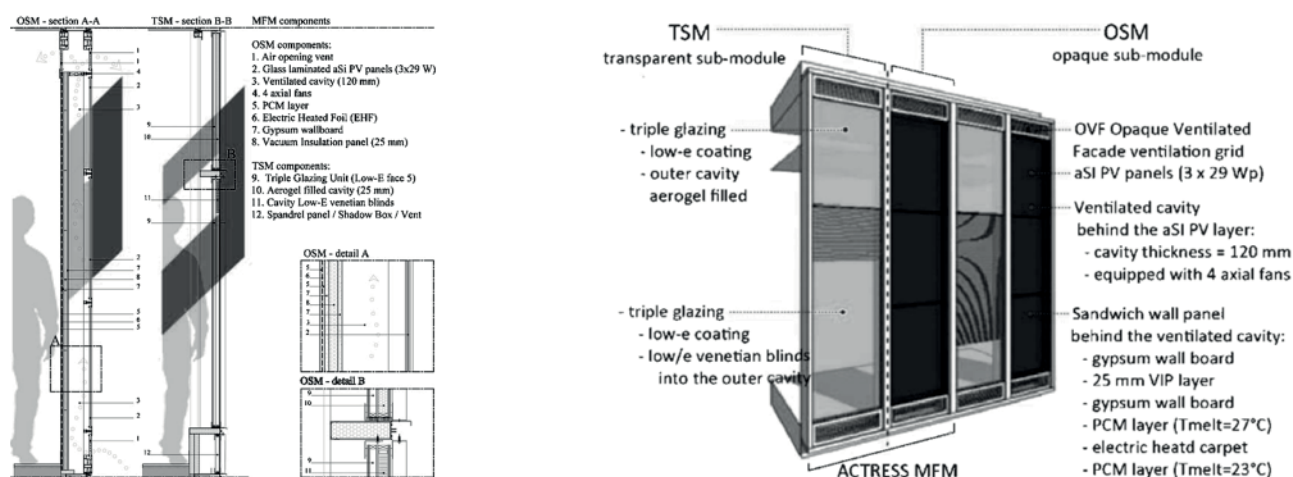
- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

**#PRODOTTI DI
RICERCA**

ACTRESS (Active RESponsive and Solar)

TEBE Research Group. Department of Energy
Politecnico di Torino - Italia
2007

ACTRESS è un modulo di facciata multifunzionale (MFM) con assetto autonomo che incorpora diverse tecnologie con l'obiettivo di migliorare l'efficienza energetica dell'edificio e convertire l'energia da fonti di rinnovabili (RES). È costituito da un sottomodulo opaco (OSM) e da uno trasparente (TSM), costituiti da vari strati di materiali diversi. Il sottomodulo opaco può essere utilizzato come cuscinetto termico in inverno o come barriera d'aria esterna in estate. Il sottomodulo trasparente è composto da due diversi sistemi di tripli vetri. Un modulo ACTRESS è stato testato a Torino per quasi due anni e le conclusioni hanno prodotto risultati positivi in termini di efficienza e risparmio energetico.



CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

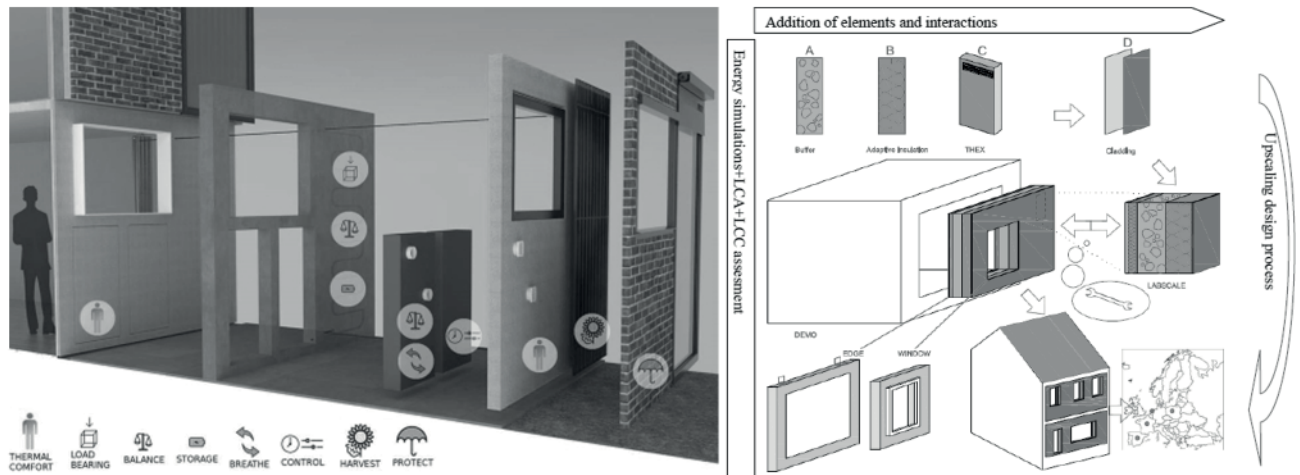
OBIETTIVO

- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

ADAPTIWALL

TNO Delft & Partners
Delft - Olanda
2012

Il progetto ADAPTIWALL è un pannello prefabbricato leggero multifunzionale adattivo al clima, ideato per la costruzione di facciate economiche, rapide ed efficienti. E' in grado di ridurre i consumi di energia del 50-80% rispetto alle tipiche soluzioni altamente isolanti, nonché capace di eliminare quasi completamente gli impianti ausiliari di recupero di calore e ventilazione. L'elemento centrale del pannello è uno strato di cemento leggero e portante, utilizzato come tampone per immagazzinare calore e freddo. Inoltre, l'isolamento adattivo costituito da materiali polimerici non tradizionali, è installato su entrambi i lati al fine di controllare i flussi di calore. Viene utilizzato, inoltre uno scambiatore di calore totale per fornire una ventilazione compatta e un sistema di recupero di energia.



CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

OBIETTIVO

- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

SELFIE - Smart and Efficient Layers for Innovative Envelopes

Ministero dell'università e della ricerca - Regione Toscana

Università di Firenze - Italia

2016

La facciata SELFIE è un sistema di facciata continua unitario che consente non solo una facile installazione in loco, ma anche la personalizzazione attraverso la possibilità di posizionare i componenti modulari con geometrie di configurazioni diverse, diversi tipi di materiali e colori differenti. La facciata SELFIE è composta da tre diversi componenti, due opachi e uno trasparente, con diversi strati di materiale. Tutti e tre i componenti hanno sensori e apparecchiature integrati per la gestione dei dati, al fine di garantire un controllo intelligente dei flussi di energia all'interno dell'involucro dell'edificio e garantire la possibilità di modificare le prestazioni energetiche in base alle condizioni climatiche esterne.

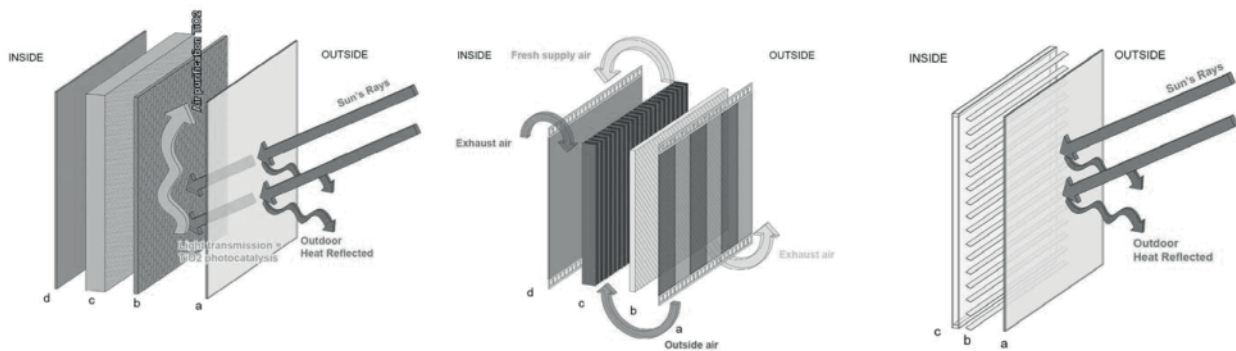


Figure 3. Selfie_1: a. Glass layer with PVB and IR reflecting coatings; b. Honeycomb with TiO₂. C. Insulating panel; d. Closure panel

Figure 5. The Selfie_2: a. Pv panels with air grids; b. Insulating panel; c. Heat exchanger; d. Closure panel

Selfie_3: a. Glass layer with PVB and IR reflecting coatings; b. Air gap and shading device; c. Double glazing

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

OBIETTIVO

- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

BRESAER

Acciona Infraestructuras & Partners

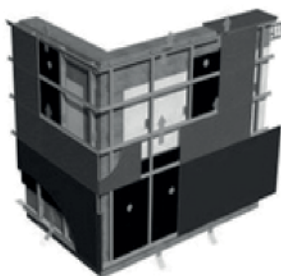
Spagna

2015

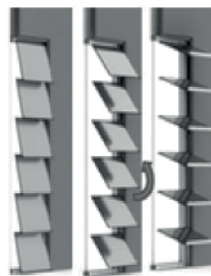
Il progetto BRESAER è un innovativo sistema che combina componenti attivi e passivi, integrandoli in una maglia strutturale leggera. È composto da pannelli isolanti multifunzionali e multistrato in cemento armato con fibre ultra performanti, moduli per facciate ventilate e finestre dinamiche automatizzate con tende solari isolate, che si regolano automaticamente, in base alla posizione del sole e al comfort degli occupanti. I componenti, in combinazione con i flussi di aria calda e con l'involucro fotovoltaico vengono utilizzati per il riscaldamento, la ventilazione, l'isolamento termico, la generazione di elettricità e la deumidificazione degli ambienti interni. Il progetto è testato virtualmente in diverse zone climatiche europee e fisicamente in un prototipo ad Ankara, prevedendo una riduzione di almeno il 60% del consumo totale di energia.



Combined solar thermal and PV envelope component



Multifunctional lightweight ventilated façade module



Dynamic window with controlled air-tightness and insulated solar blinds



Multifunctional UHPFRC panels for envelope

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

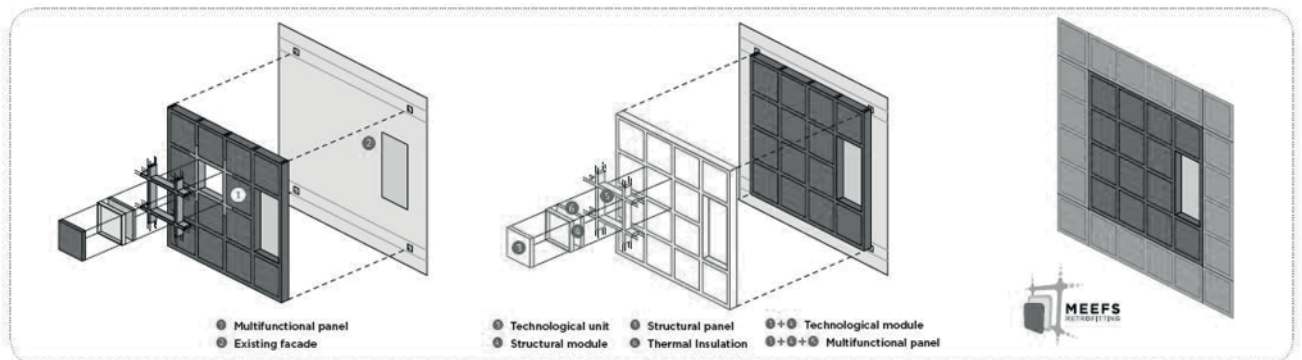
OBIETTIVO

- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

MeeFS

Acciona Infraestructuras & Partners
 Spagna
 2012

Il progetto MeeFS è un sistema di facciata multifunzionale ad alta efficienza energetica per l'edilizia. Questo sistema consente una riduzione del 27% della richiesta totale di energia, aumentando l'efficienza energetica e il comfort interno degli edifici residenziali nelle zone climatiche europee. Incorpora soluzioni innovative attraverso la combinazione di tecnologie attive e passive. Il progetto MeeFS è costituito da sette unità tecnologiche: isolamento, facciata verde, facciata ventilata, protezione solare, fotovoltaico integrato nell'edificio (BIPV), dispositivo di protezione solare passivo avanzato/unità mobile ad assorbimento automatico di energia e modulo passivo/collettore solare avanzato. Queste unità tecnologiche hanno proprietà sia opache che trasparenti. Il progetto è stato testato, con esiti positivi, in un edificio in Spagna.



THE MEEFS MULTIFUNCTIONAL ENERGY EFFICIENT FACADE SYSTEM FOR BUILDING RETROFITTING

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

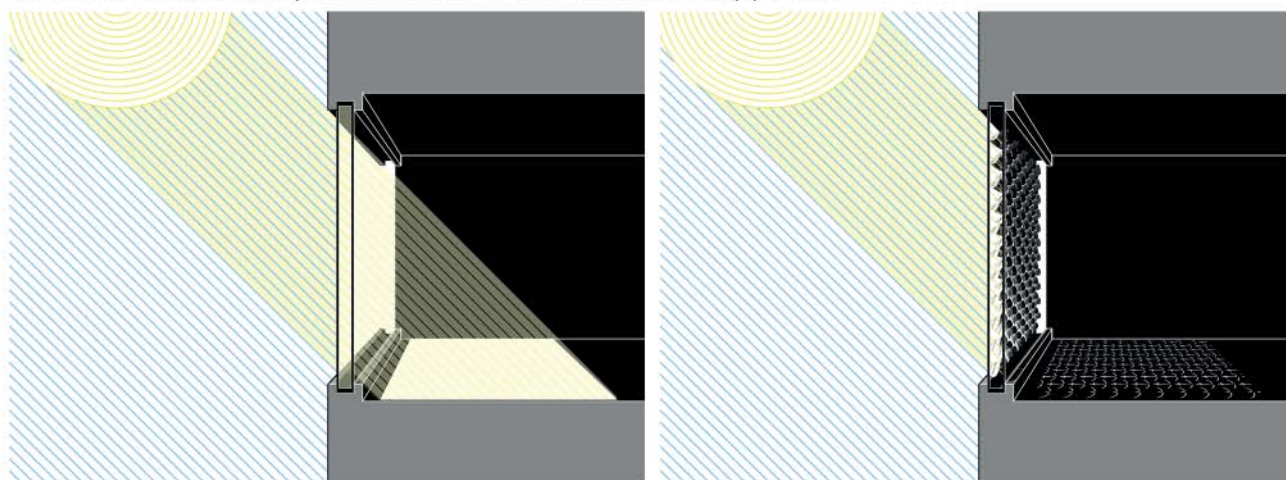
OBIETTIVO

- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia

Thermobimetal shutters

Doris Sung
California - USA
2019

Thermobimetal shutters, si presenta come una persiana ornamentale tradizionale, tuttavia i suoi elementi metallici si piegano e si orientano alla luce solare, modificando la quantità di radiazione solare e calore che può penetrare negli spazi interni. Il sistema usa il termo-bimetallo, ovvero, un composto a due strati di due leghe metalliche: una si espande al calore più rapidamente dell'altra, con il risultato è che il tessuto si deforma. Mentre gli elementi di metallo riscaldati si deformano e si muovono, filtrano il passaggio della luce. Dopo aver completato la fase di prototipazione, Sung spera di avere presto il sistema in produzione. L'attuale prototipo è costituito da pezzi ovali simili a foglie. Il sistema è stato testato inserendo i sottili pezzi metallici all'interno dell'intercapedine d'aria di una facciata a doppi vetri.



CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA TECNOLOGICO

CURTAIN WALL

- Montanti e traversi
- Unità
- Continua strutturale
- Fissaggio puntuale

DOPPIA FACCIATA

- Seconda pelle
- Box-Windows
- Corridoio
- Shaft-box

SISTEMA STRATIFICATO

- Secco
- Umido
- Ibrido

CLASSIFICAZIONE DEL SISTEMA ADATTIVO

RISPOSTA ALL'AGENTE DI ADATTAMENTO

- Dinamica
- Statica

CONTROLLO ADATTABILITA'

- Ciclo chiuso
- Ciclo aperto

COSTI MAGGIORI

- Materiali
- Produzione
- Assemblaggio
- Manutenzione

AGENTE DI ADATTAMENTO ESTERNO

- Radiazione solare
- Temperatura
- Umidità
- Vento
- Precipitazione
- Rumore

LIBERTA' DI DESIGN

- Basso
- Medio
- Alto

AGENTE DI ADATTAMENTO INTERNO

- Temperatura
- Umidità
- Luce
- Ricambio d'aria
- Livello sonoro

OBIETTIVO

- Comfort Termico
- IAQ
- Prest. visive-illuminazione
- Prest. acustiche
- Produzione di energia


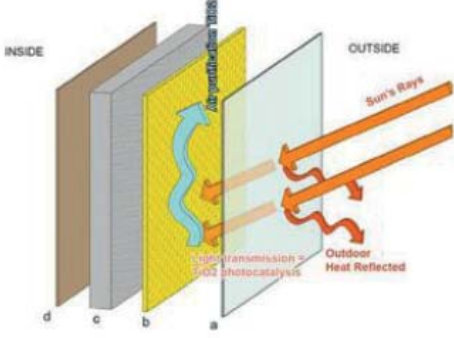
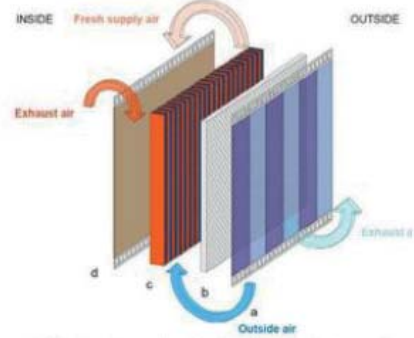
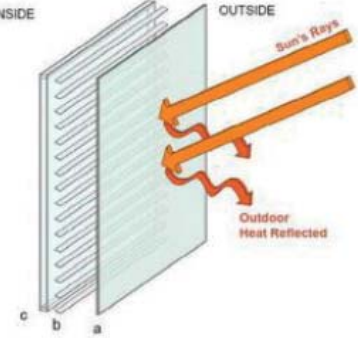
Valutazione di casi studio:



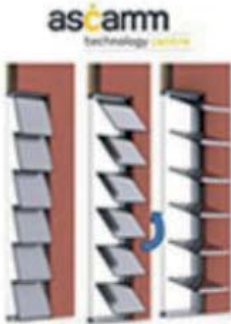

Nelle pagine seguenti i progetti precedentemente descritti sono stati raccolti sotto forma di tabella, con l'obiettivo di ottenere una visione più chiara dei loro vantaggi e svantaggi, ritenendo questo, un passaggio cruciale prima di determinare il sistema del progetto di ricerca. Sono stati presi in considerazione i seguenti criteri:

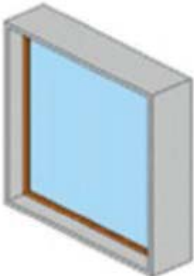
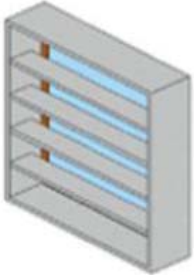

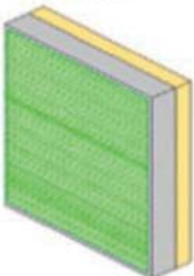
- La complessità del sistema non dovrebbe essere elevata;
- E' preferibile che le dimensioni e lo spessore dei materiali utilizzati siano ridotti al minimo;
- In termini di peso si raccomanda un sistema leggero;
- L'integrazione di elementi funzionali, come ad esempio cavi deve essere ben integrato;
- I costi in questione dovrebbero essere ragionevoli e sostenibili

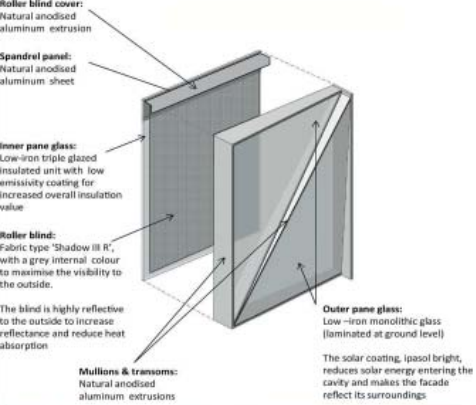


Tabella riepilogativa:

	Progetto	Vantaggi	Svantaggi
ACTRESS		<ul style="list-style-type: none"> • Ottimo isolamento termico. • Perdite di calore notevolmente basse. • Rappresenta oltre il 90% degli utili giornalieri complessivi. • La vetrata con veneziane Low-e è altamente performante, flessibile e adattabile. 	<ul style="list-style-type: none"> • Surriscaldamento del vetro aerogel • Temperature superficiali molto elevate • Nessuna possibilità di adattamento
		<ul style="list-style-type: none"> • Raccolta di energia; • Varie strategie di ventilazione (aria di mandata, barriera d'aria esterna, aria di scarico) e diverse modalità di ventilazione per l'inverno e l'estate (naturale, ibrido, meccanico, buffer termico); • Perdite di calore notevolmente basse; • L'attivazione passiva del PCM fornisce un'inerzia termica soddisfacente mantenendo basso il peso del modulo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Difficile da gestire; • Comportamento complesso di PCM; • Uso di liquidi; • Spessore.

	Progetto	Vantaggi	Svantaggi
ADPTIWALL		<ul style="list-style-type: none"> • Raccolta di energia; • Isolamento adattivo; • Chiusura di cemento leggero; • Ventilazione compatta; • Recupero di energia; 	<ul style="list-style-type: none"> • Tutto in un componente; • Complessità; • Spessore; • Uso di liquido.
SELFIE	 <p>Selfie_1: a. Glass layer with PVB and IR reflecting coatings; b. Honeycomb with TiO2; c. Foam glass with PCM; d. closure panel</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Trattamento autopulente; • Purificazione dell'aria; • PCM: aumento inerzia termica; • Vetro espanso: leggero; • Buone prestazioni termoigrometriche; • Elevata resistenza; • Diverse modalità di ventilazione permettono la riduzione del consumo di energia per riscaldamento, e la riduzione dei fenomeni di surriscaldamento; • Nido d'ape: minimizza quantità, peso e costo dei materiali. 	<ul style="list-style-type: none"> • Comportamento complesso del PCM; • Uso di liquido.
SELFIE	 <p>Selfie_2: a. Pv panels with air grids; b. Insulating panel; c. Heat exchanger; d. Closure panel</p>	<ul style="list-style-type: none"> • I pannelli fotovoltaici DSSC (Dye Sensitized Solar Cells) producono energia rinnovabile; • Risparmio energetico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso di liquido.
SELFIE	 <p>Selfie_3: a. Glass layer with PVB and IR reflecting coatings b. Air gap and shading device; c. Double glazing</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilità di integrare celle fotovoltaiche DSSC (Dye Sensitized Solar Cells) nello strato esterno per produrre elettricità; • Riduzione della trasmittanza termica; • Controllo della radiazione solare; • Miglioramento delle prestazioni acustiche. 	

	Progetto	Vantaggi	Svantaggi
BREASER	 <p>Combined solar thermal and PV envelope component</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Fornisce energia termica; • Riscalda l'aria di ventilazione dell'edificio; • Migliora la qualità dell'aria interna; • Nessuna manutenzione richiesta per i suoi 30 anni di vita; • Risparmio energetico; • Spostare il 20-50% del consumo di combustibile per riscaldamento e le corrispondenti emissioni di gas serra. 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso di liquido.
	 <p>Multifunctional lightweight ventilated façade module</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Eliminazione di impianti ausiliari HVAC; • Miglioramento della qualità dell'aria interna; • Un sistema fotovoltaico integrato per la generazione di elettricità 	
	 <p>Dynamic window with controlled air-tightness and insulated solar blinds</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tende solari isolate; • Regolazione automatica in base alla posizione del sole. 	<ul style="list-style-type: none"> • Vista limitata • Pulizia - manutenzione - riparazione; • Aspetto - estetica
	 <p>Multifunctional UHPFRC panels for envelope</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Leggero; • Scambio di calore e capacità di accumulo di calore ottimizzati. 	<ul style="list-style-type: none"> • Molto più costoso del calcestruzzo convenzionale

	Progetto	Vantaggi	Svantaggi
MeeFS	<p>GLAZING TECHNOLOGICAL UNIT</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Vista; • Apporti Solari. 	
	<p>SOLAR PROTECTION TECHNOLOGICAL UNIT</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Doghe mobili removibili; • Risparmio energetico; • Miglior comfort termico e visivo; • Molto efficace contro i guadagni solari. 	<ul style="list-style-type: none"> • Vista limitata • Pulizia - manutenzione - riparazione; • Aspetto - estetica
	<p>SOLAR THERMAL TECHNOLOGICAL UNIT</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Strato esterno semitrasparente; • Parete interna leggera ad alta inerzia; • Sistema di rivestimento controllabile; • Aperture inferiori e superiori con feritoie regolabili per la ventilazione della cavità. 	
	<p>GREEN FACADE TECHNOLOGICAL UNIT</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Migliora il comfort termico; • Mitigazione dell'effetto isola di calore urbana; • Protegge dalle radiazioni solari dirette; • Effetto di raffreddamento attraverso l'evaporazione; • Assorbimento del rumore; • Risparmio energetico; • Terra non necessaria. 	<ul style="list-style-type: none"> • Manutenzione

	Progetto	Vantaggi	Svantaggi
<p>Closed Cavity Facade CCF</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Risparmio energetico; • Comfort visivo; • Vetri altamente trasparenti; • Meno soggetto a danni e quindi bassi requisiti di manutenzione; • Nessun rischio di condensa nella cavità; • Niente polvere nella cavità / sporco dall'esterno. 	<ul style="list-style-type: none"> • Deve rimanere completamente sigillato; • Costante necessità di immettere aria secca e pulita nella cavità della facciata al fine di prevenire la formazione di condensa sui vetri.
<p>ETFE Multi-functional Module</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Raccolta di energia; • Fotovoltaico integrato e dispositivi di illuminazione a LED; • Funziona come sistema vetrato; • Modulo autonomo che fornisce alimentazione al LED. 	
<p>Living Wall Facade</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Leggero - sistema zero earth; • Riduzione del 90% del consumo di acqua; • Idroponica utilizzata per gli apporti di acqua e per la fertilizzazione; • Crescita resiliente: i semi crescono in loco; • Visivamente accattivante anche senza il verde. 	<ul style="list-style-type: none"> • Richiede fino a 2 mesi fino alla piena crescita; • Costi più elevati rispetto a una facciata verde; • Necessità di irrigazione; • Controllo del drenaggio e fertilizzazione da organizzare verticalmente; • Manutenzione.

**“Non progettare mai nulla, che non può essere realizzato”
Jean Prouvé**

4 Metodologia per la definizione di un involucro metallico energeticamente efficiente

- 4.1 Definizione degli obiettivi di ricerca e di progetto**
- 4.2 Definizione dei criteri per la classificazione delle località di analisi**
- 4.3 Definizione dei parametri di controllo per la progettazione degli strati funzionali**

4.1 Definizione degli obiettivi di ricerca e di progetto

Il progetto di ricerca è stato condotto nell'ambito di un dottorato "Eureka" e risulta concretizzarsi attraverso l'interazione università - impresa. Il bisogno di trasferimento dell'innovazione tecnologica della ricerca universitaria verso le imprese e con le imprese, la diffusione e la concretizzazione dei saperi, potrebbe essere la risposta per un dialogo proficuo rivolto verso una crescita reciproca.

La ricerca infatti, settore chiave per favorire la ripresa e lo sviluppo economico che ancora oggi risente della crisi finanziaria mondiale e recentemente messo a dura prova anche dall'emergenza sanitaria Covid-19, intende dare un supporto alla crescita del settore produttivo regionale, stimolare la forza innovativa delle piccole imprese e favorire la interdisciplinarietà permettendo di aumentare la loro capacità competitiva nel ambito del mercato concorrenziale di riferimento.

Per raggiungere gli obiettivi di sostenibilità e di ripresa economica definiti per il settore dell'edilizia, è necessario continuare a sviluppare nuovi sistemi, tecnologie e materiali da costruzione che possano agire sull'efficienza energetica degli edifici, migliorando le caratteristiche di comfort ambientale degli spazi interni e le condizioni degli utenti.

L'involucro dell'edificio svolge un ruolo chiave in questo processo. In particolare, sono considerate di primaria importanza le tecnologie in grado di gestire attivamente e selettivamente l'energia e il trasferimento di calore tra l'edificio e il suo ambiente esterno. L'involucro adattivo possiede diverse qualità: riduce in modo significativo il consumo di energia degli edifici, migliora la salubrità degli ambienti interni e ha un impatto positivo sul bilancio energetico dell'edificio grazie alla possibilità di integrare sistemi attivi di produzione dell'energia.

La caratteristica che rende unico l'involucro adattivo è la capacità intrinseca di adattare le proprietà termo-fisiche dell'intero sistema e dei suoi materiali, rispondendo in modo

reversibile alle condizioni a contorno transitorie esterne quali il clima ed interne quali gli occupanti. Questa risposta dinamica permette di gestire le innumerevoli richieste affidate all'involucro riducendo al minimo il consumo di energia dell'edificio.

Il progetto di un involucro adattivo efficiente è un processo di ricerca sperimentale poiché il grande potenziale tecnico e prestazionale descritte nelle numerose pubblicazioni scientifiche e nei test di prova non ha dato ancora seguito ad una rapida diffusione sul mercato dell'edilizia, ancora troppo legato, nella maggior parte dei casi, a sistemi costruttivi di tipo tradizionale.

La sperimentazione consiste anche nel fatto che ad oggi i risultati positivi ottenuti nei diversi prototipi realizzati ed applicati su edifici pilota, non consentono una conoscenza approfondita dei benefici, dei possibili rischi e dell'incapacità di misurarli in modo affidabile ed univoco.

Infatti, gli involucri adattivi degli edifici sono sistemi complessi che in genere attivano simultaneamente più fenomeni fisici, influenzando gli aspetti termo-igrometrici, luminosi, e quelli riguardanti la qualità dell'aria.

Rispetto alla maggior parte degli edifici con riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria (HVAC), le prestazioni globali delle costruzioni con facciate adattive sono in larga misura determinate dalle condizioni climatiche specifiche del luogo, dalle interazioni che avvengono sia tra gli occupanti che con gli altri sistemi costruttivi.

La progettazione e la simulazione di involucri adattivi devono rappresentare accuratamente una sequenza di stati (o proprietà) che variano nel tempo, anziché una rappresentazione statica dell'involucro dell'edificio. Per un'efficace previsione delle prestazioni di sistemi adattivi, è essenziale considerare contemporaneamente più livelli, in termini dimensionali, fattori temporali e caratteristiche fisiche. Rispetto all'analisi basata sulla simulazione di facciate statiche convenzionali, vengono identificati due principali requisiti aggiuntivi per la previsione delle prestazioni dei sistemi adattivi:

- Tener conto delle proprietà della facciata che variano nel tempo. Le specifiche della facciata (ovvero le proprietà del materiale o la posizione dei componenti) devono essere progettate in modo tale che non vi siano interferenze tra i diversi strati nel tempo, tenendo conto della risposta dinamica adattiva dovuta al trasferimento di calore transitorio e agli effetti di accumulo di energia nelle costruzioni di edifici.
- Progettare il funzionamento dinamico adattivo della facciata. Le prestazioni dei sistemi adattivi dipendono completamente dalle strategie di controllo necessarie per l'adattamento della facciata durante il suo funzionamento, dando origine a un'importante dipendenza reciproca tra aspetti di progettazione e di controllo. Pertanto, per identificare le caratteristiche dei sistemi di involucro adattivo ad alte prestazioni, si richiede, non solo di considerare aspetti legati alla progettazione dei singoli componenti, ma anche di approfondire adeguatamente le strategie operative automatizzate o quelle controllate dagli occupanti degli edifici. Per alcune applicazioni, è necessario valutare non solo il modo in cui l'elemento adattivo dell'edificio influisce sulle condizioni di comfort degli occupanti, ma anche come i singoli occupanti potrebbero voler controllare una specifica tecnologia dell'involucro edilizio adattivo. Per ottenere un funzionamento efficace del sistema dinamico di facciata inoltre, vanno controllate anche le integrazioni con gli altri sistemi che coinvolgono l'edificio. Ad esempio, si potrebbero ottenere significativi risparmi energetici sull'illuminazione artificiale, integrando il funzionamento dell'ombreggiatura dinamica del sole un sistema di attenuazione dell'illuminazione. Allo stesso modo, deve essere attentamente considerata l'integrazione tra sistemi HVAC e sistemi di energia rinnovabile.

Riprendendo la definizione di Loonen del 2013, il concetto di controllo degli involucri adattivi può essere suddiviso in due categorie: intrinseco ed estrinseco.

Il termine intrinseco indica che il meccanismo adattivo viene attivato automaticamente da uno stimolo (ad es. temperatura superficiale, radiazione solare, ecc.). Questa attitudine è incorporata nelle caratteristiche chimico-fisiche del materiale e il meccanismo di

metamorfosi è attivato da una variazione della sua energia interna. Questo tipo di controllo viene anche definito controllo "diretto", in quanto non è richiesto nessun intervento da parte di un sistema/utente esterno e pertanto nella letteratura scientifica questi materiali vengono definiti "intelligenti" (ad esempio, vetro termocromico, fotocromatico e PCM). Al contrario, estrinseco si riferisce alla presenza di un componente decisionale esterno in grado di innescare meccanismi adattativi secondo una regola di feedback. Questo tipo di controllo viene definito a circuito "chiuso" e le caratteristiche di intelligenza, non vengono attribuite al materiale, come nel caso precedente, ma al sistema che include il componente dell'involucro edilizio adattivo ed il suo controllo, (vetri elettro-cromici, dispositivi mobili di ombreggiamento, facciate cinetiche, ecc.)

Pertanto, un involucro di questo tipo, per il suo funzionamento, richiede un sistema di gestione e di controllo capace di rispondere in modo adattivo agli stimoli ricevuti attraverso sensori, processori e attuatori.

L'obiettivo di questa ricerca è focalizzato sulla progettazione di un sistema di involucro adattivo costituito prevalentemente da un meccanismo di controllo diretto, ovvero composto da materiali intelligenti in grado di rispondere autonomamente agli stimoli ricevuti. Il progetto prevede anche l'utilizzo, seppur in minima parte, di elementi di controllo di tipo chiuso, adottando sensori di rilevamento e applicando un'interazione con gli utenti, in particolare per quanto riguarda gli aspetti legati alla parte impiantistica necessari al riscaldamento, ventilazione e condizionamento degli ambienti interni (HVAC)

Stato dell'arte

Dopo aver analizzato, nei capitoli precedenti, lo stato dell'arte dei rivestimenti metallici e degli involucri edilizi, e con l'obiettivo di sviluppare un pannello metallico di facciata adattiva, è necessario, prima di procedere con la fase progettuale, conoscere ed approfondire le tecnologie e i prodotti che l'azienda Cantori Srl, partner di questo dottorato di ricerca, produce e commercializza, analizzandone eventuali limiti e potenzialità per sviluppo di un nuovo prodotto innovativo ed efficiente.

La Cantori è attiva da oltre 40 anni nel mercato dei laminati metallici, iniziando la sua attività con il capostipite Franco Cantori. Originariamente specializzata nella lavorazione di lamiere per conto terzi, nel tempo si qualifica nella distribuzione dei laminati metallici con particolare specializzazione nei metalli non ferrosi rivolti anche all'architettura. La piccola azienda familiare artigiana grazie anche al supporto decisivo di Giordano Cantori si è trasformata in pochi anni in SME azienda leader del suo settore. Negli anni ha ampliato la sua area geografica di riferimento da quella strettamente locale a quella europea ed internazionale.

Il reparto produttivo è dotato di impianti CNC concepiti secondo le più moderne tecnologie, in grado di soddisfare ogni possibile esigenza.

Le lavorazioni eseguite sono le seguenti:

- Spianatura lamiere fino a sp. 5,0 x 1.550 mm
- Taglio a misura
- Pelabilizzazione su uno o due lati
- Cesoiatura/Bandellatura/Quadrettatura
- Punzonatura
- Taglio Laser
- Pressopiegatura fino a 6,2 m di lunghezza
- Calandratura sia di alluminio che di materiali compositi
- Fresatura con due pantografi a controllo
- Saldatura
- Lavorazioni accessorie di finitura (arredamento)

La Cantori si propone come attrezzato centro servizi per la commercializzazione di lamiere in alluminio, ferro, e prodotti metallici per architettura offrendo alla propria clientela una vasta gamma di prodotti e qualificate lavorazioni accessorie, quali:

- lastre, quadrotti, bandelle, nastri e dischi, anche preverniciati ed anodizzati/ossidati, pelabilizzati su uno o due lati, tagliati a misura, ecc.
- lamiere decapate lamiere lucide lamiere zincate lamiere elettrozincate lamiere zincate preverniciate lamiere forate standard e a disegno personalizzabili lamiere ondulate e grecate.
- prodotti in alluminio grezzo: laminati in alluminio nelle leghe 1050, 5005, 5754 anche garantite per ossidazione; leghe serie 3000 e 5000 preverniciate; leghe 5005 preanodizzate; leghe 1050, 1200, 3105 e 5754 anche mandorlate e goffrate.
- ampia gamma di laminati e profili estrusi standard o a disegno, in leghe di qualsiasi genere.

L'azienda ha ideato e messo in produzione un sistema di facciata Rain Screen Cladding, denominato Tetris. Si tratta di una gamma completa di rivestimenti anti-pioggia per facciate, il cui principio di funzionamento, come già descritto nei capitoli precedenti, è di impedire la penetrazione dell'acqua piovana.

Il sistema è composto da uno strato di finitura esterna supportato da una intercapedine di aria progettata in modo tale da proteggere il paramento murario retrostante. La ridotta quantità di acqua che riesce a penetrare nell'intercapedine viene portata via attraverso la ventilazione.

Nella gamma sono inclusi:

- sistema a cassetta con aggancio rapido e sistema a doghe con fissaggio nascosto,
- sistema con pannelli piani e fissaggio a vista,
- sistemi con pannelli ondolati, grecati o rete metallica.

Tetris Flat ®:

Sistema di rivestimento con fissaggio a vista attraverso l'utilizzo di rivetti o viti, è adatto a rivestimenti con materiali di facciata perfettamente planari.

È una soluzione semplice ed economica ma interessante ed unica, grazie alla vasta gamma di materiali e finiture disponibili. L'azienda, infatti, può realizzarle con materiali compositi, lamiere metalliche, reti striate, pannelli a nido d'ape (honeycomb) e HPL. Inoltre può essere installata sia con orditura orizzontale che verticale.

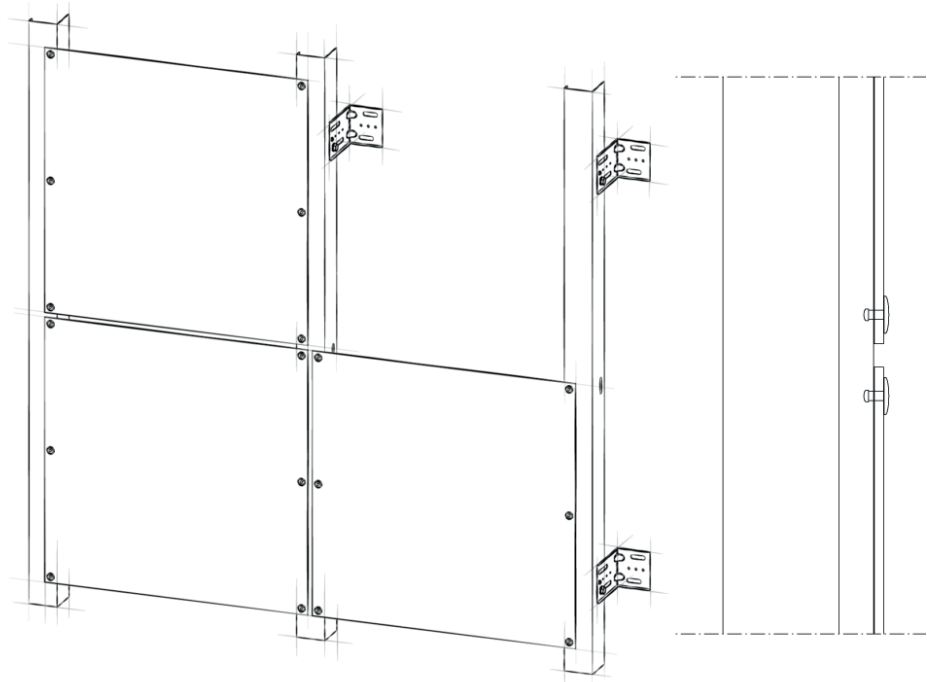


Figura 1. Sistema di rivestimento Tetris flat

Il sistema garantisce:

- Possibilità di utilizzare diversi materiali di rivestimento con uno spessore compreso tra 4 mm e 12 mm
- Tutti i pannelli possono essere rimossi e sostituiti in maniera indipendente e con il minimo sforzo
- Vasta gamma di colori, finiture e materiali disponibili
- Fissaggio a vista
- Installazione rapida per facciate con pannelli di diverse forme e dimensioni

Indicazioni dimensionali:

Larghezza minima: 200 mm

Larghezza massima: 1500 mm

Spessore del metallo: da 2mm a 12mm

Lunghezza massima: 17000 mm

Tetris Line ®:

Sistema di rivestimento con doghe metalliche dal fissaggio nascosto. Consente la creazione di rivestimenti lineari, personalizzabili grazie alla diversa gamma di laminati metallici, finiture, e lavorazioni applicabili.

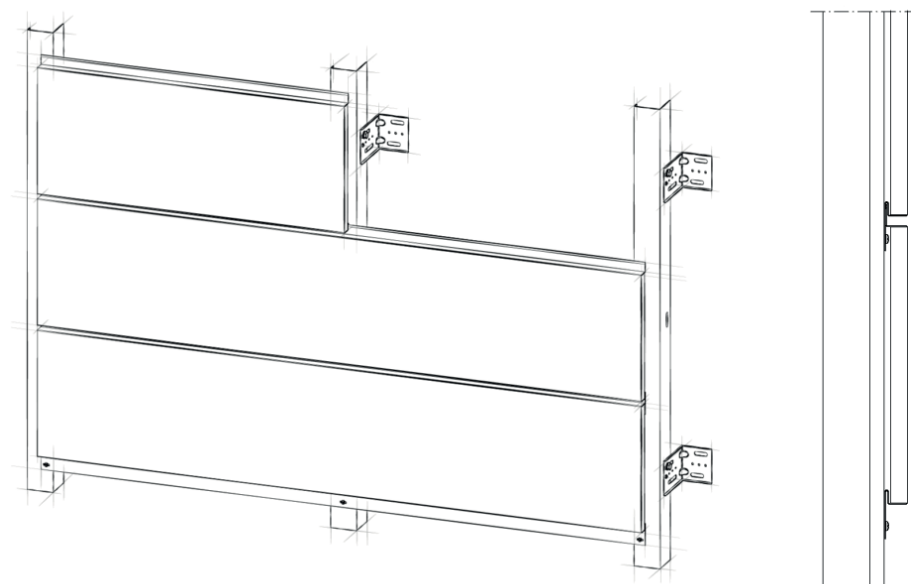


Figura 2. Sistema di rivestimento Tetris Line

Il sistema garantisce:

- Massima planarità
- Soluzione dal peso contenuto
- Estremità piegate o dritte
- Ampia gamma di colori
- Gamma completa di finiture
- Installazione in orizzontale e verticali
- Fissaggio nascosto
- Assemblaggio semplice e veloce

Indicazioni dimensionali:

Larghezza minima: 200 mm

Larghezza massima: 1500 mm
Spessore del metallo: da 2mm a 12mm
Lunghezza massima: 17000 mm

Tetris Step ® e Tetris Wave ®:

Il Tetris Step è un sistema di rivestimento con pannelli di lamiera grecati, con fissaggio a vista attraverso l'utilizzo di rivetti o viti. Il sistema Wave è simile allo Step, ma è realizzato con rivestimento di lamiera ondulata.

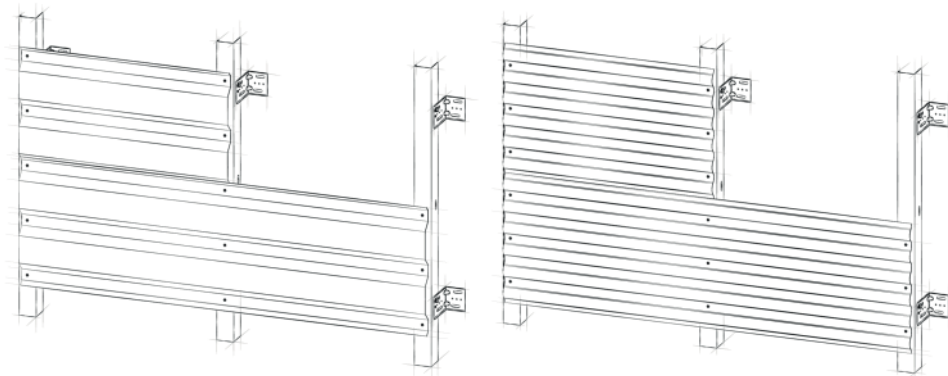


Figura 3. Sistema di rivestimento Tetris Step (sinistra) e Tetris Wave (destra)

Il sistema garantisce:

- Installazione del sistema con orditura orizzontale, verticale ed in obliquo
- Soluzione leggera e resistente
- Effetto 3d attraverso differenti profili
- Estetica elegante con prestazioni straordinarie e bassa manutenzione
- Ampia Gamma di metalli e finiture disponibili
- Fissaggio a vista
- Installazione dei pannelli facile e veloce

Indicazioni dimensionali:

Step:

C 35/190 950

C 40/183 915

Spessore del metallo: da 0,5 mm a 3,0 mm

Lunghezza standard: da 2000 mm a 6000 mm

Lunghezza massima: 6200 mm

Wave:

W 18/76 1064

W 27/111 1000

Spessore del metallo: da 0,5 mm a 1,2 mm

Lunghezza standard: da 2000 mm a 6000 mm

Lunghezza massima: 6200 mm

Tetris Mesh ®:

Il sistema di rivestimento composto da pannelli di lamiera stirata, rappresenta una soluzione originale per l'architettura. La scansione regolare di pieni e vuoti consente il passaggio di aria e luce.

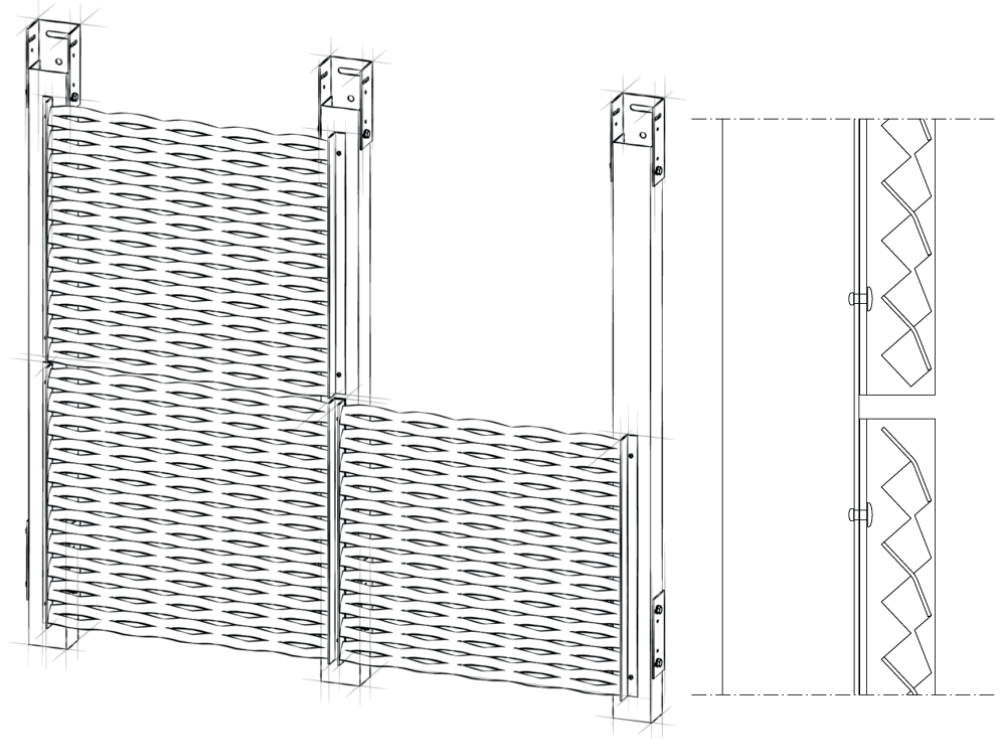


Figura 4. Sistema di rivestimento Tetris Mesh

Il sistema garantisce:

- Innumerevoli applicazioni
- Installazione orizzontale/verticale
- Differenti tipi di maglie e finiture
- Ampia gamma di colori disponibili
- Fissaggio a vista o intelaiato
- Installazione facile e veloce

Indicazioni dimensionali:

Diagonale lato lungo: da 10 mm a 250 mm

Diagonale lato corto: da 7 mm a 83 mm

Spessore: da 1 mm a 3 mm

Spazio di apertura %: da 3% a 55%

Tetris Edge ®:

Si tratta del sistema più evoluto ideato dall'azienda, che consiste in un rivestimento a cassetta con aggancio rapido: è la soluzione ottimale per facciate di grandi dimensioni che richiedono un'attenzione particolare alla planarità.

L'utilizzo del principio di aggancio dei pannelli attraverso cavallotti, è possibile una veloce e sicura installazione dei pannelli che possono essere realizzati in materiale composito o lamiera metallica.

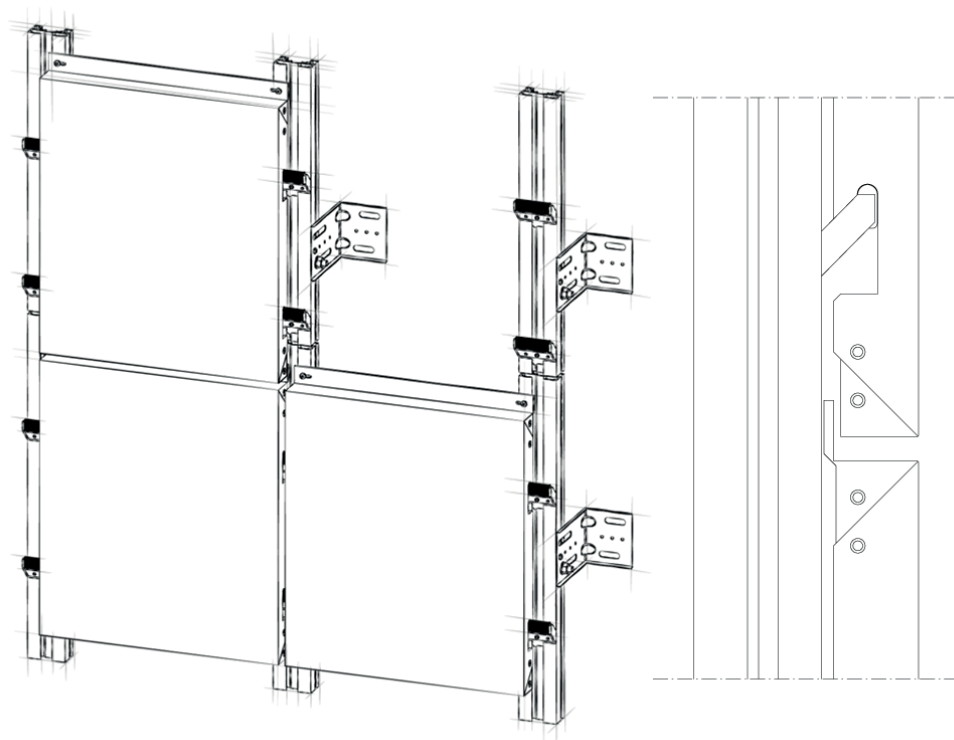


Figura 5. Sistema di rivestimento Tetris Edge

Indicazioni dimensionali:

Larghezza minima: 500 mm

Larghezza massima: 1400 mm

Spessore del metallo: da 2mm a 3mm

Spessore del composito: 4mm

Lunghezza massima: 17000 mm

Lo spessore necessario dipende dalla larghezza e dalla lunghezza delle cassette:

500mm x 1000mm -> spessore 2 mm o 3 mm

1000mm x 2000mm -> spessore 2 mm o 3 mm

1400mm x 5000 mm -> spessore composito metallico 4mm

Per ogni tipologia di facciata, Cantori ha sviluppato diversi sistemi di sottostruttura (ConneX®), in grado di supportare differenti finiture e materiali, quali acciaio e alluminio, cercando di soddisfare le esigenze specifiche di ogni progetto.

ConneX® Easy L – ConneX® Easy C – ConneX® Easy Ω:

E' una gamma di sottostrutture progettate specificamente per il rivestimento di facciata. Offre la massima flessibilità di applicazione in diversi progetti architettonici anche grazie all'uso di differenti materiali di rivestimento. Si tratta di profili di acciaio galvanizzato disponibili anche in acciaio inox e alluminio.

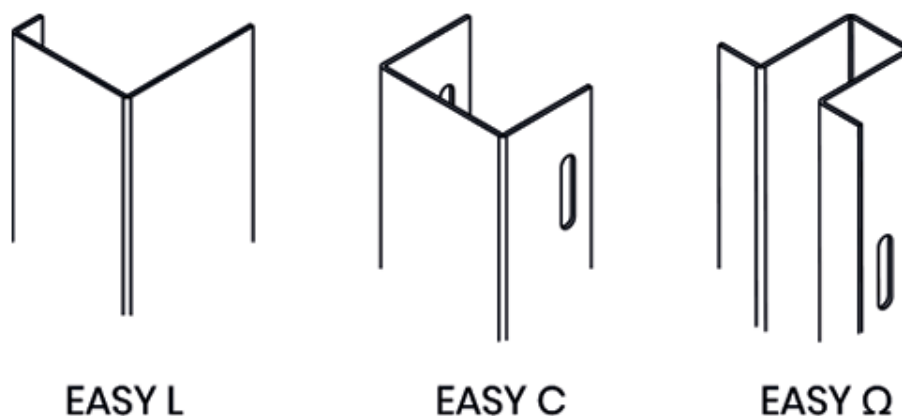


Figura 6. Sistema di sottostruttura ConneX Easy L, C, Ω

Caratteristiche Principali:

- Lunghezza massima fino a 4000 mm
- La forza dell'acciaio zincato
- Progettato per sistema di fissaggio diretto
- Resistenza meccanica anche per bassi spessori
- Diversi modelli ingegnerizzati con diverse sezioni
- Economico
- Design garantito per essere invisibile sotto il pannello della facciata

* Disponibile in diversi profili (L | C | Ω)

ConneX® Standard e ConneX® Strong

E' una gamma di sottostrutture progettate specificamente per il rivestimento di facciata, che offre la massima flessibilità di applicazione in diversi progetti architettonici anche grazie all'uso di differenti materiali di rivestimento. Si tratta di profili estrusi in lega di alluminio 6060

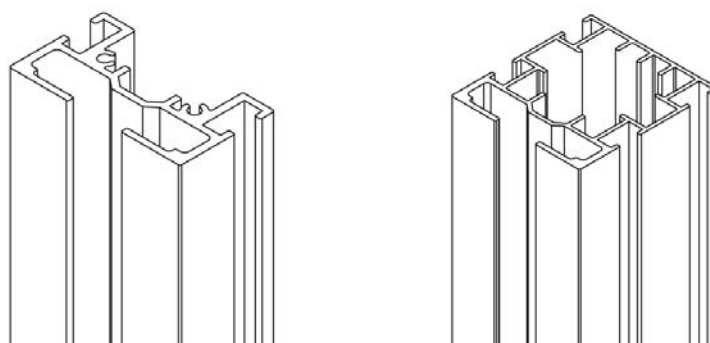


Figura 7. Sistema di sottostruttura ConneX® Standard e ConneX® Strong

Caratteristiche Principali ConneX Standard:

- Appositamente progettato per ottenere la massima rigidità strutturale, per essere versatile e per ridurre il peso
- Lunghezza massima fino a 6200 mm
- Ingombro ridotto ed elevata resistenza meccanica
- La leggerezza della lega di alluminio
- Staffe e fissaggi regolabili per facilitarne l'installazione
- Disponibile versione orizzontale (con sistema di fissaggio speciale)
- A richiesta, anodizzato e verniciato

Caratteristiche Principali ConneX Strong:

- Specificamente progettato per esigenze strutturali più elevate e per supportare una maggiore sporgenza
- Doppia possibilità di fissaggio (con cavallotti nella parte anteriore | Fissaggio diretto nella parte posteriore)
- Lunghezza massima fino a 6200 mm
- Ingombro ridotto ed elevata resistenza meccanica
- La leggerezza della lega di alluminio
- Staffe e fissaggi regolabili per facilitare l'installazione
- Disponibile versione orizzontale (con sistema di fissaggio speciale)
- A richiesta, anodizzato e verniciato

I sistemi di sottostruttura ConneX sono fissati direttamente su pareti piene tramite speciali staffe in acciaio zincato o acciaio inossidabile. Disponibili in diverse dimensioni, sono utili per un facile e rapido livellamento del rivestimento.

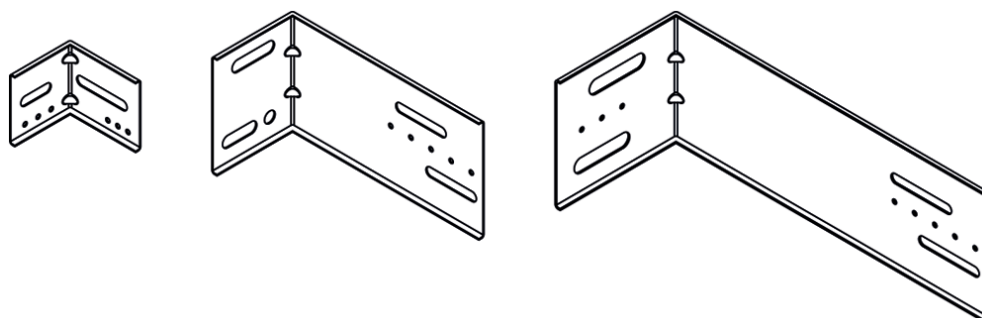


Figura 8. Staffe di connessione con il sistema di sottostruttura ConneX®

I materiali metallici come rivestimenti di facciate architettoniche hanno avuto uno sviluppo esponenziale tra la fine degli anni '80 e l'inizio degli anni '90. L'azienda Cantori, ha saputo intercettare questa nuova richiesta ricavandosi una fetta di mercato importante anche a livello internazionale, contribuendo alla realizzazione di importanti opere in Italia ed nel mondo.

La necessaria esigenza di ridurre i consumi energetici degli edifici, attraverso anche l'involucro edilizio, ha spinto la Cantori ed avviare un processo evolutivo aziendale.

Lo sviluppo di nuovi scenari, l'esigenza di sperimentare nuovi sistemi di facciata, tecnologie e materiali innovativi, spinge l'azienda Cantori srl ad interagire con il mondo accademico e della ricerca, per mettere sul mercato un prodotto industriale, un componente edilizio di facciata, che sappia adattarsi ai diversi contesti di applicazione, garantisca livelli di qualità estetici, prestazionali e possa ricercare nell'innovazione un valore determinante allo sfruttamento dei possibili vantaggi competitivi.

Da pochi anni, la Cantori Srl fa parte di un consorzio di piccole e medie imprese per la

produzione, commercializzazione di sistemi in alluminio per finestre, porte e facciate di alta qualità. Questo ha permesso all'azienda di gettare le basi per coprire tutto il mercato legato al settore dell'involucro edilizio, aggiungendo ai già collaudati sistemi opachi di rivestimenti metallici anche componenti architettonici trasparenti.

Il gruppo nasce dall'unione di 11 aziende di settore, per creare e promuovere innovazione, controllare la qualità della produzione di serramenti ad alto livello di sostenibilità e garantire ampia accessibilità al comfort termico degli edifici.

Il rivestimento rain sceening, attualmente prodotto e distribuito dall'azienda, può essere facilmente convertibile in un sistema di facciata ventilata e isolata termicamente, con l'obiettivo di ottenere un prodotto che punti all'efficienza energetica degli edifici.

Il sistema multistrato può essere realizzato sia con pannelli trasparenti che opachi, connessi al paramento murario esistente attraverso l'utilizzo della struttura metallica di supporto ConneX®, che consente l'installazione a "secco" degli elementi di rivestimento, sfruttando ancoraggi di tipo meccanico e lasciando una camera d'aria tra il paramento murario e lo stato di rivestimento esterno. Si dovranno, inoltre, prevedere delle prese di ventilazione, adeguatamente dimensionate, di ingresso e di uscita del flusso di aria. Questo consente di ottenere una maggiore traspirabilità dell'edificio e, unitamente al materiale isolante, ridurre la dispersione di calore in inverno ed evitarne il surriscaldamento in estate.

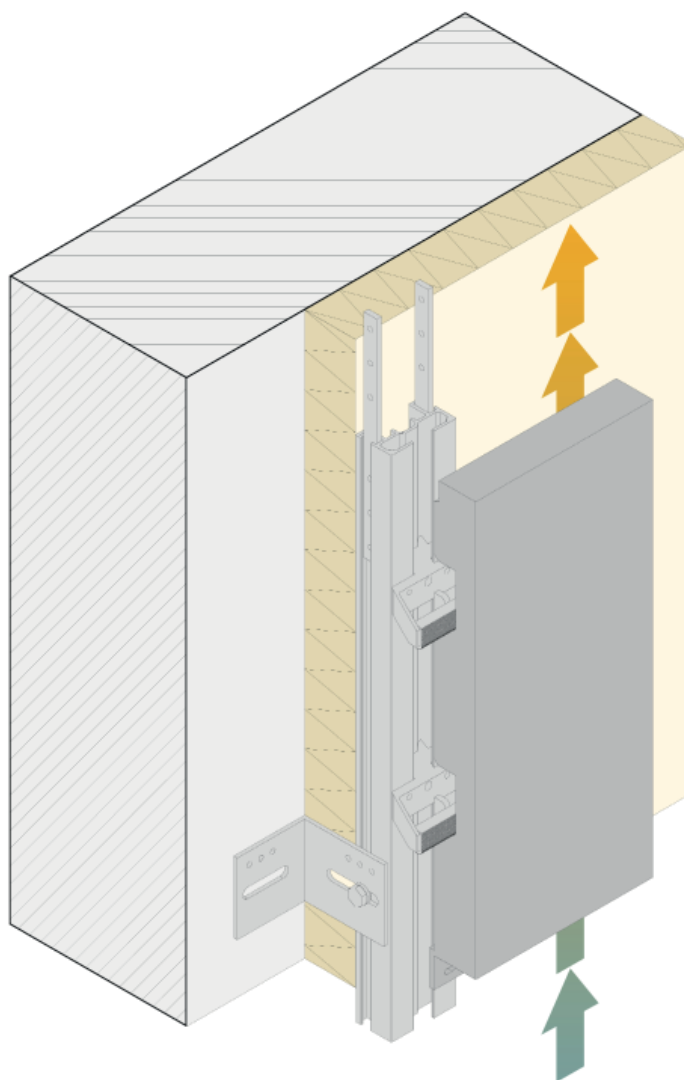


Figura 9. Sistema di sotto-struttura ConneX® adattabile a diventare una facciata ventilata opaca

Risultati attesi

L'idea di trasformare il sistema rain screening della Cantori in facciate ventilate energeticamente efficienti, è un primo passo indispensabile da compiere nell'ottica dell'evoluzione sostenibile compiuta nel settore delle costruzioni. Si tratta di un "cambiamento" relativamente economico e facilmente applicabile in progetti di nuova costruzione, ma anche e soprattutto in quelli di riqualificazione energetica.

Il prodotto oggetto della presente ricerca, vuole rappresentare un ulteriore passo in avanti nell'innovazione sostenibile del sistema di facciata, ma vuole altresì essere realizzabile con piccole rinnovamenti nella catena di produzione attualmente presente in azienda, ed essere, comunque, un prodotto innovativo facilmente commercializzabile nell'arco dei prossimi anni.

I principi ordinatori che hanno accompagnato lo sviluppo del concept del componente di facciata adattiva possono essere identificati come risposta ai seguenti temi di ricerca:

- Definizione di un componente di involucro a secco coerente con la gamma prodotti attualmente fabbricati e commercializzata dall'azienda Cantori e realizzabile attraverso un contenuto investimento iniziale;
- Definizione di nuove soluzioni di involucro adattivo, capaci di favorire la riduzione dell'impatto ambientale dei sistemi costruttivi edilizi, attraverso l'utilizzo di materiali durevoli e componenti caratterizzati da un ciclo di vita sostenibile;
- Progettazione di un componente di involucro a secco, multifunzionale di tipo leggero, con massa frontale inferiore ai 150kg/m²;
- Integrazione architettonica di un sistema di involucro edilizio complesso capace di garantire illuminazione naturale, comfort termico, produzione di energia, ecc, oltre naturalmente alle funzioni basilari di protezione dall'acqua e di controllo della temperatura;
- Sviluppo di un sistema modulare che permetta soluzioni architettoniche variabili e configurabili in relazione alle necessità estetiche e prestazionali e che garantisca una continuità geometrica alla facciata;
- Possibilità di integrare sistemi per la produzione di energia rinnovabile negli elementi d'involucro;
- Capacità di garantire prestazioni termo igrometriche variabili in relazione al clima esterno.

Per concludere, la necessità di sviluppare un sistema di facciata capace di garantire prestazioni energetiche flessibili e adeguate alle condizioni climatiche esterne, ha condotto la ricerca ad indagare la tematica dei sistemi di facciata adattiva modulare installata a secco, sviluppando un nuovo componente di chiusura verticale, con sottomoduli di differenti funzioni combinabili e facilmente assemblabili tra loro. Un componente di facciata unitario prefabbricato e standardizzato adatto per edifici di nuova costruzione e riqualificazione edilizia, prevalentemente commerciali e ad uso uffici, ma installabile anche in edifici residenziale di buona qualità.

Il sistema dovrà contribuire, in modo efficace e sostanziale, a ridurre la domanda di energia primaria, contribuendo in attivamente alla realizzazione di edifici a energia quasi zero, e rispondendo in modo adeguato e veloce alle crescenti esigenze e alle sfide tecnologiche in atto. Dovrà inoltre diventare, nel giro di pochi anni, un prodotto innovativo ma allo stesso tempo competitivo nel panorama dei sistemi di facciata efficienti presenti nel mercato.

4.2 Definizione dei criteri per la classificazione delle località di analisi

Ai fini analizzare le prestazioni energetiche del componente oggetto di studio attraverso simulazioni e analisi di tipo prestazionali, basate su parametri connessi alle differenti situazioni climatiche, risulta necessario determinare le caratteristiche meteorologiche più significative (weather analysis) di alcune località campione definendo un modello climatico su base oraria, riferito ad un anno "tipo".

Per questa classificazione si è partiti dalla pubblicazione di Viviani N. *"Design di involucri ad alta efficienza energetica: Caratterizzazione "Low-energy" per il settore turistico-ricettivo"* che servendosi del software METEOTEST Meteororm, definisce i files climatici contenenti le caratteristiche coordinate delle grandezze termiche, igrometriche ed energetiche, delle seguenti località: Milano, L'Aquila, Ascoli Piceno, Pescara, Bolzano, Lecce, Agrigento, Tropea e Gressoney-Saint Jean.

Una volta sviluppato il file climatico sarà possibile impostare i successivi criteri di classificazione delle località stesse:

- 1) criterio geografico
- 2) criterio di classificazione energetica
- 3) criterio di classificazione in base alla curva termica annuale.
- 4) Criterio di classificazione in base al fabbisogno di riscaldamento invernale.

Il criterio geografico suddivide le località in base alla latitudine, altitudine e caratteristiche ambientali (mare, lago, esposizione, fondovalle, centro urbano ecc.).

Il criterio di classificazione energetica si basa su una prima sintesi dei principali aspetti legati alla classificazione del clima in relazione alle variabili macroscopiche delle aree climatiche continentali e sub-continentali, indipendentemente dalle variazioni imputabili all'andamento locale delle grandezze principali (Koppen-Geiger).

In questo criterio vengono prese in considerazione la temperatura media annuale l'escursione media annuale, parametri attraverso i quali è possibile collocare una località all'interno di una delle seguenti regioni climatiche ideali:

- a) climi montano freddo con temperatura del mese più caldo sempre inferiore a 10°C;
- b) climi microtermici con inverno secco o umido con temperatura del mese più freddo inferiore o uguale a -1 ÷ -2°C;
- c) climi mesotermici temperato umido con temperatura del mese più freddo compresa tra 2°C e 15°C;
- d) clima caldo secco caratterizzato da assenza di precipitazioni per più di sei mesi all'anno;
- e) clima caldo umido caratterizzato da precipitazioni per almeno sei mesi e temperature del mese più freddo superiore a 15°C.

Il **criterio di classificazione in base alla curva termica annuale** prevede la valutazione di due condizioni di riferimento, relative al mese più freddo e al mese più caldo, in base alla temperatura media mensile. Per entrambi i casi si considera la combinazione delle condizioni ambientali di temperatura media mensile in relazione ai valori della temperatura di comfort degli ambienti interni: 20°C in inverno e 28°C in estate.

Per il seguente studio la classificazione avverrà tenendo conto delle seguenti condizioni:

- temperatura media riferita al mese più freddo e al più caldo;
- temperatura minima assoluta riferita al mese più freddo e massima al più caldo;
- durata del soleggiamento;
- valore della radiazione solare globale nel mese più freddo e nel più caldo per le principali orientazioni ed esposizioni.

Il **criterio di classificazione in base al fabbisogno di riscaldamento invernale** è stato condotto attraverso il dato sintetico dei G.G. (gradi giorno)¹.

I comuni italiani sono classificati in sei zone climatiche, individuate dal D.P.R. 412/93 sulla base del numero di gradi giorno, secondo quanto riportato nella Figura 1 che mostra la distribuzione delle diverse zone climatiche sul territorio nazionale.

¹ Per gradi giorno di una località si intende la somma estesa a tutti i giorni di un periodo annuale convenzionale di riscaldamento delle sole differenze positive giornaliere tra la temperatura dell'ambiente assunta pari a 20°C e la temperatura esterna media giornaliera (GG)

Zona climatica	Gradi giorno	Alcuni esempi	Periodo di riscaldamento
F	oltre 3000	Trento, Belluno, Cuneo	nessun limite (tutto l'anno)
E	da 2101 a 3000	Milano, Torino, Bologna	15 Ottobre - 15 Aprile
D	da 1401 a 2100	Roma, Firenze, Genova, Ancona	1 Novembre - 15 Aprile
C	da 901 a 1400	Napoli, Bari, Cagliari	15 Novembre - 31 Marzo
B	da 601 a 900	Catania, Palermo, Reggio Calabria	1 Dicembre - 31 Marzo
A	fino a 600	Lampedusa, Linosa, Porto Empedocle	1 Dicembre - 15 Marzo

Figura 1. Zonizzazione climatica dei comuni italiani ai sensi del D.P.R. 412/93

In base a tale classificazione sono definiti peraltro i periodi delle stagioni di riscaldamento: ad esempio la zona C va dal 15 novembre al 31 marzo, la D dal 1 novembre al 15 aprile e la zona E dal 15 ottobre al 15 aprile. Sulla base di tali periodi sono ufficialmente accesi e spenti gli impianti di riscaldamento, è determinato l'orario di accensione degli stessi e valutati i consumi energetici a scopo di certificazione.

ZONA CLIMATICA	GRADI GIORNO (GG)	NUMERO DI COMUNI	POPOLAZIONE RESIDENTE	% POPOLAZIONE RESIDENTE
A	GG ≤ 600	2	22.989	0,04%
B	600 < GG ≤ 900	157	3.176.382	5,33%
C	900 < GG ≤ 1.400	989	12.657.407	21,25%
D	1.400 < GG ≤ 2.100	1.611	14.970.952	25,13%
E	2.100 < GG ≤ 3.000	4.271	27.123.848	45,53%
F	GG > 3.000	1.071	1.619.003	2,72%

Tabella 1. Numero di comuni italiani per zona climatica e "gradi giorno"

E' stata effettuata una rielaborazione dei dati ISTAT relativi al 15° Censimento della popolazione e delle abitazioni 2011 (ISTAT, 2016) volta ad analizzare la distribuzione statistica assoluta (Tabella 1) e percentuale (Figura 2) del numero di comuni, del numero di abitanti e del numero di edifici residenziali per ciascuna zona climatica.

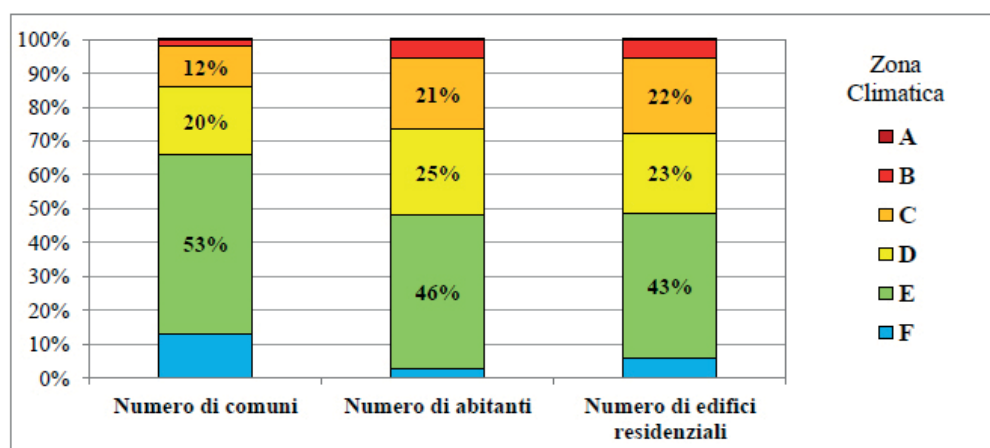


Tabella 2. Distribuzione percentuale del numero di comuni, abitanti ed edifici residenziali per zona climatica

Restringendo l'esame dei dati alle sole zone climatiche, C, D ed E, ovvero quelle con maggiore perso specifico, possiamo notare come la somma delle tre raccolgono la maggior parte dei comuni (85%) e della popolazione italiana (92%).

Emerge inoltre, come in zona E ci siano più della metà dei comuni italiani (53%) e come in termini assoluti, siano collocati il maggior numero di abitanti (46%) e di edifici residenziali (43%).

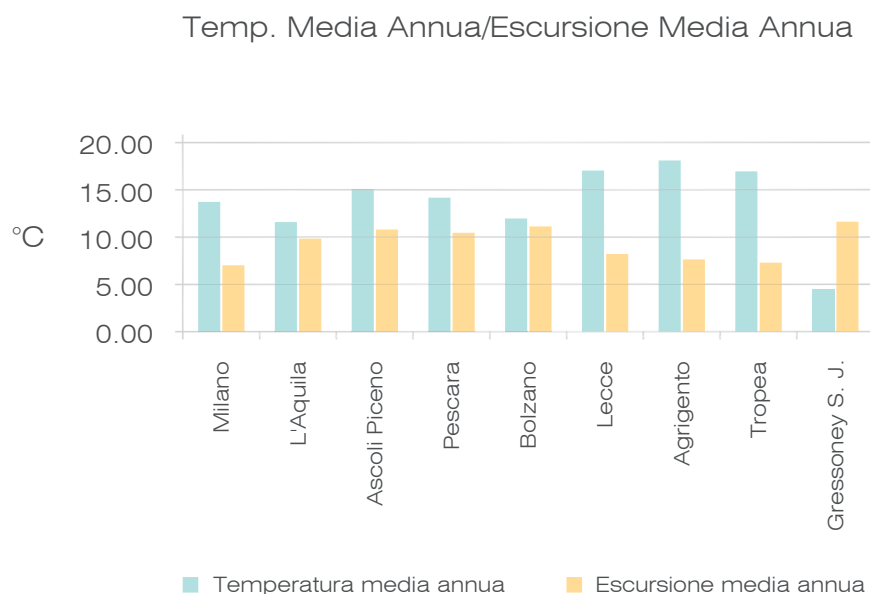
A seguito di quest'analisi, si può pertanto affermare che le zona E, visto il suo enorme impatto, si candida ad essere una delle zone ideali dove effettuare le simulazioni di studio.

Da un punto di vista climatico, l'estensione in latitudine dell'Italia fa sì che si vada dal clima subtropicale mediterraneo al Sud (con temperature estive che possono superare i 40°C), al clima temperato continentale delle regioni settentrionali (dove si possono avere temperature minime invernali che raggiungono i -20°C). Queste differenze portano ad una grande variabilità del clima, testimoniata dall'estensione dei "gradi giorno", che vanno dai 568 di Lampedusa (provincia di Agrigento) ai 5.165 di Sestriere (provincia di Torino). Anche il valore della radiazione solare globale incidente sulla superficie orizzontale risente delle diverse latitudini presenti in Italia, variando dai 1.214 kWh/m² di Ahmtal (provincia di Bolzano) ai 1.679 kWh/m² di Pachino (provincia di Siracusa), con una media di 1.471 kWh/m² (0,127 tep/m²). Questi dati evidenziano le particolarità climatiche del nostro Paese e la complessità nel definire, in modo univoco, standard e soluzioni

costruttivo/impiantistiche che possano adattarsi alle diverse condizioni.

La progettazione e la realizzazione degli interventi necessitano quindi di grande attenzione da parte dei tecnici e, ai fini del raggiungimento degli obiettivi di risparmio energetico previsti dalle normative, devono essere coinvolti tutti gli attori della filiera, compreso l'utente finale.

Ai fini della progettazione del componente oggetto di ricerca è necessario effettuare simulazione di calcolo in regime dinamico, definendo le condizioni al contorno climatiche attuali che caratterizzano le località oggetto di studio.



Graf. 1: Grafico della temperatura media annua e dell'escursione termica

L'analisi della temperatura media annuale (grafico 1), permette una prima valutazione delle caratteristiche climatiche di alcune diverse località della nostra penisola.

In Italia, la maggior parte delle località ha una temperatura media annua inferiore o uguale ai 16 °C, gli unici siti ad avere una media superiore sono Lecce, Agrigento e Tropea. Nelle aree collinari del sud e del centro e nelle aree di transizione tra collina e montagna si registrano temperature medie annue comprese tra i 12 e i 16°C, tra le quali Milano, Ascoli Piceno e Pescara. Le temperature medie annue inferiori ai 12°C sono invece tipiche dei centri collocati sulla dorsale appenninica o sulle prealpi e valli alpine, come rispettivamente L'Aquila e Bolzano. Temperature medie annue inferiori a 5°C sono caratteristiche di località dell'arco alpino poste ad altitudini superiori a 1.000 m s.l.m.

Nel tabella 3 sono inoltre riportati i valori annuali relativi all'escursione media annua, i quali evidenziano un differenziale di variazione superiore ai 5-7°C con la sola eccezione da segnalare la località alpina Gressoney-Saint Jean che è l'unica ad avere una temperatura media annua inferiore all'escursione media annuale.

Il confronto tra questi valori permette di leggere in modo indiretto, gli effetti macroclimatici indotti dalla presenza di centri urbani di media o elevata dimensione.

Infatti nelle aree urbane più grandi si segnalano temperature più elevate a causa di diversi fattori, tra i quali la ridotta perdita di calore per effetto radiante nelle ore notturne e il minor scambio convettivo causato dalla scarsa ventilazione urbana. Queste condizioni ed altre, danno luogo ad un particolare fenomeno microclimatico definito come isola di calore urbana. Questo effetto è generalmente caratterizzato da una correlazione positiva tra la temperatura e il numero di abitanti e la densità edilizia di una città. Nei centri urbani maggiori, l'escursione media annua è ridotta ad un valore di 5-7°C, mentre nelle

situazioni di medie dimensioni l'escursione è intorno ai 10-11°C.

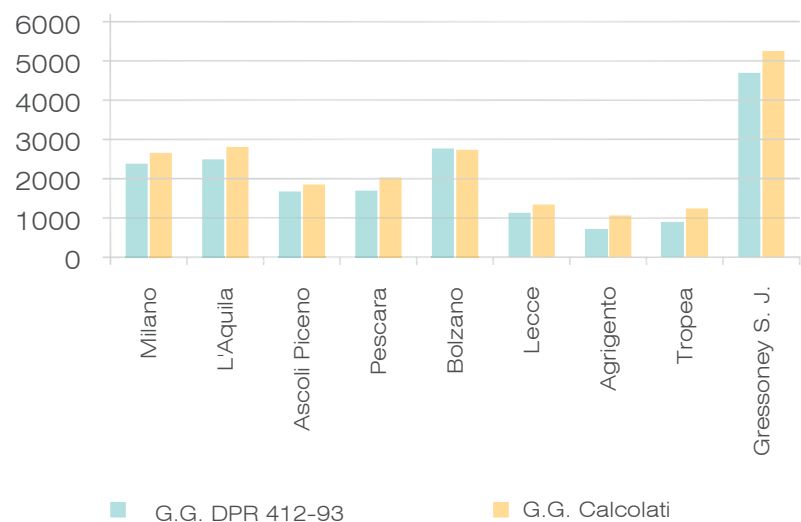
Il valore dell'escursione media annua è determinante per la corretta progettazione del livello di isolamento termico negli edifici.

Come definito in precedenza, il calcolo dei gradi giorno avviene attraverso la sommatoria delle sole differenze positive fra la temperatura di riferimento per il comfort interno fissata a 20°C, rispetto alla temperatura media giornaliera esterna, calcolata tutti i giorni dell'anno nei quali la temperatura media è inferiore ai 15°C.

$$GG = \sum_{E=1}^n (T_A - T_E)$$

Dove T_A indica la temperatura dell'ambiente interno fissata a 20°C, T_E la temperatura esterna media giornaliera ed n il numero di giorni del periodo convenzionale di riscaldamento. Va ricordato che ai fini del calcolo dei Gradi Giorno vanno considerate le sole differenze positive, quindi la sommatoria è valida per $T_E \leq T_A$ impostando come condizione $T_E < 12^\circ\text{C}$.

Conronto G.G. (DPR 412-93) / G.G. Calcolati



Graf. 2 : Confronto tra i gradi giorno ripresi dal DPR 412/93 e i Gradi giorno calcolati con modello climatico

Il grafico 2 riportata mostra il confronto tra i valori ufficiali contenuti nel D.P.R. 412/93, ed in base al quale è stata fatta la classificazione climatica di tutti i comuni italiani, ed un calcolo più dettagliato prodotto attraverso definizione di un modello climatico riferito per ciascuna delle località di riferimento.

Ad una prima analisi i valori sembrano concordanti, quindi validi per un calcolo preliminare del fabbisogno di energia di riscaldamento di un edificio.

Grazie a questo parametro si riscontra una sostanziale differenza tra le località più calde e quelle più fredde; infatti un basso numero di gradi giorno, corrisponde ad ridotto periodo di riscaldamento e quindi una temperatura media esterna prossima a quella di comfort interno (20°C). Al contrario un elevato numero di gradi giorno richiede un periodo prolungato di riscaldamento, da ciò ne consegue che la temperatura media esterna è di molto inferiore a quella interna (20°C).

Da un analisi della (tabella 3) si evince che Lecce, Agrigento e Tropea richiedono uno

scarso fabbisogno di riscaldamento (GG tra 800 e 1.100), Ascoli Piceno e Pescara necessitano di una richiesta medio bassa (GG inferiori a 2000) invece Bolzano, l'Aquila e Milano (Figura 2), medio alta, con GG compresi tra 2.000 e 3.000. Infine una domanda energetica alta per le località temperate fredde comprese tra 4.800 e 5.200 GG, come Gressoney-Saint Jean.

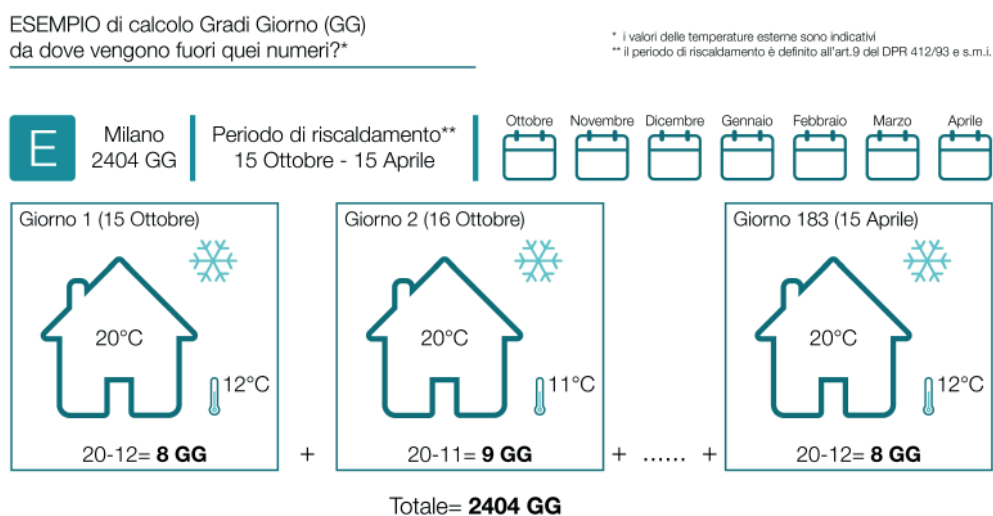


Figura 2. Esempio di calcolo di gradi giorno per la città di Milano.

Il parametro dei gradi giorno permette, dunque, una stima rapida del fabbisogno di riscaldamento in base al volume dell'edificio e alla sua caratteristica d'isolamento, oltre che una valutazione indiretta sull'utilizzo di tecnologie, materiali e fonti rinnovabili utili al miglioramento degli involucri edilizi.

Di seguito verranno messi a confronto i seguenti valori riferiti alle località prescelte:

- Temperatura media nel mese freddo
- Radiazione solare media sulla superficie orizzontale nel mese freddo
- Temperatura media del mese caldo
- Radiazione solare media incidente sulla superficie orizzontale nel mese caldo.

Lo scopo è quello di definire le basi e le caratteristiche per un involucro metallico "ideale" e determinare i parametri climatici necessari per le simulazioni di calcolo energetico.

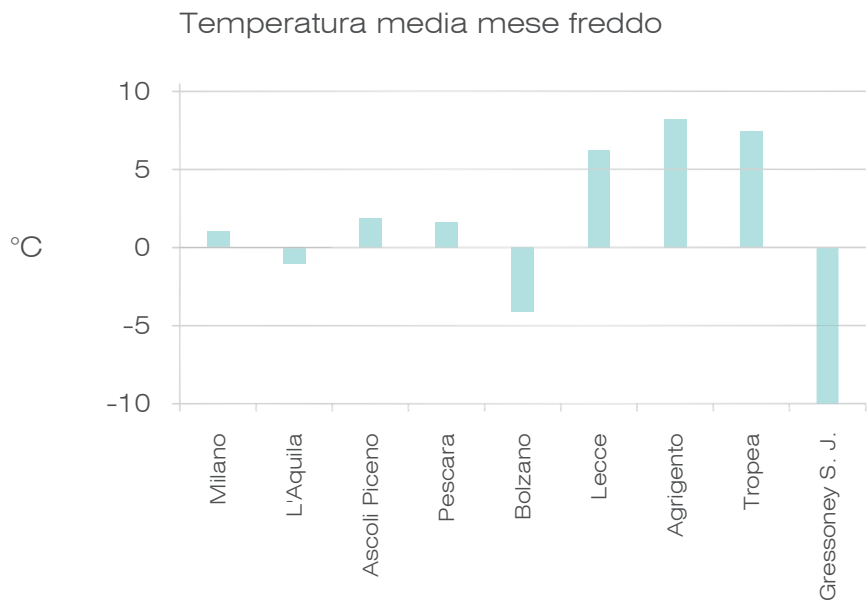
Per quanto riguarda la temperatura media del mese più freddo (grafico 3), si evidenzia come in tre delle località campione la temperatura media mensile si trovi al di sotto dei 0°C, in particolar modo quelle poste sulla dorsale appenninica (l'Aquila) e sulle valli alpine (Bolzano), nelle quali si registrano valori compresi tra -1 e i -4°C. Nel caso invece della località alpina di Gressoney-Saint Jean, il valore della temperatura media del mese più freddo si trova al di sotto dei -10°C.

Valori compresi tra 0 e 2°C si registrano nelle zone temperate di transizione tra collina e montagna, come Milano Ascoli Piceno e Pescara

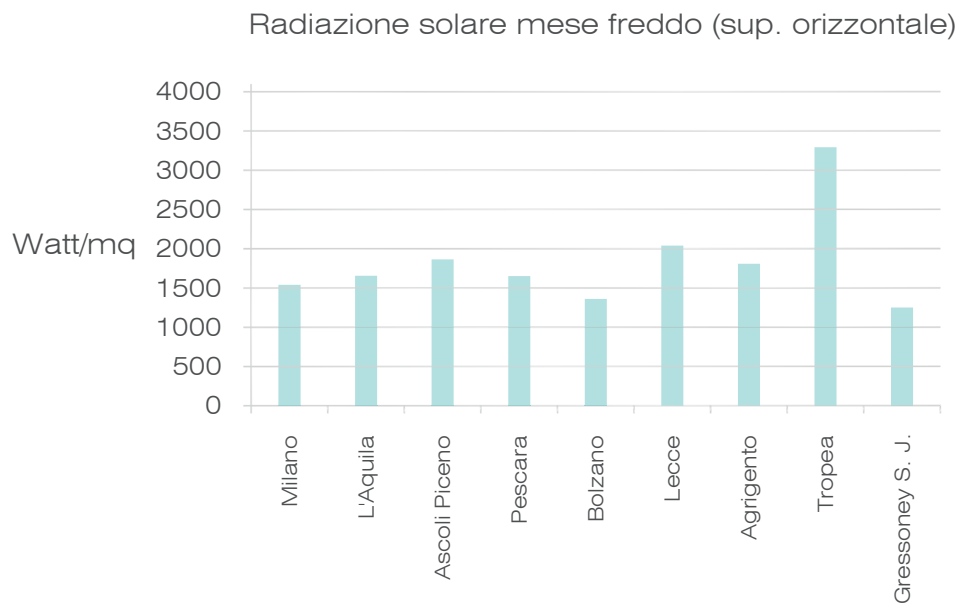
Lecce Agrigento e Tropea risultano avere temperature più calde, superiori a 6°C

La radiazione solare nel mese più freddo (grafico 4), non presenta sostanziali differenze tra le località esaminate, dove i valori diffusi risulta essere compreso tra 1.500 e i 2.000 Watt/mq.

Le uniche eccezioni sono Bolzano e Gressoney-Saint Jean, dove l'incidenza della radiazione solare è inferiore a 1.500 Watt/mq e Tropea dove il valore registrato è superiore a 3.000 Watt/mq.



Graf. 3: Temperatura media del mese più freddo



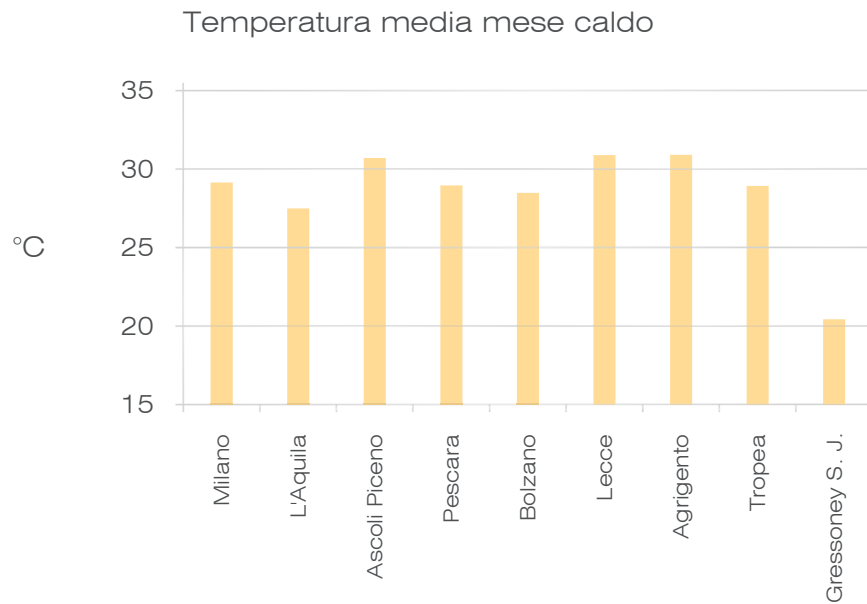
Graf. 4: Radiazione solare media del mese più freddo

Per quanto riguarda la temperatura media del mese più caldo (grafico 5), il grafico evidenzia come le temperature medie massime di tutte le località si attestano tra i 28 e i 31°C. Ancora una volta la località alpina di Gressoney- Saint Jean si differenzia dalle altre con una temperatura di circa 20°C.

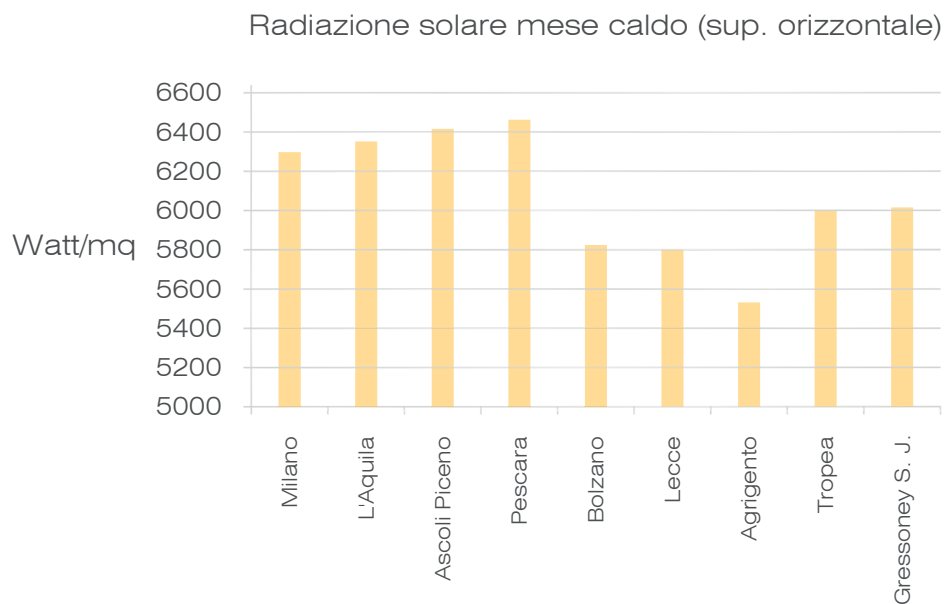
La radiazione solare nel mese più caldo misurata sulla superficie orizzontale, (grafico 6), nelle località padane del medio versante adriatico e in quella appenninica, sono superiori a 6.300 Watt/mq (Milano, L'Aquila, Ascoli Piceno, Pescara).

Le aree climatiche che differiscono nei valori sono Tropea e Gressoney-Saint Jean, con una radiazione solare nel mese più caldo di 6.000 Watt/mq; Bolzano e Lecce sono

leggermente inferiori, con un valore di circa 5.800 Watt/mq. La località con la radiazione solare minore è Agrigento con 5.526 Watt/mq.



Graf. 5: Temperatura media del mese più caldo



Graf. 6: Radiazione solare media del mese più caldo

Il comportamento di un involucro edilizio può essere valutato in base alla risposta dinamica relativa alle condizioni climatiche sia nella stagione estiva che in quella invernale. Sia in regime estivo che in quello invernale, diventa rilevante verificare dinamicamente i flussi di calore prendendo in considerazione i parametri attraverso i quali è possibile controllare

l'inerzia termica di una struttura, ovvero il valore della massa superficiale, il coefficiente di sfasamento termico e il fattore di attenuazione.

Il coefficiente di sfasamento termico di un involucro indica la durata temporale, espressa in ore, che l'onda termica esterna impiega per variare, in modo significativo, la temperatura superficiale interna, producendo un ritardo nel tempo degli effetti termici esterni. Da ciò né deriva, che maggiore è la durata dello sfasamento, migliori saranno le prestazioni dell'involucro.

Il fattore adimensionale di attenuazione indica, invece, la capacità di un involucro di attenuare l'ampiezza d'onda, nel passaggio del flusso termico dall'ambiente esterno a quello interno.

Per definire i parametri climatici necessari ai fini delle simulazioni energetiche di un involucro metallico tipo, la metodologia adottata ha seguito la definizione di temperatura Sole-Aria, che può essere definito come l'effetto termico provocato dalla combinazione della radiazione solare e della temperatura dell'aria sulla superficie esterna di una parete. Si tratta della temperatura fittizia che dovrebbe avere l'aria esterna, per generare su una parete in ombra, lo stesso scambio termico realizzato nella realtà dall'azione combinata della temperatura esterna e della radiazione solare.

La temperatura aria – sole si ottiene con la seguente relazione:

$$t_{as} = t_E + \frac{I \cdot a_s}{h_0}$$

dove:

t_E = temperatura esterna (°C)

I = irradianza solare (W/m²)

a_s = coefficiente di assorbimento solare superficiale

h_0 = coefficiente di adduzione esterno (W/m²K)

Dall'equazione sopra riportata, si evince come il valore della temperatura aria-sole sia direttamente proporzionale alle proprietà ottiche della finitura superficiale esterna, e pertanto, a parità di condizioni climatiche, una parete di colore scuro, presenterà, rispetto ad una parete di colore chiaro, una t_{as} più elevata per via del coefficiente di assorbimento più alto, aumentando il flusso termico verso l'ambiente interno.

Per questo studio si è deciso di verificare, sulle località prese in esame, l'effetto combinato della temperatura dell'aria e della radiazione solare assorbita sulla superficie orizzontale e sulla verticale esposta a sud, ma la metodologia seguita può essere applicabile anche per altre esposizione e/o orientamenti.

L'effetto combinato della temperatura dell'aria e la radiazione solare (grafici 7 e 8) assorbita può essere stimato in modo semplice sulle superfici di elementi opachi o trasparenti e può essere spiegato nella maniera seguente: nella tabella 3 si riportano i valori delle proprietà radiative del vetro e di alcuni metalli maggiormente in uso in edilizia.

Il passaggio dai valori giornalieri delle grandezze che definiscono la temperatura superficiale "sole-aria" ai corrispondenti valori orari è stato realizzato secondo una procedura di calcolo convenzionalmente accettata che realizza un andamento dei valori stessi di tipo periodico sinusoidale, nell'arco delle ventiquattro ore.

L'andamento giornaliero della temperatura dell'aria in funzione del tempo, può essere descritto da un'equazione del tipo:

$$T_{(t)} = T_{med} + T_1 \sin \pi (t - \varphi)/12 + T_2 \sin \pi (t - \varphi)/6$$

dove:

T_{med} = temperatura media giornaliera dell'aria

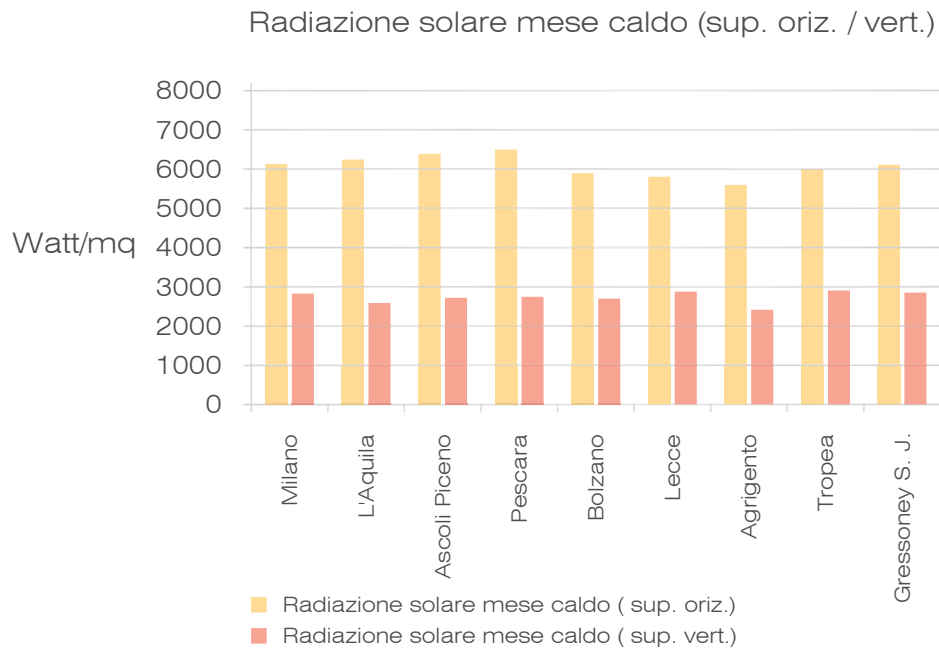
φ = angolo di fase

T_1, T_2 = costanti

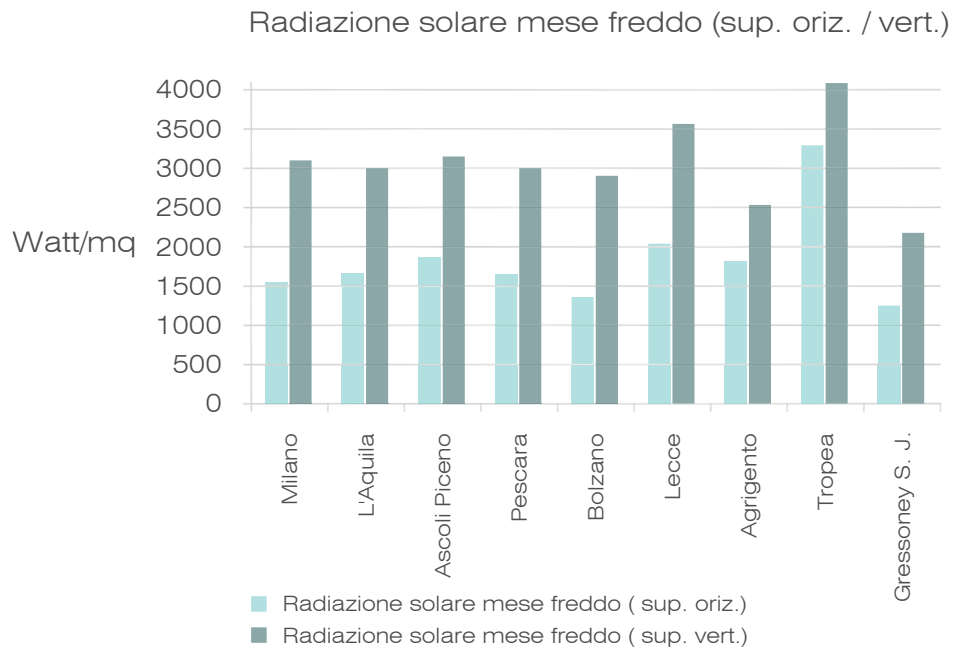
Tutti i valori angolari relativi al modello esposto sono espressi in radianti.
 Il valore dell'angolo di fase φ è dato dall'espressione:

$$\varphi = (t_{\max} + t_{\min})/2$$

in cui t_{\max} e t_{\min} rappresentano gli istanti in cui si verificano rispettivamente la temperatura massima (T_{\max}) e minima (T_{\min}) giornaliera.

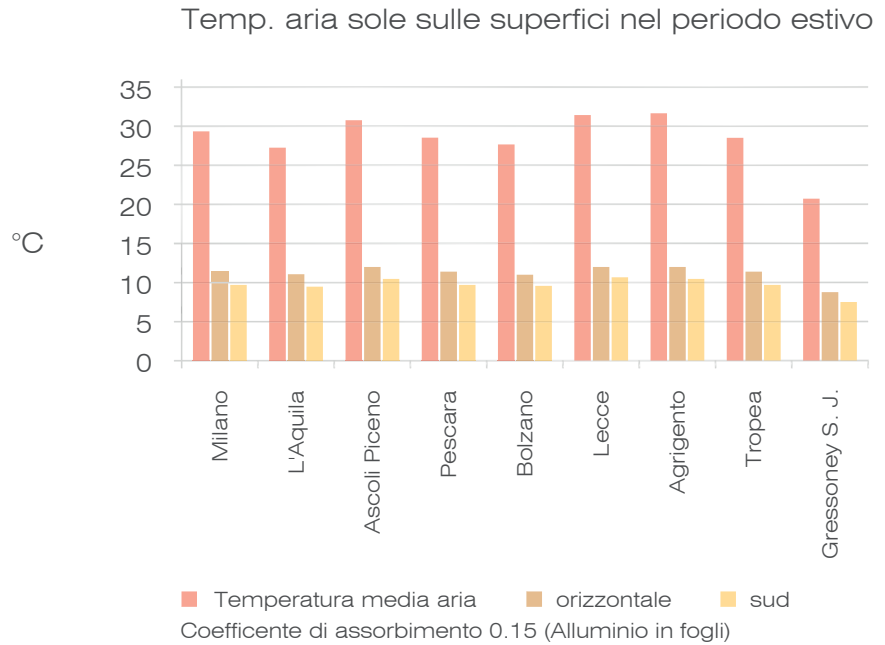


Graf. 7: Confronto tra la radiazione solare mese caldo sulla superficie verticale/ orizzontale

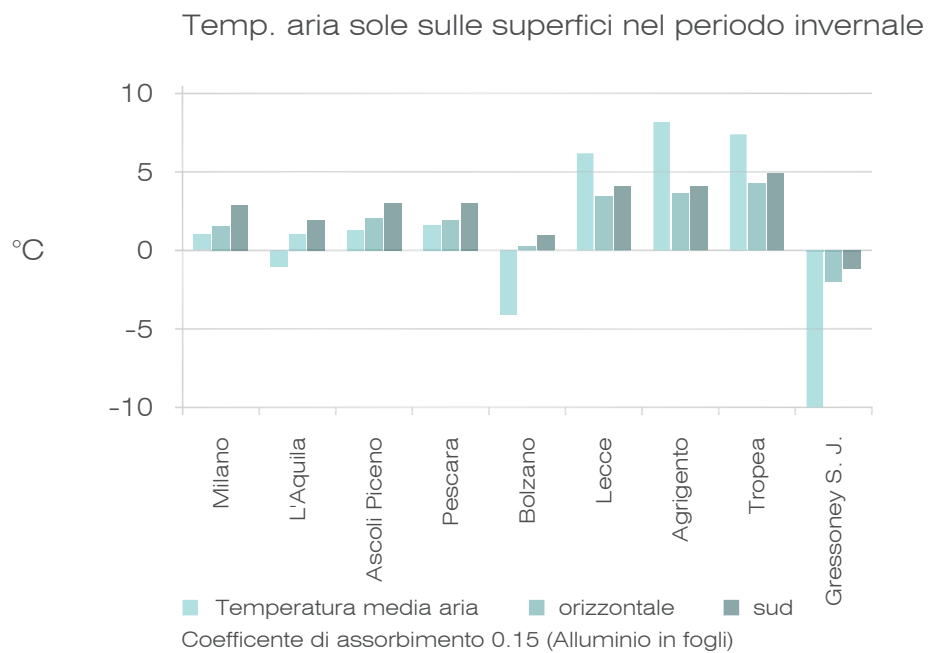


Graf. 8: Confronto tra la radiazione solare mese freddo sulla superficie verticale/ orizzontale

Gli andamenti caratteristici della temperatura sole-aria in estate ed in inverno sulle superfici orizzontali e su quelle verticali esposte a sud, saranno utilizzati come base di indagine per valutare le prestazioni energetiche di un involucro metallico ideale in relazione alla risposta termica in condizioni dinamiche (grafici 9 e 10).



Graf. 9: Temperatura aria sole sulle superfici nel periodo estivo



Graf. 10: Temperatura aria sole sulle superfici nel periodo invernale

ASSORBIMENTO ED EMISSIVITÀ DELLE SUPERFICI

PROPRIETA' RADIATIVE	Coeff. Assorb.	Coeff. Emissività	Rapporto
	α	ε	α/ε
Metalli			
alluminio lucido	0,09	0,03	3,00
alluminio anodizzato	0,14	0,84	0,17
alluminio in foglio	0,15	0,05	3,00
rame lucido	0,18	0,03	6,00
rame ossidato	0,65	0,75	0,87
acciaio inox lucido	0,37	0,60	0,62
acciaio inox opaco	0,5	0,21	2,38
metalli placcati cromo nero	0,87	0,09	9,67
metalli placcati ossido di nickel nero	0,92	0,08	11,50
zinco in fogli		0,20	
zinco lucidato		0,03	
ferro laminato in fogli		0,66	
ferro ossidato in fogli		0,80	
Vetro			
generico	0,90	0,850	1,06
riflettente	0,94	0,850	1,11

Tabella 3. Proprietà radiative di alcuni materiali.

Oltre allo studio delle caratteristiche microclimatiche locali, la proposta progettuale deve necessariamente passare attraverso la definizione di alcuni parametri prestazionali minimi: grado di isolamento termico, inerzia termica, massa e capacità. Il comportamento energetico del componente progettato dovrà avere caratteristiche coerenti con tali parametri, ovvero in accordo con gli obiettivi di ricerca imposti come base della progettazione di un componente di involucro metallico.

Allo stesso tempo, bisogna tener conto della normativa italiana di riferimento sul contenimento e sull'efficiamento energetico degli edifici, che a partire dal DLgs 192 del 2005 fino al DM requisiti minimi del 26 giugno 2015, definisce parametri minimi sottoforma di indici prestazionali da raggiungere.

Alla luce di tutto ciò, va comunque sottolineato il fatto che il componente d'involucro oggetto della presente ricerca, considera certamente i parametri prestazionali definiti dal quadro normativo, ma rispetto a questi obiettivi "standard", introduce elementi di valutazione prestazionali a volta in contrasto tra loro da un punto di vista della fisica tecnica applicata all'edificio.

Per esempio, il parametro "standard" di riferimento U (trasmittanza), che viene usato generalmente per definire il livello di isolamento termico invernale, può essere indipendente dall'inerzia termica dell'involucro stesso, soprattutto se messo in relazione al componente studiato in questa ricerca, che ha tra gli obiettivi, proprio quello di non superare i 150 Kg/m² di massa frontale.

Il coefficiente di trasmittanza termica U di un involucro, espresso in W/m²K, è calcolato in funzione della resistenza termica degli strati che lo costituiscono.

Con il DLgs 192 del 2005, in applicazione della direttiva europea sull'efficienza energetica, il coefficiente di trasmittanza U viene definito in relazione della posizione geografica, ovvero alla zona climatica di appartenenza.

Di seguito, si riportano i valori dei parametri caratteristici per un fabbricato di nuova costruzione e di riqualificazione energetica:

Edifici di riferimento

Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015 ⁽¹⁾	2019/2021 ⁽²⁾
A e B	0,45	0,43
C	0,38	0,34
D	0,34	0,29
E	0,30	0,26
F	0,28	0,24

Tabella 4. Trasmittanza termica U delle strutture opache verticali, verso l'esterno, gli ambienti non climatizzati o contro terra

Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015 ⁽¹⁾	2019/2021 ⁽²⁾
A e B	0,38	0,35
C	0,36	0,33
D	0,30	0,26
E	0,25	0,22
F	0,23	0,20

Tabella 5. Trasmittanza termica U delle strutture opache orizzontali o inclinate di copertura, verso l'esterno e gli ambienti non climatizzati

Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015 ⁽¹⁾	2019/2021 ⁽²⁾
A e B	0,46	0,44
C	0,40	0,38
D	0,32	0,29
E	0,30	0,26
F	0,28	0,24

Tabella 6. Trasmittanza termica U delle opache orizzontali di pavimento, verso l'esterno, gli ambienti non climatizzati o contro terra

Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015 ⁽¹⁾	2019/2021 ⁽²⁾
A e B	3,20	3,00
C	2,40	2,20
D	2,00	1,80
E	1,80	1,40
F	1,50	1,10

Tabella 7. Trasmittanza termica U delle chiusure tecniche trasparenti e opache e dei cassonetti, comprensivi degli infissi, verso l'esterno e verso ambienti non climatizzati

Edifici esistenti soggetti a riqualificazione energetica

Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015 ⁽¹⁾	2021 ⁽²⁾
A e B	0,45	0,40
C	0,40	0,36
D	0,36	0,32
E	0,30	0,28
F	0,28	0,26

Tabella 8. Trasmittanza termica U massima delle strutture opache verticali, verso l'esterno soggette a riqualificazione

Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015 ⁽¹⁾	2021 ⁽²⁾
A e B	0,34	0,32
C	0,34	0,32
D	0,28	0,26
E	0,26	0,24
F	0,24	0,22

Tabella 9. Trasmittanza termica U massima delle strutture opache orizzontali o inclinate di copertura, verso l'esterno soggette a riqualificazione

Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015 ⁽¹⁾	2021 ⁽²⁾
A e B	0,48	0,42
C	0,42	0,38
D	0,36	0,32
E	0,31	0,29
F	0,30	0,28

Tabella 10. Trasmittanza termica U massima delle strutture opache orizzontali di pavimento, verso l'esterno soggette a riqualificazione

Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015 ⁽¹⁾	2021 ⁽²⁾
A e B	3,20	3,00
C	2,40	2,00
D	2,10	1,80
E	1,90	1,40
F	1,70	1,00

Tabella 11. Trasmittanza termica U massima delle chiusure tecniche trasparenti e opache e dei cassonetti, comprensivi degli infissi, verso l'esterno e verso ambienti non climatizzati soggette a riqualificazione

Il parametro prestazionale U è calcolato come semplice somma di resistenze degli strati indipendente dalla loro reciproca posizione fornisce una valutazione del solo grado di "isolamento termico" in regime di temperatura costante.

La presenza di un materiale dalle caratteristiche isolanti genera una partizione termica fra la parte rivolta verso l'ambiente con temperatura maggiore, "zona calda", e la parte rivolta verso l'ambiente con temperatura minore, "zona fredda". Nell'edilizia tradizionale, questa suddivisione viene interrotta generalmente in prossimità degli elementi strutturali, travi pilastri, generando il fenomeno del "ponte termico" (figura 3) nei punti di discontinuità e di interruzione del materiale

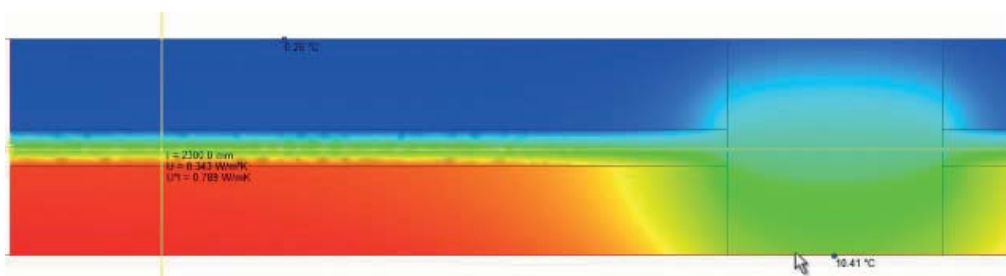


Figura 3. Esempio di ponte termico tipico quando l'isolante è posto nello strato intermedio

ad esempio, la discontinuità della temperatura avviene proprio nel momento in cui lo strato isolante, posto in posizione intermedia, si interrompe incontrando gli elementi portanti della struttura a telaio.

Nel caso invece, di tipologia costruttiva in muratura portante, questi fenomeni si verificano con minore frequenza poiché il paramento murario è costituito da materiali omogenei, e generalmente ha uno spessore consistente e una massa superficiale superiore a 300-500 kg/m² tali da attenuarne il fenomeno laddove si dovesse verificare.

Questa tesi, come già più volte definito, tratta di involucri prefabbricati, "leggeri", con massa superficiale inferiore a 150kg/m², e con uno spessore ridotto rispetto agli standard dell'edilizia tradizionale, pertanto sarà necessario l'inserimento di uno strato isolante, altamente prestazionale di spessore minimo oltre ad una cavità areata come strato di ulteriore filtro e separazione tra la parete calda e quella fredda.

Per valutare la qualità dell'involucro leggero, oltre al coefficiente di trasmittanza U, è determinante tener conto anche delle oscillazioni di temperatura che si riferiscono sia al periodo giornaliero che a quello annuale. Queste oscillazioni di temperatura, non dipendono soltanto dalla presenza di uno o più livelli di isolamento termico, ma anche da posizione e dimensione di tutti gli strati che compongono l'elemento di involucro, oltreché dalla capacità che essi hanno di agire come elementi di accumulo di energia. Quest'ultimo aspetto, in particolare, determina uno "sfasamento" dell'onda termica, ovvero la differenza di tempo misurata in ore, tra il momento in cui si registra la massima temperatura sulla superficie esterna della struttura, e l'istante in cui si registra la massima temperatura sulla superficie interna della stessa.

Gli effetti positivi dell'inerzia termica sono quantificabili attraverso il parametro dello sfasamento (indicato con la lettera S) e con il fattore adimensionale di attenuazione (indicato con la lettera f), che rappresenta il rapporto tra la variazione di temperatura esterna ed il flusso di energia necessaria per mantenere costante la temperatura interna. Le norme tecniche italiane di recepimento della direttiva europea UNI EN ISO 13786 sull'efficienza energetica, hanno introdotto ulteriori coefficienti per valutare in modo semplificato, la qualità dell'involucro edilizio in condizioni dinamiche, attraverso la definizione della trasmittanza termica periodica (Ye), definita come la capacità di un componente edilizio di attenuare e sfasare nel tempo il flusso termico proveniente dall'esterno che lo attraversa nell'arco delle ventiquattro ore di una giornata. Il parametro Ye è calcolato come prodotto tra il coefficiente di trasmittanza U e il fattore di attenuazione termica in regime variabile f ($Ye = U \times f$).

² *Metodi approvati con il decreto di cui al comma 1, dell'articolo 8, del decreto legislativo, in attuazione della procedura di calcolo di progetto o di calcolo standardizzato.*

Per quanto riguarda il calcolo dei parametri², degli indici di prestazione energetica e dei rendimenti, e gli schemi di relazione tecnica si procede secondo i seguenti metodi di calcolo:

- a) Raccomandazione CTI 14/2013 "Prestazioni energetiche degli edifici - Determinazione dell'energia primaria e della prestazione energetica EP per la classificazione dell'edificio", o normativa UNI equivalente e successive norme tecniche che ne conseguono;
- b) UNI/TS 11300 – 1 Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva e invernale;
- c) UNI/TS 11300 – 2 Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, la ventilazione e l'illuminazione;
- d) UNI/TS 11300 – 3 Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 3: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva;
- e) UNI/TS 11300 – 4 Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 4: Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per riscaldamento di ambienti e preparazione acqua calda sanitaria;
- f) UNI EN 15193 - Prestazione energetica degli edifici - Requisiti energetici per illuminazione.

³ *Metodo basato sulla determinazione di parametri qualitativi*

Il metodo di calcolo ³ di progetto è applicabile a tutte le tipologie edilizie, sia per gli edifici nuovi che per quelli esistenti, indipendentemente dalla loro dimensione.

La classe energetica dell'edificio è determinata sulla base dell'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile dell'edificio $EP_{gl,nren}$, per mezzo del confronto con una scala di classi prefissate, ognuna delle quali rappresenta un intervallo di prestazione energetica definito.

⁴ Definito dall'Allegato 1, paragrafo 3.4 del decreto requisiti minimi.

La classe energetica è contrassegnata da un indicatore alfabetico in cui la lettera G rappresenta la classe caratterizzata dall'indice di prestazione più elevato (maggiori consumi energetici), mentre la lettera A rappresenta la classe con il miglior indice di prestazione (minori consumi energetici). Un indicatore numerico, affiancato alla lettera A, identificherà i livelli di prestazione energetica in ordine crescente da 1 a 4 dove 1 rappresentante del più basso livello di prestazione della classe energetica A e 4 il più alto. Un apposito spazio, se barrato, indicherà che si tratta di un "Edificio a energia quasi zero" ⁴.

La scala delle classi è definita a partire dal valore dell'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile dell'edificio di riferimento ($EP_{gl,nren,rif, standard (2019/21)}$)⁵, ipotizzando che in esso siano installati elementi edilizi e impianti standard dell'edificio di riferimento di cui alla Tabella 12, dotati dei requisiti minimi di legge in vigore dal 1° gennaio 2019 per gli edifici pubblici, e dal 1° gennaio 2021 per tutti gli altri. Tale valore è posto quale limite di separazione tra le classi A1 e B.

Climatizzazione invernale	Generatore a combustibile gassoso (gas naturale) nel rispetto dei requisiti di cui alla tabella 8 dell'Appendice A all'Allegato 1 del DM requisiti minimi e con relativa efficienza dei sottosistemi di utilizzazione di cui alla tabella 7 della stessa Appendice.
Climatizzazione estiva	Macchina frigorifera a compressione di vapore a motore elettrico nel rispetto dei requisiti di cui alla tabella 8 dell'Appendice A all'Allegato 1 del DM requisiti minimi e con relativa efficienza dei sottosistemi di utilizzazione di cui alla tabella 7 della stessa Appendice.
Ventilazione	Ventilazione meccanica a semplice flusso per estrazione nel rispetto dei requisiti di cui alla tabella 9 dell'Appendice A all'Allegato 1 del DM requisiti minimi
Acqua calda sanitaria	Generatore a combustibile gassoso (gas naturale) nel rispetto dei requisiti di cui alla tabella 8 dell'Appendice A all'Allegato 1 del DM requisiti minimi e con relativa efficienza dei sottosistemi di utilizzazione di cui alla tabella 7 della stessa Appendice.
Illuminazione	Rispetto dei requisiti di cui al paragrafo 1.2.2 dell'Appendice A all'Allegato 1 del DM requisiti minimi.
Trasporto persone o cose	Rispetto dei requisiti al DM requisiti minimi.

Tabella 12 . Tecnologie standard dell'edificio di riferimento

Gli intervalli di prestazione che identificano le altre classi sono ricavati attraverso coefficienti moltiplicativi di riduzione/maggiorazione del suddetto valore $EP_{gl,nren,rif,standard (2019/21)}$, come evidenziato in Tabella 13.

Ai fini della determinazione della classe energetica complessiva dell'edificio per la redazione dell'APE, in base a quanto suddetto, si procede come segue:

- si determina il valore di $EP_{gl,nren,rif,standard (2019/21)}$ per l'edificio di riferimento secondo quanto previsto dall'Allegato 1, capitolo 3 del decreto requisiti minimi, dotandolo delle tecnologie standard riportate nella Tabella 1, in corrispondenza dei parametri vigenti per gli anni 2019/21;
- si calcola il valore di $EP_{gl,nren}$ per l'immobile oggetto dell'attestazione e si individua la classe energetica da attribuire in base alla Tabella 13

	Classe A4	$\leq 0,40 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21)$
$0,40 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21) <$	Classe A3	$\leq 0,60 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21)$
$0,60 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21) <$	Classe A2	$\leq 0,80 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21)$
$0,80 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21) <$	Classe A1	$\leq 1,00 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21)$
$1,00 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21) <$	Classe B	$\leq 1,20 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21)$
$1,20 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21) <$	Classe C	$\leq 1,50 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21)$
$1,50 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21) <$	Classe D	$\leq 2,00 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21)$
$2,00 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21) <$	Classe E	$\leq 2,60 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21)$
$2,60 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21) <$	Classe F	$\leq 3,50 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21)$
	Classe G	$> 3,50 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21)$

Tabella 13 . Scala di classificazione degli edifici sulla base dell'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile $EP_{gl,nren}$

Per quanto riguarda la prestazione energetica invernale dell'involucro, l'indicatore di cui alla Tabella 14 è definito a partire dal valore dell'indice di prestazione termica utile per il riscaldamento dell'edificio di riferimento ($EP_{H,nd,limite}^{(2019/21)}$), ipotizzando, che in esso siano installati elementi edilizi dotati dei requisiti minimi di legge in vigore dal 1° gennaio 2019 per gli edifici pubblici, e dal 1° gennaio 2021 per tutti gli altri. Tale valore è posto quale limite di separazione tra gli involucri edilizi di qualità alta e di qualità media.




Prestazione invernale dell'involucro	Qualità	Indicatore
$EP_{H,nd} \leq 1 * EP_{H,nd,limite} (2019/21)$	alta	
$1 * EP_{H,nd,limite} (2019/21) < EP_{H,nd} \leq 1,7 * EP_{H,nd,limite} (2019/21)$	media	
$EP_{H,nd} > 1,7 * EP_{H,nd,limite} (2019/21)$	bassa	

Tabella 14 . Indicatore della prestazione energetica invernale ed estiva dell'involucro, al netto dell'efficienza degli impianti presenti.

Per quanto riguarda la prestazione energetica estiva dell'involucro, l'indicatore di cui alla Tabella 15 è definito in base alla trasmittanza termica periodica Y_{IE} e all'area solare equivalente estiva per unità di superficie utile $A_{sol,est}/A_{sup} utile$. Nel caso della trasmittanza termica periodica si prende in considerazione il valore medio pesato in base alle superfici, con l'esclusione delle superfici verticali esposte a Nord. Nel caso di immobili con esposizione esclusivamente Nord delle superfici verticali, la trasmittanza termica periodica è posta pari a 0,14.




Prestazione estiva dell'involucro		Qualità	Indicatore
$A_{sol,est}/A_{sup} utile \leq 0,03$	$Y_{IE} \leq 0,14$	alta	
$A_{sol,est}/A_{sup} utile \leq 0,03$	$Y_{IE} > 0,14$	media	
$A_{sol,est}/A_{sup} utile > 0,03$	$Y_{IE} \leq 0,14$		
$A_{sol,est}/A_{sup} utile > 0,03$	$Y_{IE} > 0,14$	bassa	

Tabella 15 . Indicatore della prestazione energetica estiva dell'involucro, al netto dell'efficienza degli impianti presenti.

La necessità di analizzare il comportamento energetico del componente d'involucro adattivo progettato nell'ambito di questa tesi di dottorato ci ha indotti a valutare le sue prestazioni attraverso il supporto di un'analisi condotta con software di simulazione termodinamica che ci permettessero di valutarne le prestazioni termo-igrometriche in una delle località precedentemente analizzate e ritenuta ideale per l'esecuzione delle simulazioni.

La riqualificazione energetica dei patrimoni edilizi ricadenti in zona E, insieme ad una sensibile progettazione dei nuovi edifici, in previsione di un potenziale sviluppo edilizio dovuto ad una maggior densità abitativa, possono condurre a risultati significativi su vasta scala garantendo un impatto rilevante in termini di riduzione delle emissioni climalteranti. Interessante anche da un punto di vista prettamente commerciale, il profilo climatico, esemplificativo della zona E, scelto per il seguente studio, ricade nella località di Milano. Milano, in particolare, presenta una delle stagioni estive più calde fra le città italiane, ed una stagione invernale non particolarmente mite, come confermato dai grafici relativi alle temperatura media del mese freddo e quella del mese caldo. In ragione di tali caratteristiche può essere considerata una località di studio appropriata per mettere in evidenza le eventuali criticità che potrebbero verificarsi nel comportamento energetico, sia estivo che invernale, degli edifici a seguito del previsto cambiamento climatico in una città a clima prevalentemente subtropicale umido⁵.

⁵ *Classificazione climatica di Köeppen, elaborata per i climi italiani da M. Pinna in funzione della temperatura (1978)*

Per valutare la reale efficienza del prodotto e verificarne i reali fabbisogni di energia primaria per il riscaldamento e raffrescamento, riteniamo che lo studio e le simulazioni debbano essere condotte oltre che nella sola città di Milano, (zona climatica E), anche in altre località con differenti condizioni climatiche invernali ed estive. Per questo motivo, si studieranno anche i comportamenti energetiche del componente nella città di Ascoli Piceno (zona climatica D) ed Agrigento (zona climatica B).

Ascoli Piceno, presenta un il profilo climatico di tipo subappenninico, in quanto a ridosso di importanti catene montuose. Gli inverni sono umidi e freschi, e quando le correnti balcaniche giungono fin sul medio Adriatico, in città si assiste a precipitazioni nevose e ad un forte abbassamento della temperatura. In estate il clima è caldo e con precipitazioni poco frequenti. Nei giorni più caldi, infatti, si possono registrare temperature di 37/38°C, ma generalmente la sera le brezze appenniniche rinfrescano le temperature notturne.

Ad Agrigento, da ultimo, si riscontra un clima caldo e temperato, mediterraneo con estati calde e poco piovose. La temperatura media annua è di 17.1 °C. La città è stata scelta per verificare l'efficienza del componente in ragione della ventilazione e del raffrescamento estivo.

In conclusione, la metodologia proposta, per definire i risultati prestazionali del componente d'involucro leggero ed opaco, non può prescindere dalla contestualizzazione dello stesso in un edificio tipo e/o in una test room, collocato in un contesto ideale.

La verifica, basata sulla valutazione degli indici di attenuazione e sfasamento dell'oscillazione termica, e sui limiti di trasmittanza termica definiti a partire dal DLgs 192 del 2005 fino al DM requisiti minimi del 26 giugno 2015, è senza dubbio una semplificazione della risposta termica dinamica, ma è altrettanto necessaria nella frase preliminare della progettazione, poiché orienterà questo progetto di ricerca alla definizione delle stratigrafie.

La valutazione dei sistemi di facciata può essere affrontata soltanto definendo le caratteristiche degli elementi che costituiscono il componente di involucro in termini di trasmittanza termica e temperatura superficiale, andando ad analizzare successivamente come queste prestazioni influenzino in maniera positiva o negativa il fabbisogno energetico globale dell'ambiente confinato.

Passando all'analisi dell'involucro, sarà dunque possibile individuare le soluzioni ottimali, combinando la riduzione del flusso termico condizionato dallo spessore e dalle proprietà fisiche dell'isolante, con la capacità di accumulo termico, quest'ultima connessa alle variazioni di temperatura nel tempo e soprattutto alla posizione corretta dei diversi strati. Gli involucri adattivi appartengono alle nuove tecnologie di facciata dove la massa termica e gli scambi di energia assumono un ruolo determinante ai fini della progettazione tecnica. Se la parete perimetrale è soggetta al passaggio di calore, vapore, aria, luce e rumore,

questi, diventano fattori essenziali di progetto, in quella che rappresenta una tecnologia dell'involucro capace di "adattare" dinamicamente il proprio funzionamento in relazione alle specifiche condizioni climatiche locali.

La metodologia seguita per l'individuazione del prototipo si basa anche su un giudizio delle qualità funzionali del componente, articolato in cinque categorie principali, applicabili a seconda delle esigenze progettuali richieste. E' infatti possibile, che per ragioni di carattere funzionale o per semplici scelte progettuali, alcune di queste cinque funzioni risultino prevalenti rispetto ad altre. Le categorie funzionali si distinguono in: controllo solare, illuminazione diffusa, inerzia termica, isolamento termico, produzione di energia. Volendo valutare come l'adozione del componente di facciata adattiva possa influenzare il fabbisogno energetico dell'edificio, dopo aver definito le caratteristiche termigrometriche dei suoi componenti e facendo riferimento ai valori di trasmittanza valutati precedentemente, in questa fase, abbiamo confrontato con altri componenti di facciata, la variazione del fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento ed il raffrescamento all'interno della test room virtuale. Tutto ciò per comprendere se il nostro componente possa garantire prestazioni migliori alla scala dell'edificio rispetto ad una facciata di tipo tradizionale.

Saranno analizzati i singoli aspetti attraverso software specifici provenienti da diversi ambiti tecnico-scientifici (verifiche termigrometriche, analisi degli elementi finiti e analisi energetiche in condizioni dinamiche etc.)

Le procedure di calcolo e di simulazione, seppur in questo studio saranno applicate alle città di Milano, Ascoli Piceno ed Agrigento, devono, in definitiva, condurre a configurare le diverse soluzioni progettuali e la loro replicabilità in contesti ambientali differenti.

4.3 Definizione dei parametri di controllo per la progettazione degli strati funzionali

La trasformazione dell'involucro da elemento portante dell'edificio a chiusura perimetrale libera da vincoli strutturali, è il risultato di processi evolutivi sociali, culturali e scientifici, che hanno condotto ad una progressiva scomposizione in strati funzionali (portante, proteggente, isolante termico ed acustico) grazie alla innovazione tecnologica che ha permesso la realizzazione di nuovi materiali passivi, attivi e ad alte prestazioni, segnando definitivamente il passaggio dell'involucro edilizio a complesso sistema filtro in grado di ottimizzare le interazioni tra micro-ambiente esterno ed interno.

Capace di mutare dinamicamente le proprie prestazioni in base alle condizioni ambientali esterne e all'uso degli occupanti che determinano le condizioni interne dell'edificio, l'involucro edilizio è quindi una superficie di transizione, realizzato con materiali passivi, attivi e ad alte prestazioni, in grado di ospitare anche dispositivi impiantistici di varia natura.

Nell'ottica di quanto detto sopra, per questo progetto di ricerca saranno utilizzati:

- materiali passivi, che grazie alle loro caratteristiche, riescono a modificare la quantità di energia trasmessa (visiva, energetica) condizionati dall'inclinazione della radiazione solare;
- materiali attivi, che modificano la quantità di energia trasmessa in funzione di stimoli esterni forniti al sistema, quali corrente impressa, gradiente di temperatura o variazione di energia solare incidente;
- materiali ad alte prestazioni, in grado di soddisfare, grazie alle loro proprietà intrinseche, la maggior parte dei requisiti di comfort ambientale.

In questo progetto di ricerca sono stati presi in considerazione per la scelta dei materiali i seguenti parametri:

- Coefficiente di conduttività termica;
- Conduttanza termica C ;
- Densità o massa volumica o massa volumica (kg/m^3);
- Massa volumica del materiale secco;
- Calore specifico o capacità termica specifica c_p ;
- Coefficiente o Fattore di resistenza al passaggio del vapore μ ;
- Coefficiente di assorbimento acustico;
- Coefficiente di trasmissione;
- Fattore di riflessione;
- Emissività;
- Emissione di gas serra;
- Energia primaria inglobata.

Inoltre il componente d'involucro è stato valutato attraverso una serie di parametri sintetici riferiti a:

- La massa superficiale;
- La capacità termica frontale;
- La trasmittanza unitaria;
- Lo sfasamento;
- Lo smorzamento;
- Fattore solare g -value
- Fattore di trasparenza T_v .

I componenti d'involucro oggetto della presente ricerca, verranno catalogati attraverso schede sintetiche che specificano i parametri principali di spessore, densità, conduttività e resistenza.

Per migliorare l'efficienza energetica e garantire ottimali condizioni di comfort interno, il modulo, oggetto di studio, dovrà essere dotato, sempre più, di sistemi adattivi ed integrati.

L'elemento adattivo, in questo contesto, viene inteso come oggetto avente la capacità di regolare dinamicamente le sue proprietà fisiche e il rendimento energetico in base alle mutevoli esigenze delle condizioni interne e alla variabilità delle condizioni esterne. Questa capacità riguarderà lo sfruttamento di energie rinnovabili, utilizzando sistemi di controllo che selezionano la radiazione solare attraverso le superfici trasparenti, la produzione di energia per mezzo di sistemi fotovoltaici integrati BIPV, l'accumulo di energia per il riscaldamento ed il raffrescamento, utilizzando materiali a cambiamento di fase con elevata capacità di accumulo e il trasporto di questa energia attraverso la circolazione d'aria in apposite cavità. L'utilizzo di materiali adattivi e di sistemi tecnologici integrati in facciata necessita una progettazione complessa che deve consentire un uso ottimale delle risorse energetiche naturali (illuminazione, ventilazione, raffrescamento passivo, accumulo termico) e una migliore integrazione dei dispositivi per lo sfruttamento dell'energia rinnovabile.

Inoltre, i materiali che saranno utilizzati dovranno presentare caratteristiche in grado di misurare e controllare le prestazioni di un edificio e dei suoi servizi con un sistema di gestione (BEMS), posto come interfaccia tra qualità dell'aria interna e condizioni climatiche esterne, fornendo di fatto, intelligenza artificiale all'interno dell'edificio e abilitando modalità innovative di automazione, gestione e controllo remoto dell'involucro adattivo.

L'integrazione degli elementi adattivi e dei sistemi energetici nella progettazione integrata del componente d'involucro dovrà garantire importanti vantaggi:

- Miglioramento delle prestazioni ambientali e riduzione dei consumi energetici;
- Sfruttamento delle fonti energetiche rinnovabili dirette e di quelle secondarie come calore sprecato, calore residuo etc, migliorando le possibilità di un accumulo passivo

- e attivo dell'energia;
- Integrazione architettonica del componente di facciata con l'intero edificio;
- Integrazione delle tecnologie in relazione all'uso degli occupanti e ai loro comportamenti;
- Combinazione di più funzioni nello stesso elemento costruttivo;
- Spessori minimi garantiti che consentono a modularità e la sovrapposibilità del modulo di facciata.

L'obiettivo è quindi quello di sviluppare un modulo capace di combinare sistemi attivi e passivi che modulano il proprio funzionamento giornaliero e stagionale in relazione al variare delle condizioni ambientali interne e esterne.

Questo garantirà un controllo delle variazioni dinamiche ambientali esterne riducendo il consumo energetico degli impianti di condizionamento e di illuminazione, e migliorando il rapporto uomo - natura, attraverso ambienti più confortevoli, salubri che incentivano la produttività ed il benessere degli occupanti.

I principi chiave sui quali si baserà il componente di facciata sono:

- Comportamento dinamico;
- Adattabilità;
- Controllo intelligente;
- Modularità
- Assemblaggio a secco
- Capacità di svolgere funzioni differenti;

I concetti di dinamicità e adattabilità si traducono nel fatto che le funzioni, le caratteristiche e le proprietà termo fisiche del componente possono cambiare nel tempo e adattarsi adeguatamente a diverse condizioni di occupazione, (riscaldamento/raffrescamento, ventilazione ecc.) e alle diverse condizioni al contorno (meteorologiche, carichi interni, sostanze, inquinanti, ecc.).

La coerenza tra i requisiti energetici e di comfort, e il comportamento e le proprietà degli elementi adattivi sarà garantita dal sistema di controllo intelligente.

La modularità è una caratteristica fondamentale per il inserire l'elemento in un processo di industrializzazione, riducendo gli scarti di produzione e garantendo costi fissi di realizzazione.

Il sistema di montaggio a secco, ovvero l'uso di ancoraggi reversibili, offre la possibilità di intervenire fisicamente sulla facciata, smontando e rimontando i moduli per necessità di manutenzione, oppure sostituendo i moduli con altri di differenti caratteristiche per esigenze architettonico-progettuali.

La capacità di svolgere funzioni differenti è strettamente legata alle caratteristiche di modularità e di montaggio a secco. Pensati per svolgere funzioni diverse a seconda delle esigenze progettuali e/o richieste della committenza, i moduli mantengono sempre le stesse dimensioni, e gli stessi spessori, risultando pertanto "compatibili" sia in termini di assemblaggio sia per ciò che concerne il funzionamento della risposta adattiva complessiva dell'edificio.

In linea di principio, il funzionamento del modulo oggetto di studio oscilla tra la ricerca di un componente di involucro edilizio con un valore "aggiustabile" di trasmittanza e/o con un valore variabile di permeabilità all'aria alle strutture dell'edificio o a componenti in grado di immagazzinare energia termica, ai sistemi vetrati, con caratteristiche ottiche variabili agli elementi che sfruttano il raffrescamento passivo e/o ibrido.

I moduli si articolano in tre categorie, con lo scopo di garantire ogni livello di permeabilità visiva (trasparente, semi-trasparente ed opaco), specifiche dei quali si approfondirà nel capitolo successivo.

Tenendo conto delle caratteristiche dell'azienda Cantori srl e del suo core business, la presente ricerca tenterà di approfondire principalmente l'innovazione del modulo opaco, lasciando margine di sviluppi futuri di ricerca soprattutto per i moduli trasparenti e semi-trasparenti, garantendo tuttavia la modularità e la possibile compatibilità fra i tre

componenti.

L'intero sistema essendo concepito per essere prefabbricato e modulare, deve necessariamente, come anticipato in precedenza, avere una massa superficiale inferiore ai 150kg/m^2 , sfruttando le caratteristiche dei materiali commercializzati dall'azienda, ma soprattutto per garantire una facile mobilitazione del componente nelle fasi di trasporto ed installazione. Nonostante la "leggerezza, il funzionamento del modulo opaco sfrutta il principio di attivazione termica della massa (TMA) ottimizzando le proprietà dei materiali e dei sistemi adottati per gestire in maniera efficiente i flussi di energia.

In generale la massa termica (TM) è definita come la massa dell'edificio, usata per immagazzinare energia termica a scopi di riscaldamento/raffrescamento. Il principio di funzionamento sfrutta la capacità termica delle strutture degli edifici e/o degli elementi dell'edificio per immagazzinare energia termica (per riscaldamento e raffrescamento) quando l'energia fornita supera l'energia richiesta. I componenti termo attivi dell'edificio sono pareti, solai, pavimenti dotati di condotti per il passaggio dell'aria o dell'acqua che generano un effetto direttamente sull'ambiente riducendo il carico di picco nei periodi di occupazione degli spazi in modo da gravare in maniera inferiore sui costi energetici.

Una tra queste tecnologie sono i sistemi aviotrasportati, che utilizzano delle cavità comprese all'interno di lastre di calcestruzzo, per il passaggio di aria che riscalda o raffreddano la massa oppure che può essere utilizzata come aria di mandata nei locali. tramite un condotto di alimentazione, solitamente posto nel controsoffitto, l'aria arriva ai diffusori delle stanze, mentre tramite delle griglie viene estratta dall'ambiente. I sistema potrebbe ridurre la richiesta di energia per riscaldamento del 40%.

Lo stoccaggio di calore è funzionale alle capacità termica e di assorbimento del materiale. Lo scambio termico è garantito dai coefficienti di radiazione e convezione che determinano la velocità di trasferimento del calore in ambiente; questo deve essere sufficientemente dimensionato e può essere migliorato adoperando un dispositivo di ventilazione.

Quando la massa termica è posizionata internamente, l'aria esterna entra nell'edificio attraverso forze meccaniche o naturali e successivamente ad una fase di assorbimento rilascia il calore. Il flusso d'aria può essere guidato da un sistema di ventole opportunamente progettato affinché i costi di attivazione della ventilazione meccanica siano inferiori rispetto ai costi relativi all'energia di raffreddamento.

Quando la massa termica è posta esternamente, in funzione dell'orientamento, le diverse pareti sono in grado di assorbire differentemente energia termica, per tale ragione è importante progettare dei ritardi nel trasferimento del calore. Le pareti maggiormente esposte alla radiazione solare giornaliera assorbono più velocemente calore e per tale ragione necessitano di un ritardo inferiore, differentemente le pareti meno esposte alla radiazione necessitano di tempi più lunghi.

La soluzione per gestire in maniera ottimale le radiazioni solari e i flussi di calore è l'utilizzo di materiali a cambiamento di fase (PCM), questi differentemente dai classici materiali con buone capacità d'immagazzinamento di energia termica, sanno sfruttare le capacità di accumulo sia del calore latente che del calore sensibile. L'energia si trasferisce nel momento in cui il materiale passa dalla configurazione solida a quella liquida cambiando fase, sono in grado di mantenere una temperatura costante evitando il surriscaldamento degli elementi che li contengono.

I PCM aumentano l'inerzia termica dei materiali in funzione delle proprie capacità termodinamiche, cinetiche e chimiche, questi variano la propria capacità termica che raggiunge l'apice in fase di fusione determinando un comportamento dinamico ai materiali, che si mostrano sensibili alle variazioni climatiche.

Nel componente di facciata progettato in questo studio, l'utilizzo di PCM può avere due obiettivi fondamentali:

- Utilizzare il calore naturale per il riscaldamento e l'aria fredda notturna per il raffrescamento;
- Aumentare la massa termica dell'edificio migliorando conseguentemente il comfort e riducendo il consumo di energia.

Negli edifici i PCM possono avere diverse configurazioni:

- PCM nelle pareti degli edifici;

- PCM in soffitti o solai;
- PCM in sistemi di accumulo di calore o freddo.

Nell'applicazione su parete, il posizionamento del PCM a diretto contatto con l'interno aumenta la capacità termica negli ambienti in cui viene applicato; Esso sfrutta la capacità di accumulo di energia solare e rilascia l'energia accumulata quando la temperatura diminuisce, garantendo un adeguato comfort igrometrico.

Se lo strato di PCM viene posizionato esteriormente, le prestazioni ottenute saranno più vantaggiose in condizioni di raffrescamento, il materiale garantisce un risparmio sul consumo di energia sufficiente a mantenere il benessere.

I PCM possono essere utilizzati come accumulatori di energia termica se sfruttati nelle pareti solari, questi sono caratterizzati da tre strati: uno strato di vetro, uno opaco e un'intercapedine piena di aria. Nei muri solari con PCM si adoperano in sostituzione dello strato opaco alleggerendone il peso e i costi di realizzazione senza comprometterne l'efficienza. La massa termica dei PCM ha la funzione di accumulatore di calore per una parte della giornata, mentre per l'altra come fonte di energia.

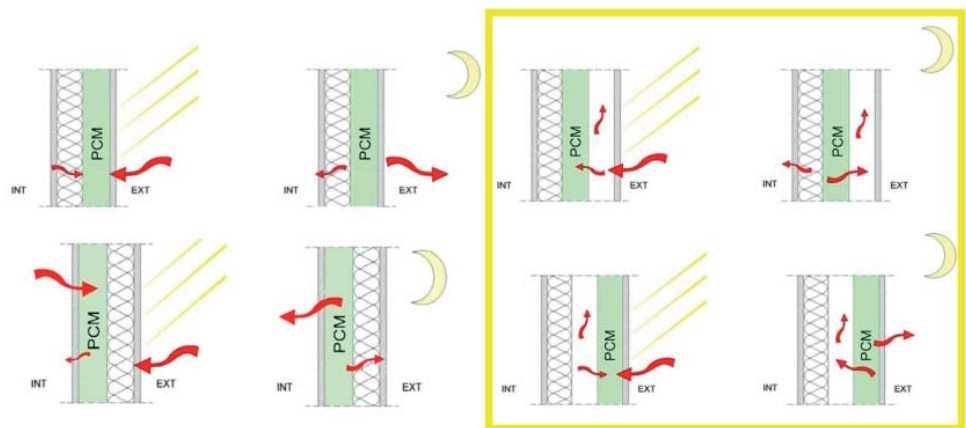


Figura 1. Posizionamento del materiali a cambiamento di fase (PCM)

Per attivare la massa termica del componente d'involucro oggetto di studio, si è deciso di adottare un funzionamento che implica la presenza di una camera di ventilazione per ottenere benefici sia in termini di comfort termico, che per aumentare la massa termica globale dell'edificio. Sulla base delle simulazioni, i risultati attesi implicano la riduzione della degli apporti energetici necessari per il riscaldamento/raffrescamento con conseguente risparmio energetico e una riduzione dei costi per l'installazione degli impianti di riscaldamento/raffrescamento.

L'attivazione termica della massa accoppiata a un sistema di ventilazione ibrida, consente alla temperatura del fluido operativo di essere vicina alla temperatura ambiente, evitando così la richiesta di picchi di energia. E' possibile quindi, soddisfare il fabbisogno energetico globale potendo utilizzare energia proveniente da fonti rinnovabili e sfruttando sistemi passivi integrati.

Per ridurre le perdite calore, la letteratura prevede la possibilità di adottare misure d'isolamento secondo tre posizionamenti:

- Prima della massa termica
- Dopo la massa termica
- In mezzo alla massa

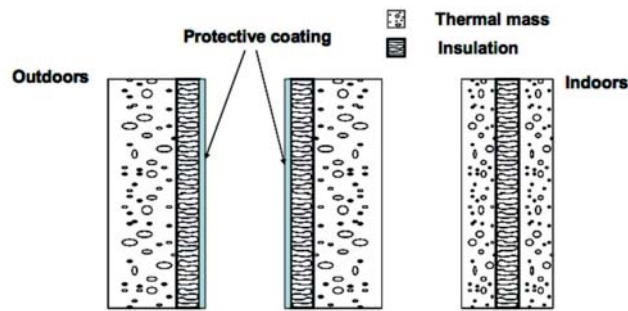


Figura 2. Posizionamento dei materiali isolanti

Per sfruttare in modo ottimale la massa termica e l'isolamento è importante progettare il posizionamento in funzione delle condizioni climatiche del luogo in cui l'edificio sarà realizzato, in quanto le condizioni climatiche impongono una convenienza rispetto ad un'altra.

La differente posizione dell'isolamento rispetto alla massa termica modifica in maniera differente le prestazioni dell'edificio, infatti, se l'isolamento è posizionato internamente rispetto alla massa termica, il tempo di penetrazione del calore dall'esterno all'interno della stanza viene aumentato, diversamente la posizione più esterna dell'isolamento rispetto alla massa termica è vantaggiosa per il raffreddamento notturno e per sfruttare la ventilazione notturna, infine il posizionamento intermedio permette di ottenere alcuni vantaggi di una e dell'altra.

Un approccio energeticamente efficiente è l'isolamento dinamico (DI), questo filtra l'aria di ventilazione attraverso un involucro dinamicamente permeabile e isolato. I sistemi ad isolamento migliorano la qualità dell'aria e sono in grado di ridurre le perdite di calore.

Esistono due tecnologie adoperate:

- Muri dotati di intercapedine: questo tipo di elementi adotta delle cavità per far circolare il fluido (principalmente aria) nel muro. L'aria generalmente scorre nelle cavità in direzione parallela al muro. La struttura interna del muro agisce quindi come uno scambiatore di calore.
- Muri traspiranti: in questa tecnologia l'aria scorre attraverso uno strato isolante permeabile. L'interazione della fase gassosa con la fase solida agisce come uno scambiatore di calore controcorrente. Dal punto di vista delle prestazioni è preferibile costruire elementi a isolamento dinamico usando materiali fibrosi/porosi perché sono intrinsecamente buoni isolanti.

Per il modulo opaco, non potendo utilizzare materiali traspiranti, l'isolamento dinamico adottato è quello derivante dall'intercapedine di ventilazione. Per poter adottare anche sistemi traspiranti, si deve necessariamente sostituire il pannello di finitura esterno impermeabile con uno poroso e traspirante. In tal senso uno dei moduli semi-traspiranti progettati dovrà favorire l'utilizzo di un materiale con queste caratteristiche.

L'utilizzo dell'isolamento dinamico garantirà la riduzione delle dispersioni di calore dell'edificio e del fabbisogno energetico per riscaldamento e raffrescamento. È possibile ottenere pareti con spessori minimi con il vantaggio del risparmio di occupazione del suolo e la riduzione dei costi di costruzione, nonché l'integrazione architettonica degli elementi di immissione e di distribuzione dell'aria.

Progettare correttamente l'involucro ed i componenti opachi e trasparenti che lo costituiscono è un passo fondamentale nella regolazione dei flussi di calore e nella gestione dei consumi legati al fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento.

Una progettazione a basso consumo richiede di sviluppare ed adottare tecniche costruttive nuove che consentono il raggiungimento del benessere e della salubrità degli

ambienti interni, non solo attraverso l'isolamento e l'inerzia termica delle pareti, ma anche attraverso l'uso di sistemi attivi capaci di captare, accumulare e utilizzare l'energia proveniente da fonti rinnovabili con una tecnologia di tipo impiantistico.

Le tecnologie che riescono a sfruttare l'irraggiamento solare garantendo un migliore comportamento termico ed energetico del sistema edificio sono:

- termico;
- fotovoltaico;
- ibrido.

Sistemi di produzione di energia

Solare termico

Gli impianti solari termici sono dispositivi che permettono di catturare l'energia solare, immagazzinandola e usandola per diversi scopi, sfruttando il calore del sole per produrre corrente attraverso l'evaporazione di fluidi vettori che alimentano turbine collegate ad alternatori.

Il "collettore solare" o pannello solare è un sistema termico a basse temperature (circa 60°-70°) capace di sfruttare il calore del sole per scaldare un fluido termovettore. Quest'ultimo incanalato attraverso un circuito solare, sarà trasportato ad un accumulatore, avente la funzione di immagazzinare più energia termica possibile al fine di poterla usare successivamente, al momento del bisogno.

Un impianto solare termico è composto sempre almeno dalle seguenti unità:

- uno o più collettori che cedono il calore del sole al fluido;
- un serbatoio di accumulo del fluido.

Esistono tre tipi di impianti:

- a circolazione naturale: in questo tipo il fluido è l'acqua stessa che riscaldandosi sale per convezione in un serbatoio di accumulo (boiler), che deve essere posto più in alto del pannello, dal quale viene distribuito alle utenze domestiche; il circuito è aperto, in quanto l'acqua che viene consumata viene sostituita dall'afflusso esterno.
- a circolazione forzata: una pompa, detta circolatore, permette la cessione del calore raccolto dal fluido, alla serpentina posta all'interno del boiler. Il circuito è notevolmente più complesso, dovendo prevedere un vaso di espansione, un controllo di temperatura ed altri componenti, ed ha un consumo elettrico dovuto alla pompa e alla centralina di controllo, ma ha una efficienza termica ben più elevata.
- a svuotamento: il sistema è analogo al quello a circolazione forzata, solo che l'impianto viene riempito e quindi usato solo quando è necessario o possibile. Se l'impianto ha raggiunto la temperatura desiderata, si svuota, oppure se manca il sole l'impianto non si riempie.

Solare fotovoltaico

Un impianto fotovoltaico è un impianto elettrico costituito essenzialmente dall'assemblaggio di più moduli fotovoltaici, della necessaria elettronica ed eventualmente di sistemi meccanici-automatici ad inseguimento solare. Gli impianti fotovoltaici sfruttano l'energia solare per produrre energia elettrica mediante effetto fotovoltaico, possono essere suddivisi in due grandi categorie:

- impianti "grid-connect", connessi ad una rete di distribuzione esistente e gestita da terzi;
- impianti "ad isola" (detti anche "stand-alone"), non sono connessi a alcuna rete di distribuzione, ma sfruttano direttamente l'energia elettrica prodotta in loco.

L'evoluzione tecnologica ha permesso, negli anni, l'integrazione di questi sistemi attivi all'interno dei componenti dell'edificio. Da qui, "BIPV", acronimo di Building Integrated PhotoVoltaics, ovvero Sistemi fotovoltaici architettonicamente integrati. L'integrazione architettonica si ottiene posizionandola superficie fotovoltaica all'interno del profilo stesso dell'edificio che lo accoglie.

I moduli fotovoltaici sono considerati "integrati" quando risultano adibiti, oltre che alla produzione di elettricità, anche alla protezione contro le intemperie o protezione termica o alla protezione contro il rischio di caduta, come definito dall'Ordinanza sull'Energia EnEV N.2.3

Questo significa che un componente BiPV non può essere semplicemente installato sovrapponendolo ad un involucro edilizio tradizionale come una superficie in aggiunta. In altre parole lo strato PV non può essere rimosso dall'involucro edilizio senza comprometterne il funzionamento tecnologico primario dell'intero involucro, che risulterebbe incompleto senza il componente BiPV.

Dunque un sistema BiPV, in base al contesto specifico, deve soddisfare i requisiti basilari tipici dei componenti edilizi come la resistenza meccanica e la stabilità, la sicurezza in caso di incendio, l'igiene e la salute delle persone, la sicurezza e l'accessibilità in uso, la protezione acustica e il risparmio energetico oltre ad un uso razionale delle risorse naturali. Allo stesso modo, le proprietà elettrotecniche del PV come la potenza, il rendimento, la produttività, la schermatura elettromagnetica, ecc., non sono sufficienti da sole a definire gli elementi PV come integrabili nell'edificio.

Un modulo/sistema BiPV può essere utilizzato ad esempio come:

- Elemento di copertura (ad es. manto discontinuo o lucernario);
- Elemento di facciata opaca (sistema di rivestimento);
- Elemento di facciata trasparente (finestra o facciata);
- Protezione anticaduta (ad es. balaustre, parapetti, ecc.);
- Sistemi di ombreggiamento (sia per il controllo della luce naturale che per il controllo solare)

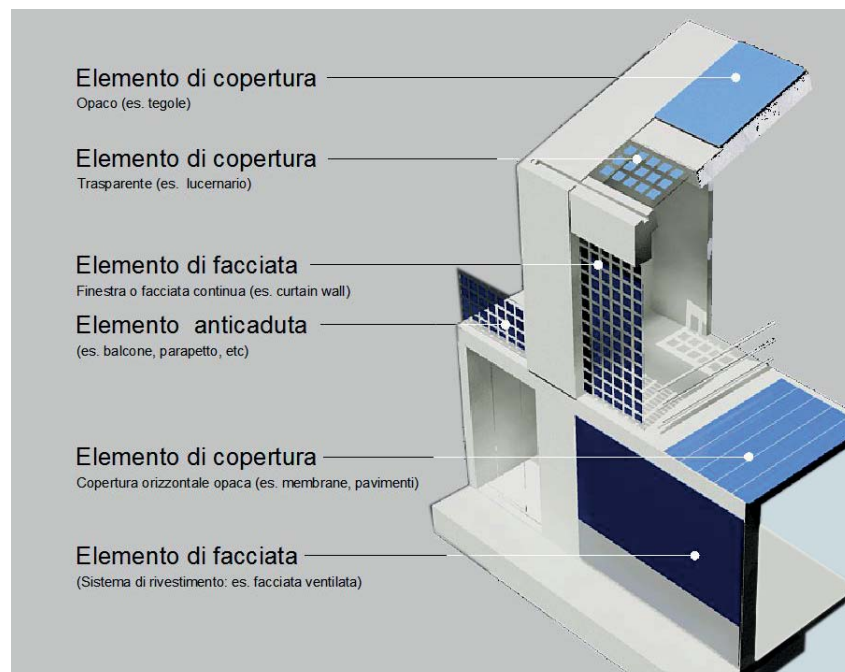


Figura 3. Elementi PV integrati (BiPV)

Sistema ibrido

L'impianto ibrido è sostanzialmente la fusione delle tecnologie fotovoltaiche e termiche sopra menzionate.

I pannelli ibridi sono in grado di convertire l'energia termica del modulo fotovoltaico in acqua calda ed aumentare l'efficienza delle celle solari, riducendo il calore sul pannello fotovoltaico, migliorandone in modo significativo il rendimento elettrico.

Esistono varie tecnologie di sistemi ibridi che si distinguono per il fluido utilizzato (aria, acqua), la presenza di un vetro (vetrati "glazed" o non vetrati "unglazed") o la tipologia

(collettori piani o a concentrazione).

Nello sviluppo del componente di facciata, perseguendo il concetto di involucro adattivo si è deciso di integrare i sistemi di produzione di energia nei moduli oggetto di questa tesi.

Al fine di poter commercializzare un prodotto, efficiente, ma allo stesso tempo architettonicamente interessante, si è deciso di puntare sulla massima integrazione possibile degli elementi attivi, adottando il concetto del BIPV. Seppure la tecnologia ibrida garantirebbe il doppio vantaggio dell'elettrico e del termico, la tecnologia fotovoltaica è l'unica che ad oggi garantisce diversi livelli di permeabilità alla luce permettendo quindi di progettare componenti d'involucro trasparenti, semi-trasparenti ed opachi.

5 Progetto di un modulo metallico multifunzionale adattivo

- 5.1 Definizione del modulo metallico adattivo: dimensioni, materiali e strati**
- 5.2 Analisi delle prestazioni energetiche su un caso studio virtuale**
- 5.3 Conclusioni**

5.1 Definizione del modulo metallico adattivo: dimensioni, materiali e strati

La ricerca intende mettere a punto un componente per gli involucri edilizi, leggero la cui massa frontale non sia superiore ai 150 kg/m^2 , integrando materiali intelligenti e adattivi, capaci di interagire per le loro proprietà fisiche con l'ambiente esterno e interno al fine di garantire il miglior comfort abitativo possibile all'interno degli ambienti confinati.

Il sistema di facciata comprende tre tipologie principali di moduli: trasparente, semi-trasparente e opaco.

Queste tipologie sono state scelte, al fine di fornire la necessaria libertà di progettazione architettonica per adattarsi ad ogni tipo di esigenza progettuale.

Inoltre, gli strati tecnologici possono essere incorporati in qualsiasi dimensione del modulo al fine di soddisfare progetti con diverse altezze di piano, garantendo un'elevata flessibilità compositiva e prestazionale.

La logica del sistema consiste nella possibilità di aggregare moduli funzionali differenti in grado di mutare il loro comportamento adattandosi alle diverse condizioni ambientali. Lo studio dell'elemento di facciata verticale è stato condotto su elementi modulari mono-piano di dimensione minima in larghezza, pari a mm 900, variabile fino ad un massimo di mm 1800, in altezza pari ad una dimensione minima di mm 3000 fino ad un massimo di mm 4500.

Il limite dimensionale del modello è legato alla tecnologia costruttiva dello stesso e soprattutto al peso del modulo pre-assemblato, che ne determina la facilità di movimentazione nell'ambito di cantiere.

Nella letteratura tecnica, dimensione e peso dei sistemi di facciata verticale realizzati con elementi "monoblocco", sono anche valutati in base alle operazioni di manutenzione che possono essere condotte sia sul lato esterno del componente (pulitura, sostituzione di parti fisse, mobili e di dispositivi meccanici, finitura superficiale con varie tecniche di

applicazione) che sul lato interno attraverso la rimozione parziale o totale dei sistemi di rivestimento prefiniti, generalmente costituiti da lastre di spessore inferiore a mm 15÷30, fissate meccanicamente a profili metallici in lamiera di acciaio inox pressopiegati o estrusi di alluminio.

La soluzione proposta ha inoltre il vantaggio di essere prodotta in fabbrica e messa in opera in cantiere attraverso un semplice alloggiamento dei moduli, con il conseguente risparmio di risorse energetiche per produzione del componente, la riduzione degli scarti e dei rifiuti, nonché un maggior controllo e precisione del prodotto finito.

Inoltre, la progettazione di edifici che integrino il sistema involucro con la parte impiantistica del manufatto edilizio, necessita di elementi modulari assemblati a secco successivamente alla realizzazione del telaio strutturale. Sarà questa la sfida, che nei prossimi anni coinvolgerà il settore industriale legato alla produzione degli involucri architettonici, e gli operatori coinvolti nella progettazione e realizzazione dell'opera, con lo scopo di favorire il controllo globale e una maggiore efficienza energetica dell'intero edificio.

Il componente di facciata proposto è costituito da moduli combinabili che possono essere suddivisi in tre macro-categorie:

- **Moduli trasparenti** che hanno la capacità di controllare in maniera dinamica l'illuminazione degli ambienti filtrando selettivamente la radiazione solare, attraverso l'utilizzo di vetri intelligenti elettrocromici;
- **Moduli semitrasparenti** che permettono il passaggio di una luce diffusa evitando la radiazione solare diretta. Garantiscono ottimi livelli di isolamento e accumulo termico attraverso l'uso di materiali a cambiamento di fase traslucidi. Inoltre, a seconda delle esigenze è possibile integrare sistemi per la produzione di energia, installando moduli fotovoltaici, BIPV.
- **Moduli opachi** che garantiscono eccellenti livelli di isolamento e accumulo termico attraverso l'azione congiunta di materiali a cambiamento di fase e isolanti termici ad alte prestazioni. Inoltre, a seconda delle esigenze è possibile integrare sistemi per la produzione di energia installando moduli fotovoltaici, BIPV.

Dopo un'attenta valutazione dei casi di studio, dei materiali applicati e dei sistemi tecnologici costruttivi, si è deciso di progettare un nuovo componente di involucro in modo tale che le tre tipologie di moduli funzionali sopra descritti possano essere applicati in un unico telaio strutturale in alluminio estruso, per uno spessore massimo inferiore a 150 mm.

La scelta di inserire i diversi strati funzionali all'interno di uno spessore contenuto, deriva dalla volontà progettuale di creare un sistema versatile applicabile sia su edifici di nuova costruzione, sia in sovrapposizione al paramento murario esistente per la riqualificazione energetica degli edifici.

Per le tre diverse macro-categorie, trasparente, semitrasparente ed opaco, il sistema involucro è stato schematizzato in tre fasce funzionali, con spessori definiti in base alla normativa di riferimento e ai materiali presenti in commercio:

- **Fascia esterna, spessore di 10 mm.** Strato di finitura esterno con la funzione di delimitare verso l'esterno l'intercapedine e di proteggere la struttura dell'edificio dagli agenti atmosferici. Oltre a garantire l'aspetto formale ed estetico dell'intero edificio, può prevedere l'integrazione di sistemi di produzione di energia, BIPV.
- **Fascia intermedia, spessore 70 mm.** Camera d'aria all'occorrenza debolmente ventilata, il cui obiettivo è quello di migliorare le prestazioni estive ed invernali dell'involucro.
- **Fascia interna, spessore 68 mm.** Strato prestazionale progettato per garantire

livelli di isolamento termico ed acustico adeguati

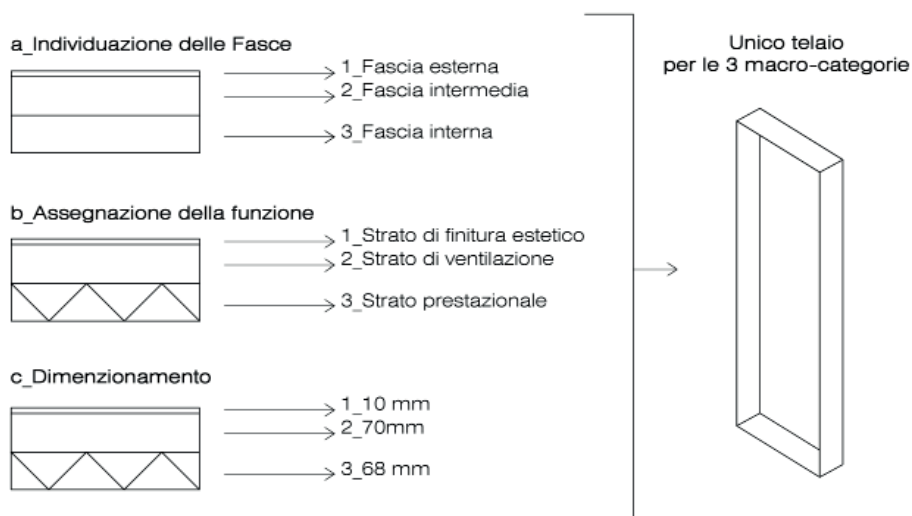


Figura 1. Schema del processo ideativo del modulo multifunzionale

La schematizzazione dell'involucro in queste tre fasce (figura 1), ci consente di assemblare tra loro moduli funzionali appartenenti alle tre diverse macro-categorie (opaco + semitrasparente + trasparente), riuscendo sempre a garantire la continuità delle fasce funzionali, senza mai interrompere il flusso d'aria dell'intercapedine.

Un approccio di questo tipo, oltre a garantire i vantaggi della produzione industriale in serie, offre ai progettisti la possibilità di scegliere tra un'ampia gamma di combinazioni sia in termini compositivo-architettonico, che in termini prestazionali in base ai contesti di applicazione.

Il sistema pensato per questo progetto di ricerca è stato determinato, come mostrato nella *Tabella 1*, studiando i possibili vantaggi e svantaggi di cui abbiamo discusso nei capitoli precedenti, nonché tenendo conto anche di quelli che potrebbero essere i futuri scenari di crescita, sviluppo tecnologico e produttivo della azienda Cantori srl.

In totale moduli multifunzionali studiati sono cinque:

- un elemento denominato T1 appartenente alla macro categoria "moduli trasparenti",
- due elementi denominati S1 e S2 appartenenti alla macro categoria "moduli semitrasparenti",
- due elementi denominati O1 e O2 appartenenti alla macro categoria "moduli opachi".

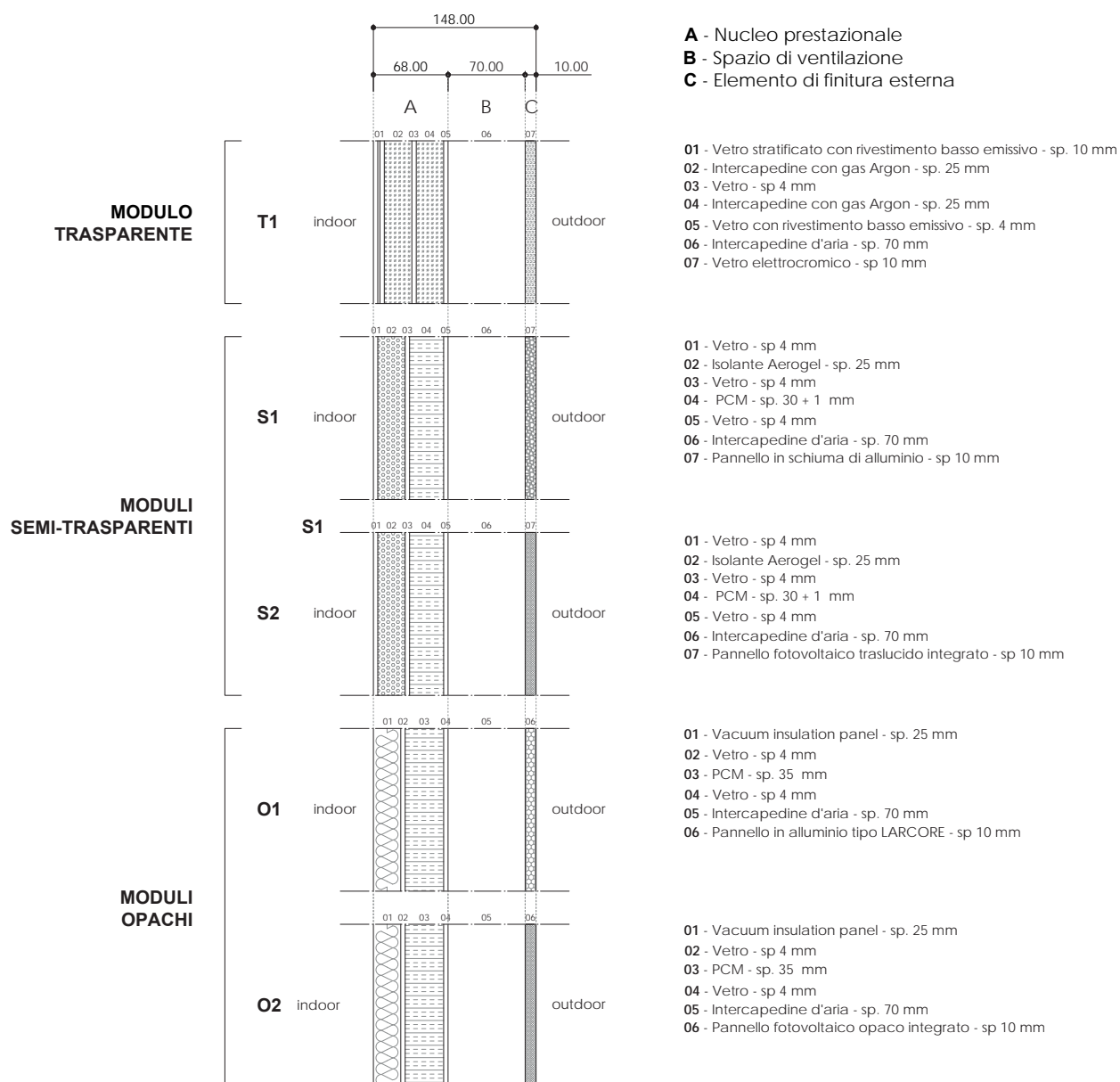
Le analisi termo-igrometriche saranno condotte attraverso il software di calcolo PAN 7.1, programma della Anit, sviluppato da TEP s.r.l.. Seppure lo strumento consente di calcolare i parametri dinamici di trasmittanza periodica, sfasamento, attenuazione, capacità termica periodica (Cip) e profondità di penetrazione, abbiamo la consapevolezza di avere risultati che andrebbe verificati attraverso simulazioni condotte con un uno strumento informatico che permette di analizzare il comportamento della facciata in regime dinamico, esaminando in modo dettagliato l'andamento delle temperature all'interno dell'intercapedine e di conseguenza i valori di trasmittanza reale del componente.

Per il progetto di ricerca si è data la precedenza alla studio dei moduli opachi e semitrasparenti, essendo questo il core business dell'azienda Cantori srl. Ciononostante, si è ritenuto opportuno indagare e pensare ad un elemento di tipo trasparente sia per la completezza della ricerca stessa, sia come stimolo per una crescita futura dell'azienda al fine di ampliare la gamma prodotti attualmente disponibile.

Modulo di facciata multifunzionale		Effetto sinergico, layout personalizzato della facciata per adattarsi a diversi edifici e climi			
Caratteristiche		Funzione	Specifiche (partendo dallo strato interno)	Spessore [mm]	
Modulo trasparente	T1	<input checked="" type="checkbox"/> Controllo solare <input type="checkbox"/> Illuminazione diffusa <input type="checkbox"/> Inerzia termica <input type="checkbox"/> Isolamento Termico <input type="checkbox"/> Produzione di energia	Vetro	4	
			1 PVB	2	
			Vetro con rivestimento basso emissivo	4	
			2 Intercapedine con gas argon	25	
			3 Vetro	4	
			4 Intercapedine con gas argon	25	
			5 Vetro con rivestimento basso emissivo	4	
			6 Intercapedine d'aria	70	
			Vetro	4	
			Rivestimento conduttivo trasparente Strato elettrocromico		
7 Strato elettrolitico ionizzante Strato di accumulo ionico Rivestimento conduttivo trasparente	2				
Vetro	4				
			TOTALE	148	
Moduli semi trasparenti	S1	<input type="checkbox"/> Controllo solare <input checked="" type="checkbox"/> Illuminazione diffusa <input checked="" type="checkbox"/> Inerzia termica <input checked="" type="checkbox"/> Isolamento Termico <input type="checkbox"/> Produzione di energia	1 Vetro	4	
			2 Isolante Aerogel	25	
			3 Vetro	4	
			4 PCM	30 + 1	
			5 Vetro	4	
	6 Intercapedine d'aria	70			
	7 Pannello in schiuma di alluminio	10			
				TOTALE	148
	S2	<input type="checkbox"/> Controllo solare <input checked="" type="checkbox"/> Illuminazione diffusa <input checked="" type="checkbox"/> Inerzia termica <input checked="" type="checkbox"/> Isolamento Termico <input checked="" type="checkbox"/> Produzione di energia	1 Vetro	4	
			2 Isolante Aerogel	25	
3 Vetro			4		
4 PCM			30 + 1		
5 Vetro			4		
6 Intercapedine d'aria	70				
Vetro	4				
7 Incapsulante Conduttore elettrico Celle solari con rivestimento anti riflesso Incapsulante	2				
Vetro	4				
			TOTALE	148	
Moduli opachi	O1	<input type="checkbox"/> Controllo solare <input type="checkbox"/> Illuminazione diffusa <input checked="" type="checkbox"/> Inerzia termica <input checked="" type="checkbox"/> Isolamento Termico <input type="checkbox"/> Produzione di energia	1 Vacuum insulation panel	25	
			2 Vetro	4	
			3 PCM	35	
			4 Vetro	4	
			5 Intercapedine d'aria	70	
	Alluminio	1			
	6 Nido d'ape in alluminio Alluminio	8 1			
				TOTALE	148
	O2	<input type="checkbox"/> Controllo solare <input type="checkbox"/> Illuminazione diffusa <input checked="" type="checkbox"/> Inerzia termica <input checked="" type="checkbox"/> Isolamento Termico <input checked="" type="checkbox"/> Produzione di energia	1 Vacuum insulation panel	25	
			2 Vetro	4	
3 PCM			35		
4 Vetro			4		
5 Intercapedine d'aria			70		
Vetro posteriore nero Incapsulante					
6 Materiali conduttivi anneriti Celle solari monocristalline Inchiostro ceramico	10				
			TOTALE	148	

Tabella 1. Moduli di facciata O1+O2+S1+S2+T1

STRATIGRAFIE E FASCE FUNZIONALI



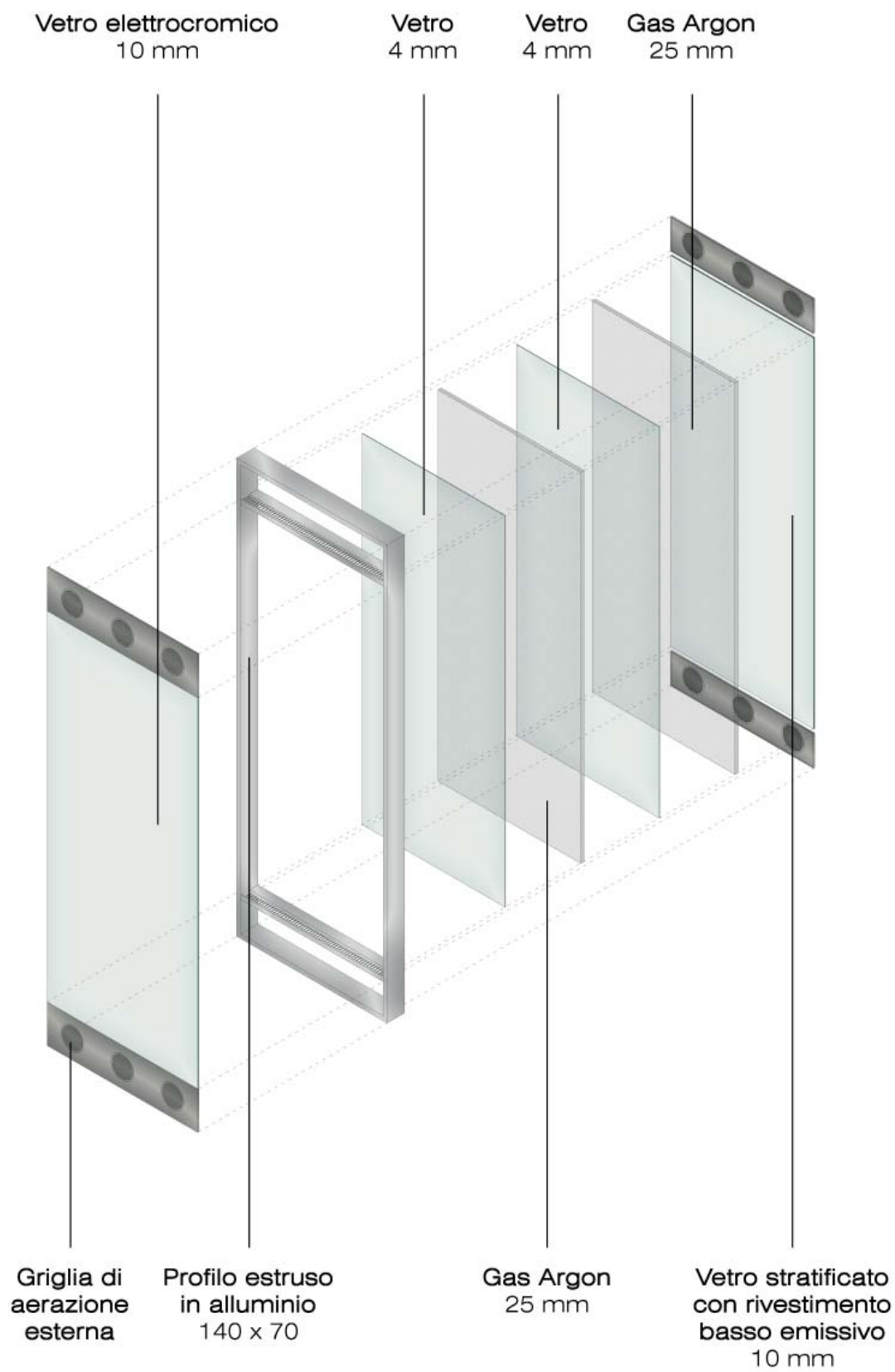
T1_ Modulo Trasparente



T1 MODULO TRASPARENTE								
Specifiche (partendo dallo strato interno)	Spessore [mm]	Densità [Kg/m ³]	Conduttività [W/mK]	Resistenza [m ² k/W]	g-Value		T _v	
<i>Superficie Interna</i>				0,130				
Vetro	4							
1 PVB	2	2500	1,000	0,010				
Vetro con rivestimento basso emissivo	4							
2 Intercapedine con gas argon	25	1400	0,038	0,665				
3 Vetro	4	2500	1	0,004				
4 Intercapedine con gas argon	25	1400	0,038	0,665				
5 Vetro con rivestimento basso emissivo	4	2500	1	0,04				
6 Intercapedine di aria	70	1	0,193	0,665	off	on	off	on
Vetro	4							
Rivestimento conduttivo trasparente								
Strato elettrocromico								
7 Strato elettrolitico ionizzante	2	2400	0,200	0,050				
Strato di accumulo ionico								
Rivestimento conduttivo trasparente								
Vetro	4							
<i>Superficie Esterna</i>				0,040				
TOTALE	148			2,27	0,27	0,10	0,42	0,10

Trasmittanza U	0,448 W/m ² K
Massa Superficiale	139,07 Kg/m ²
Capacità Termica	89,80 KJ/m ² K
Sfasamento	3h 1' - Valore invernale 3h 8' - Valore estivo

Tabella 2. Specifiche modulo T1



Per il modulo trasparente T1 (figura 2), si è deciso di adottare come strato di finitura esterna una vetrata intelligente, ovvero una finestra elettrocromica realizzata inserendo sistemi adattivi tra due vetri.

Gli strati del pannello composito elettrocromico sono visibili nella Figura 2, mentre la composizione del modulo può essere vista nella Tabella 1 e nella Tabella 2.

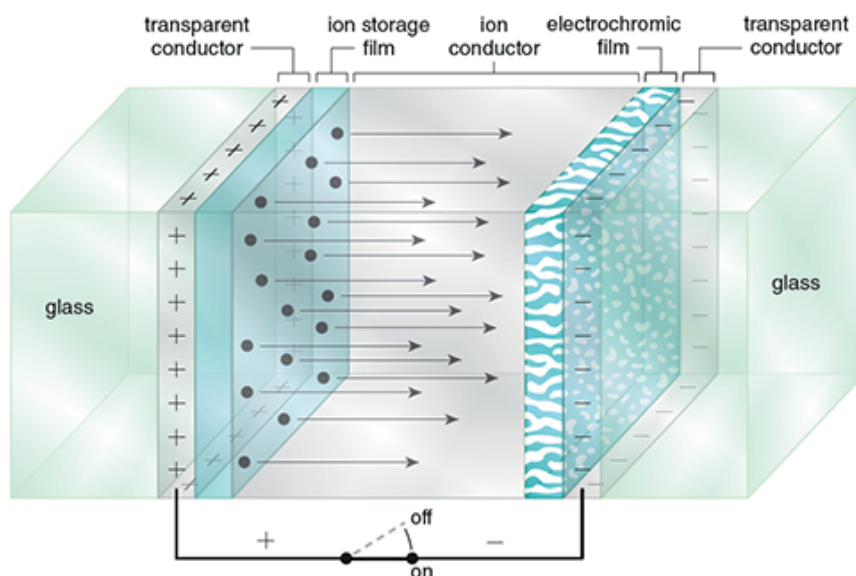


Figura 2. Schema funzionamento vetrata elettrocromica

Questo modulo è dotato di un dispositivo di controllo solare attivo, il cui vetro passa da uno stato chiaro e trasparente ad uno colorato blu-grigio attraverso l'applicazione di energia elettrica fornita in bassa tensione (in genere 1-SV DC) con il vantaggio che non è necessaria ulteriore energia per mantenere lo stato desiderato. Un ciclo di commutazione completo richiede circa 15-20 minuti di tempo e meno di 2 Wh/m² di potenza.

Per fornire elettricità ai singoli pannelli di vetro, è necessario un circuito di cablaggio che può essere incorporato nel telaio strutturale del singolo modulo di facciata.

La modulazione dinamica delle proprietà spettrali di una vetrata, all'interno degli intervalli di lunghezze d'onda del visibile e dell'infrarosso, consentono di adattare il comportamento termico e ottico di una vetrata alle mutevoli condizioni dell'ambiente in cui si trova l'edificio. Ciò permette un controllo appropriato della radiazione solare all'interno dell'edificio, contribuendo ad una significativa riduzione dei consumi energetici della climatizzazione estiva e dell'illuminazione artificiale, soprattutto nei climi freddi, raggiungendo alte percentuali di risparmio, rispetto alle comuni finestre trasparenti sia negli edifici residenziali che del terziario.

Il vantaggio delle vetrate elettrocromiche è che hanno la capacità di mantenere la trasmissione spettrale durante il cambiamento dei livelli di trasparenza, ragione per la quale è diventata una delle tecnologie cromogeniche più utilizzate per la costruzione di facciate.

Il sistema elettrocromico (EC) adottato per questo progetto è in grado di attivare dinamicamente la gradazione della trasparenza di una lastra di vetro, attraverso un input esterno. Essendo materiali "intelligenti", i cromogeni richiedono l'attivazione della propria funzionalità attraverso l'applicazione di uno stimolo esterno reversibile nel tempo. Nello specifico il raggiungimento di una temperatura critica attiverà la modulazione cromatica di un film termocromico effettuando il passaggio da un comportamento semiconduttore, biossido di vanadio, ad un comportamento di tipo metallico. D'altra parte, i materiali fotocromatici vengono attivati grazie all'irraggiamento in precisi intervalli di lunghezze d'onda. Tuttavia rimane comunque garantito il controllo e l'interazione da parte degli utenti in base alle loro esigenze.

L'obiettivo è ottenere involucro adattivo, che si comporti proprio come una "terza pelle" per gli utenti dell'edificio, in grado di controllare dinamicamente il passaggio di energia multipla del vetro. Il trasferimento di energia attraverso il modulo T1 coinvolge una parte della cosiddetta "radiazione termica" (10 m – 100 m), con componenti prossime alla radiazione solare e alla radiazione infrarossa, coinvolgendo meccanismi di scambio termico combinato tra solidi e gas. Ad esempio, se i guadagni solari gratuiti possono essere considerati un valore aggiunto nella stagione invernale, lo stesso non si può dire con riferimento alla stagione estiva, poiché gli stessi apporti solari diventano ora carichi termici indesiderati.

I benefici derivanti dalla modulazione spettrale delle finestre intelligenti oltre l'uso ottimale della luce naturale durante le ore diurne che comporta maggiori livelli di comfort visivo, consente di ottenere risparmi energetici significativi sia per il riscaldamento invernale che per il raffrescamento estivo dell'edifici.

Lo strato prestazionale interno risulta essere composta da un sistema a triplo vetro con due intercapedini riempite di gas Argon dello spessore di 25 mm. Vedi Tabella 2.

Si è adottata una tecnologia basso emissiva (Low-E), per ridurre al minimo la quantità di luce infrarossa e ultravioletta che passa attraverso il vetro, senza ridurre la quantità di luce che entra in casa, compito questo affidato alla tecnologia EC dello strato di finitura esterno. I vetri Low-E hanno un rivestimento microscopicamente sottile, trasparente e capace di riflette il calore, mantenendo la temperatura costante all'interno degli ambienti confinati.

Esistono due tipi di rivestimenti basso emissivi

- Rivestimenti passivi Low-E (Hard-Coat), prodotti attraverso l'applicazione di un rivestimento pirolitico direttamente sul vetro, nella fase di produzione sulla linea float. Questo permette al rivestimento di "fondersi" sulla superficie calda del vetro, creando un forte legame, o "hard-coat", molto durevole nel tempo;
- Rivestimenti Low-E a controllo solare (Soft-Coat) prodotti utilizzando il processo Magnetron Sputtering Vapor Deposition (MSVD), ovvero applicando in modalità off-line il rivestimento sul vetro pretagliato in una camera sottovuoto a temperatura ambiente. Questo rivestimento, noto anche come "rivestimento morbido", deve essere sigillato in un vetro isolante (IG) o in un'unità laminata. Il rivestimento morbido ha un'emissività inferiore e prestazioni di controllo solare superiori, offrendo un controllo solare più performante.

Il sistema basso emissivo dovrà essere scelto in base alle esigenze progettuali e alle condizioni climatiche. Per questo progetto le simulazioni sono state svolte con Low-E a controllo solare (Soft-Coat).

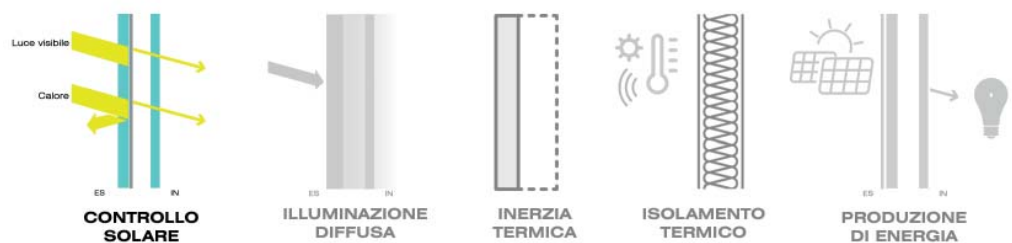


Figura 3. Schema delle funzioni affidate al modulo T1

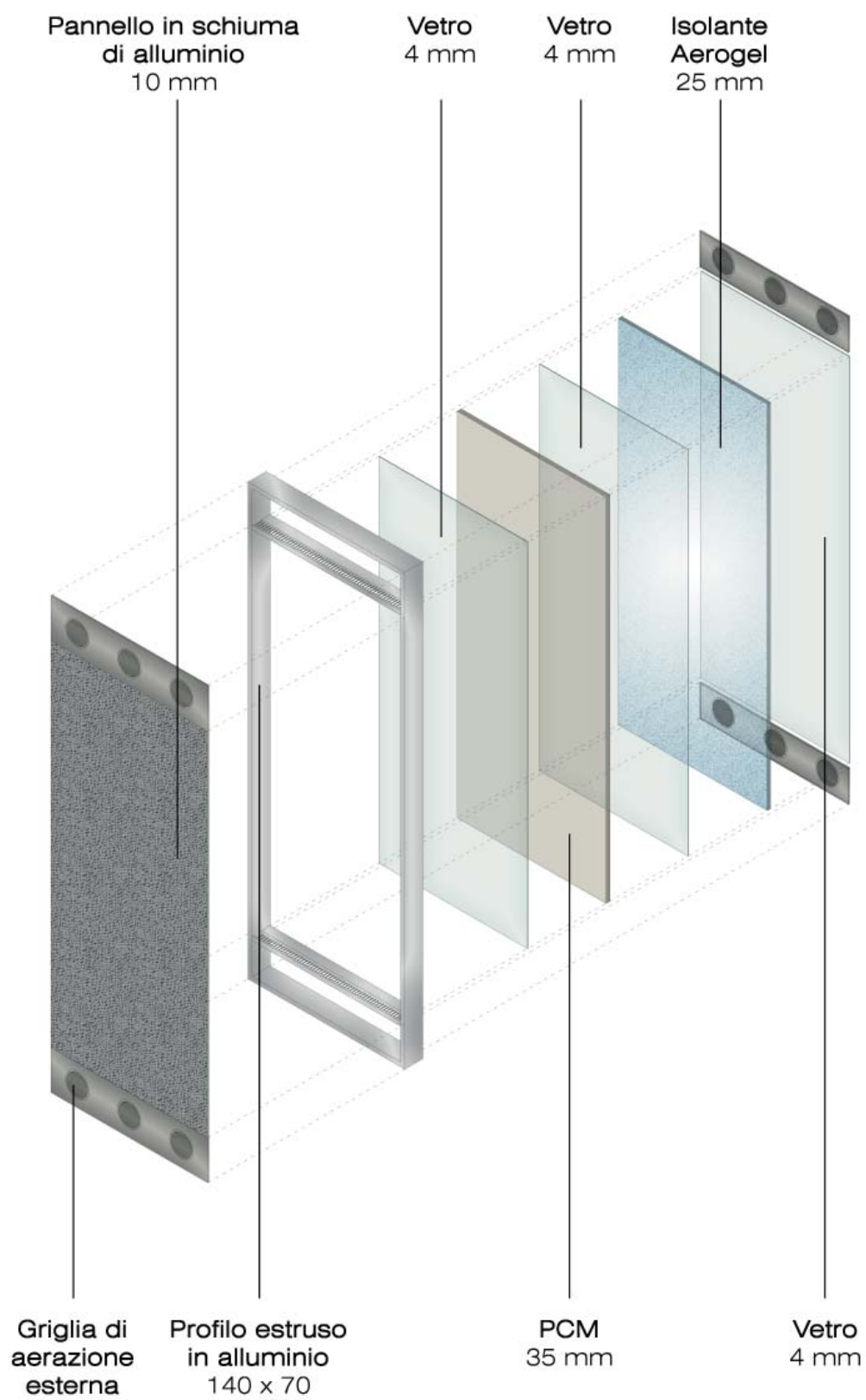
S1_ Modulo Semitrasparente



S1 MODULO SEMI-TRASPARENTE								
Specifiche (partendo dallo strato interno)	Spessore [mm]	Densità [Kg/m ³]	Conduttività [W/mK]	Resistenza [m ² kW]	g-Value		T _v	
					PCM solid	PCM liquid	PCM solid	PCM liquid
<i>Superficie Interna</i>								
1 Vetro	4	2500	1,000	0,130				
2 Isolante Aerogel	25	220	0,014	1,786	0,55	0,55	0,62	0,62
3 Vetro	4	2500	1,000	0,004				
4 PCM	30+1	800	0,140	0,214	0,33	0,37	0,38	0,55
5 Vetro	4	2500	1,000	0,004	0,90	0,86	0,90	0,86
6 Intercapedine di aria	70	1	0,193	0,665	-	-	-	-
7 Pannello in schiuma di alluminio	10	500	0,268	0,037	0,62	0,62	0,68	0,68
<i>Superficie Esterna</i>								
				0,040				
TOTALE	148			2,88	0,30	0,30	0,36	0,42

Trasmittanza U	0,347 W/m ² K
Massa Superficiale	64,57 Kg/m ²
Capacità Termica	137,30 KJ/m ² K
Sfasamento	6h 55' - Valore invernale 7h 15' - Valore estivo

Tabella 3. Specifiche modulo S1



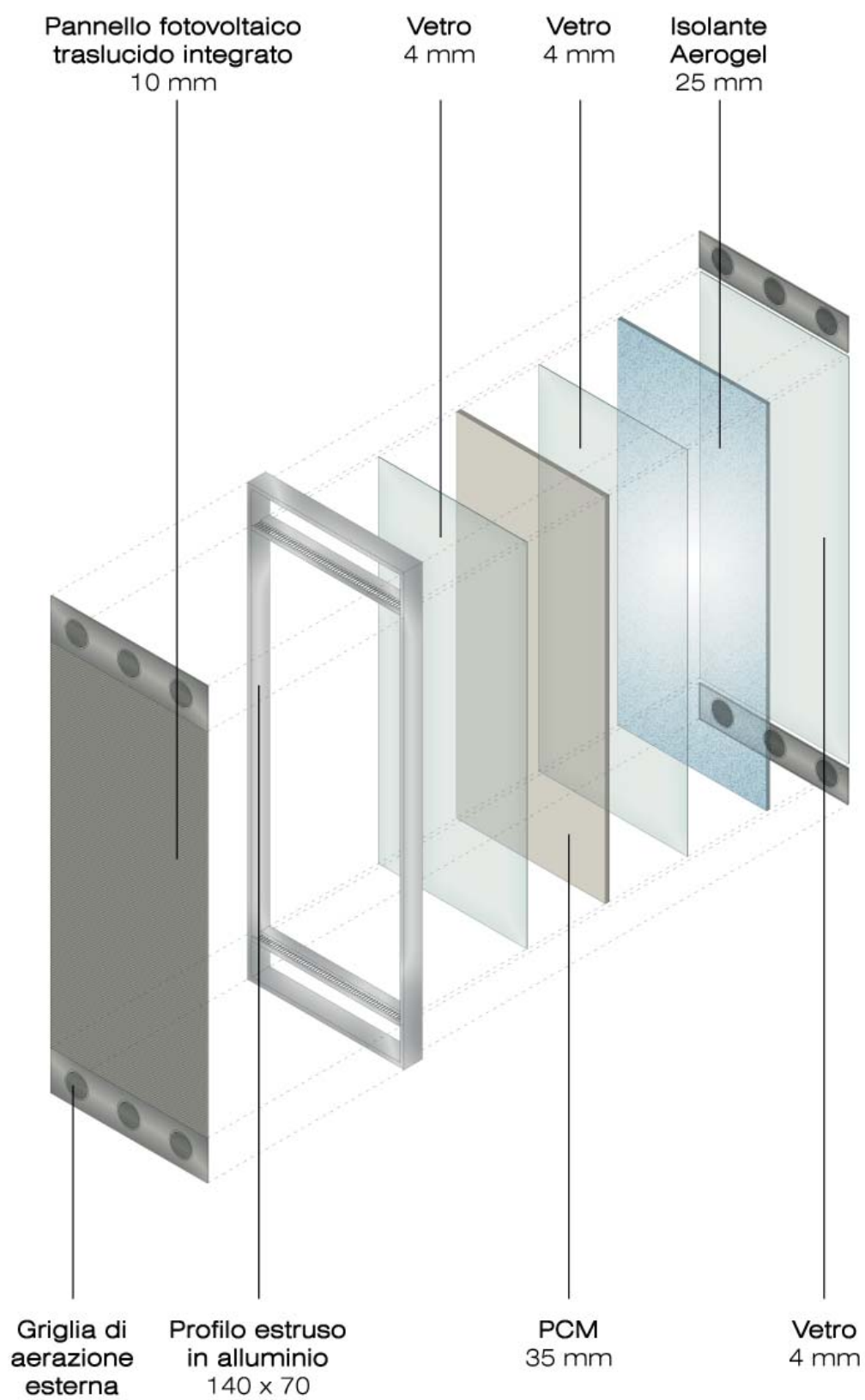
S2_ Modulo Semitrasparente



S2 MODULO SEMI-TRASPARENTE								
Specifiche (partendo dallo strato interno)	Spessore [mm]	Densità [Kg/m ³]	Conducibilità [W/mK]	Resistenza [m ² k/W]	g-Value		T _v	
					PCM solid	PCM liquid	PCM solid	PCM liquid
<i>Superficie Interna</i>								
1 Vetro	4	2500	1,000	0,130				
2 Isolante Aerogel	25	220	0,014	1,786	0,55	0,55	0,62	0,62
3 Vetro	4	2500	1,000	0,004				
4 PCM	30+1	800	0,140	0,214	0,33	0,37	0,38	0,55
5 Vetro	4	2500	1,000	0,004	0,90	0,86	0,90	0,86
6 Intercapedine di aria	70	1	0,193	0,665	-	-	-	-
Vetro	4							
Incapsulante								
7 Conduttore elettrico								
Celle solari con rivestimento anti riflesso	2	2400	0,200	0,050	0,73	0,73	0,79	0,79
Incapsulante								
Vetro	4							
<i>Superficie Esterna</i>				0,040				
TOTALE	148			2,90	0,41	0,41	0,35	0,41

Trasmittanza U	0,345 W/m ² K
Massa Superficiale	83,57 Kg/m ²
Capacità Termica	152,00 KJ/m ² K
Sfasamento	7h 11' - Valore invernale 7h 20' - Valore estivo

Tabella 4. Specifiche modulo S2



I moduli semitrasparenti S1 ed S2 differiscono tra loro soltanto per lo strato di finitura esterna; la camera di ventilazione e lo strato prestazionale sono i medesimi.

Il modulo S1 è pensato con uno strato di finitura esterna in pannelli di schiuma di alluminio dello spessore di 10 mm, mentre il modulo S2 prevede la produzione di energia attraverso sistemi fotovoltaici semitrasparenti integrati nell'elemento di facciata, anche in questo caso dello spessore di 10 mm, riuscendo in questo modo a garantire l'uniformità complessiva dello spessore dei pannelli.

La schiuma metallica, grazie alla sua struttura fibrosa, filtra l'aria in ingresso, regolando non solo il quantitativo d'aria che entra in ambiente ma anche la sua qualità. La schiuma che costituisce il pannello di finitura del modulo S1, come già descritta nei capitoli precedenti, è composta da una struttura cellulare di metallo solido contenente all'interno pori di gas grandi, per lo più simili a bolle. Esistono due tipi di schiume: a celle aperte e a celle chiuse. Per garantire un'illuminazione diffusa all'interno degli ambienti si è scelto di adottare pannelli di schiume a celle aperte con una rete interconnessa di pori. La larghezza dei pori è variabile (figura 4), in relazione sia alle scelte progettuali estetiche-formali sia alle esigenze che riguardano il grado di permeabilità alla luce richiesto dal progetto.

Generalmente, le lastre sono disponibili nei formati standard di 1200 mm x 2500 mm fino ad un massimo di circa 3500 mm di lunghezza, pertanto, le dimensioni disponibili sul mercato, si adattano facilmente alle dimensioni del modulo di progetto; sono comunque possibili anche formati personalizzati.

Le proprietà più comuni delle schiume metalliche sono la leggerezza (la porosità può raggiungere il 98%) la moderata conduttività elettrica / termica, la non infiammabilità, un elevato rapporto rigidità-peso e ottime prestazioni di assorbimento energetico e acustico. Grazie a queste proprietà fisiche, ma anche ad una strategia aziendale volta alla commercializzazione e diffusione di prodotti innovativi e di nicchia si è scelto questo materiale come elemento di finitura del pannello S1.



Figura 4. Schiuma di Aluminio Alusion con differenti gradi di permeabilità alla luce



Figura 5. Applicazione della Schiuma di Aluminio Alusion sulla facciata di Fondazione Prada, Milano, Studio OMA, 2015

L'alternativa alla schiuma di alluminio è la possibilità di produrre energia elettrica attraverso l'applicazione di moduli BIPV (Building Integrated Photovoltaics) semitrasparenti. Infatti, per il modulo di facciata S2 sono previsti sistemi BIPV, utilizzati come fonte di energia rinnovabile per fornire energia elettrica. I vetri fotovoltaici assorbono la radiazione solare in entrata, producendo energia, e forniscono un grado di trasparenza variabile in base alle tecnologie (figura 6) dei differenti prodotti in commercio.

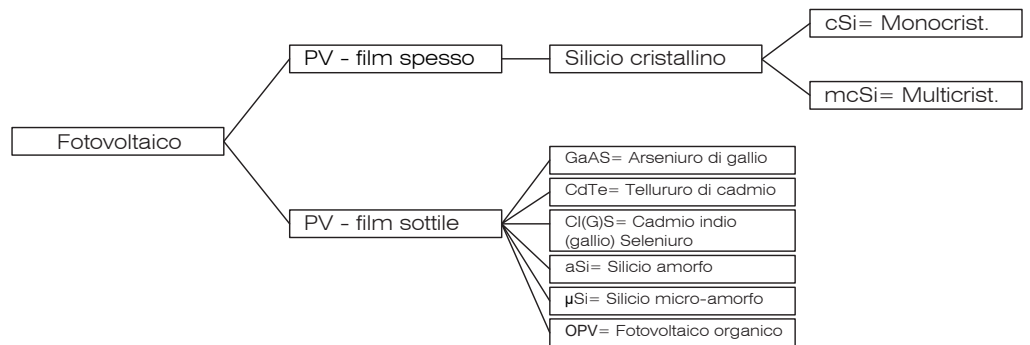


Figura 6 . Panoramica delle differenti tecnologie fotovoltaiche

L'attuale efficienza dei moduli BIPV, dichiarata in condizioni di test standard (STC), varia tra l'8,7% per il fotovoltaico organico, il 15,7% per il tellururo di cadmio e il 25,1% per l'arseniuro di gallio.

In condizioni di alte temperature o di scarsa illuminazione, le perdite di efficienza dei moduli in silicio cristallino sono maggiori rispetto alla tecnologia a film sottile.

Allo stesso tempo, in condizioni ottimali, la tecnologia a film sottile risulta avere prestazioni inferiori rispetto ai picchi massimi ottenibili dai moduli in silicio, tuttavia, la visibilità delle celle fotovoltaiche può essere un punto a sfavore rispetto alla maggiore integrazione che offre il film sottile.

¹ Il Cradle to Cradle Products Innovation Institute è dedicato a promuovere l'innovazione per l'economia circolare attraverso prodotti che hanno un impatto positivo sulle persone e sul pianeta. Cradle to Cradle Certified™ è una misura riconosciuta a livello mondiale dei prodotti più sicuri e sostenibili realizzati per l'economia circolare.

In sostanza, l'aspetto estetico dei prodotti fotovoltaici è direttamente collegato alla sua efficienza e costo. Soprattutto le tecnologie a film sottile e le celle cristalline con applicazioni colorate sono accompagnate da un'efficienza ridotta in condizioni di test standard e da costi di sistema più elevati. Ciononostante, una standardizzazione delle dimensioni dei moduli apre la possibilità alla produzione di grandi serie e quindi un alto potenziale di miglioramento dei costi.

Per quanto riguarda il ciclo di vita (LCA), i sistemi BIPV sono composti da differenti materiali rari, come il Gallio e/o l'Indio, definiti critici (CRM).

Ad oggi è possibile riciclare fino ad oltre il 95% del prodotto finito. Sono disponibili diversi impianti di riciclaggio per il fotovoltaico, ma la maggior parte di essi è progettata solo per il trattamento di vetro, metallo o rifiuti elettronici, mentre il resto delle celle solari viene incenerita o smaltita in discariche specializzate. Inoltre, il cadmio e l'arsenico sono cancerogeni per l'uomo e quindi sono presenti nell'elenco dei prodotti vietati da Cradle to Cradle¹. Un risultato intermedio qualitativo della valutazione BIPV è mostrato nella Tabella 5. tenendo conto degli aspetti economici, ecologici ed estetici

/	VALORE ECONOMICO				ECOLOGICO	ESTETICO	
	Eff. modulo	Comportamento in caso di scarsa illuminazione	Sensibilità alla temperatura	W_p	Economia circolare	Cella PV visibile	Aspetto
cSi (Silicio Monocrist.)	+ +	-	-	+	-	+	- -
mcSi (Silicio Multicrist.)	+	-	-	+ +	-	+	- -
GaAs Arseniuro di gallio	+ +	o	o	+	- -	+	- -
CdTe Tellururo di cadmio	+	o	o	o	- -	- -	+
C(G)S Cadmio indio (gallio) Seleniuro	+	o	o	o	-	- -	+
aSi Silicio amorfo	-	o	o	o	-	- -	+
μ Si Silicio micro-amorfo	-	o	o	o	-	- -	+
OPV Fotovoltaico organico	- -	o	o	o	+	- -	+

Tabella 5. Indicazioni qualitative dei sistemi BIPV,

La scelta del sistema fotovoltaico BIPV per il modulo di progetto S2 è ricaduta sul una tecnologia di pannelli in film sottile di silicio amorfo, disponibili con differenti gradi di trasparenza: dal 10% al 60%. L'efficienza dei moduli è inversamente proporzionale all'aumentare della trasparenza. (Tabella 6).

Le analisi termo-igrometriche effettuate sul singolo componente S2, utilizzano un prodotto fotovoltaico, con una trasparenza del 50% e una capacità produttiva di 53 W per modulo di dimensioni standard di mm 1400x1100. figura 8

Polysolar Model	Class	Stabilized Performance STC				
		Transparency	V_{mpp} (V)	I_{mpp} (A)	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)
		Electrical tolerance +5/-0%				
PS-ASG-110	110 W	Opaque	78	1.41	100	1.79
PS-ASG-100	100 W	10%	77	1.27	100	1.61
PS-ASG-90	90 W	20%	77	1.13	100	1.43
PS-ASG-78	78 W	30%	77	0.99	100	1.25
PS-ASG-67	67 W	40%	77	0.87	99	1.07
PS-ASG-53	53 W	50%	75	0.71	99	0.90
PS-ASG-42	42W	60%	75	0.56	99	0.71
Max over current rating	2.0 A					
Temperature Co-efficient	$I_{sc} + 0.09\%/K$ $V_{oc} - 0.33\%/K$ $P_{mpp} - 0.20\%/K$					
Operating Temperature	-40°C to +85°C					
Max System Voltage	600 V					

Tabella 6. Tabella prodotto Polysolar serie PS-MC-SE

Puntando ad una maggiore integrazione dell'involucro edilizio con i sistemi tecnologici ed impiantistici dell'intero edificio, è possibile prevedere l'utilizzo di batterie di accumulo di energia proveniente dai sistemi fotovoltaici integrati in facciata (modulo semi trasparente S2 e modulo opaco O2)

Dopo un'ampia ricerca di mercato, e al di là di tutte le preoccupazioni energetiche ed economiche, il punto cruciale nel caso dei depositi di batterie è l'aspetto autorizzativo della tecnologia all'interno del sistema di facciata. In questo contesto, solo la batteria di flusso redox è una possibile tecnologia per un'installazione integrata.

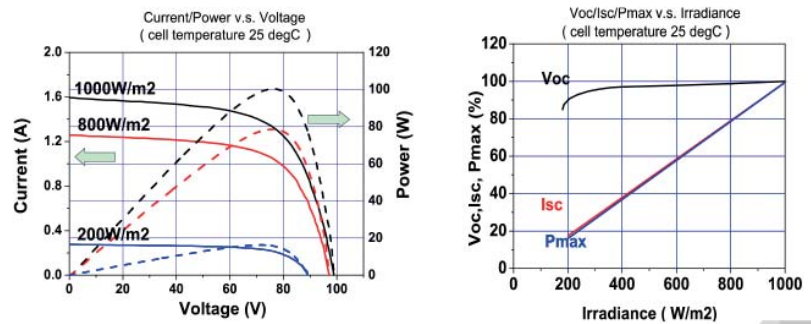
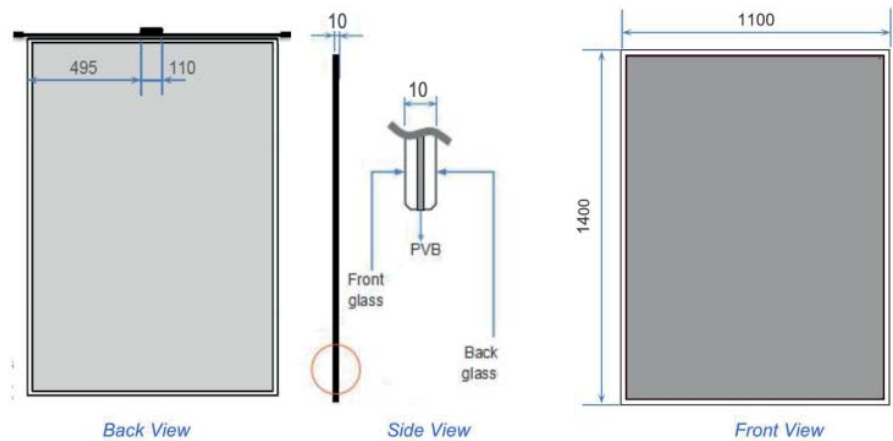


Figura 7. Caratteristiche e proprietà del modulo standard Polysolar, serie PS-MC-SE in silicio amorfo.

La Redox-Flow-Battery immagazzina l'energia elettrica in composti chimici in forma disciolta in un solvente. I due elettroliti accumulatori di energia circolano in due circuiti separati, tra i quali avviene lo scambio ionico nella cella galvanica tramite una membrana. Nella cellula, le sostanze disciolte vengono ridotte chimicamente o ossidate, rilasciando energia elettrica.

Poiché i composti chimici disciolti in un solvente vengono immagazzinati in serbatoi separati dalla cella, la quantità di energia immagazzinata non dipende dalle dimensioni della cella. La batteria a flusso redox è correlata alla cella a combustibile, ma anche agli accumulatori per la sua reversibilità elettrochimica. Nella Figura 9 è mostrato lo schema della batteria a flusso redox. Oltre al grande vantaggio di un'installazione consentita, la tecnologia redox-flow consente un concetto modulare, grazie alla possibilità di dividere i serbatoi richiesti in diversi moduli.

Il tipo di batteria di flusso più utilizzato e più importante fino ad oggi è l'accumulatore redox al vanadio. Inoltre, ci sono altri tipi come l'accumulatore redox al bromuro di sodio, l'accumulatore redox al cloruro di sodio, l'accumulatore al bromuro di zinco e l'accumulatore redox all'uranio.

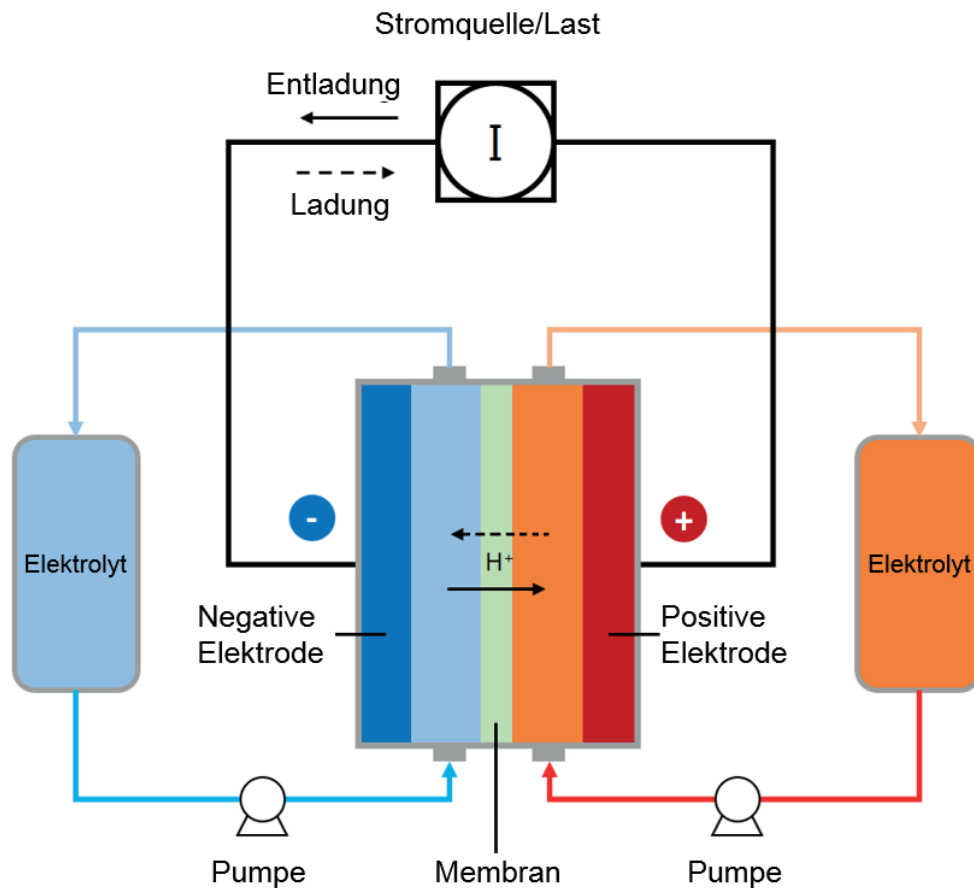


Figura 8. Schema di funzionamento di una batteria redox-

Come già anticipato all'inizio della descrizione, i moduli semi-trasparenti S1 e S2, sono costituiti dallo stesso strato prestazionale interno, il quale si compone dei seguenti materiali:

PCM semitrasparente dello spessore di mm 30 interposto tra due lastre di vetro, isolante aereogel dello spessore di mm 25 e uno strato di finitura interna composto da una lastra di vetro dello spessore di mm 4.

Il PCM è tra due vetri per via del cambiamento di fase e vicino all'intercapedine perché il suo cambiamento di fase è inerente alla temperatura e quindi influisce sui moti convettivi dell'intercapedine.

I PCM hanno la capacità di cambiare la loro fase (tipicamente da solido a liquido e viceversa) a temperatura ambiente. Ciò si traduce nell'immagazzinamento della quantità di energia latente necessaria per cambiare il proprio stato (solido, liquido). I PCM rappresentano una soluzione altamente efficiente, poiché il loro utilizzo migliora la gestione energetica dell'involucro edilizio. In particolare, l'impiego di questi materiali consente una migliore gestione del flusso di energia da e per l'edificio, facilitando il raffreddamento e/o riscaldamento degli ambienti interni e comunque rallentando la velocità di dispersione termica.

Un problema importante dei PCM in edilizia è nella bassa conduttività termica e, quindi, nei lunghi tempi di risolidificazione (in questi casi la ventilazione notturna controllata è stata utilizzata anche per aumentare il coefficiente di convezione).

Vengono utilizzati principalmente in componenti opachi, tipicamente in pareti e soffitti, ma negli ultimi anni, si sta osservando una tendenza verso l'integrazione di questi materiali in componenti dell'involucro trasparente o l'utilizzo di PCM trasparenti nei

sistemi di costruzione.

Esistono materiali PCM appartenenti alle famiglie dei composti organici, inorganici ed eutettici (figura 10). Per applicazioni nel settore edilizio, i composti inorganici solo in pochi casi sono adatti all'accumulo dell'energia termica a causa della possibile irreversibilità dei loro processi di liquefazione e solidificazione, dovuto a problemi di segregazione. Essi possono inoltre presentare inconvenienti derivanti dal fenomeno della corrosione.

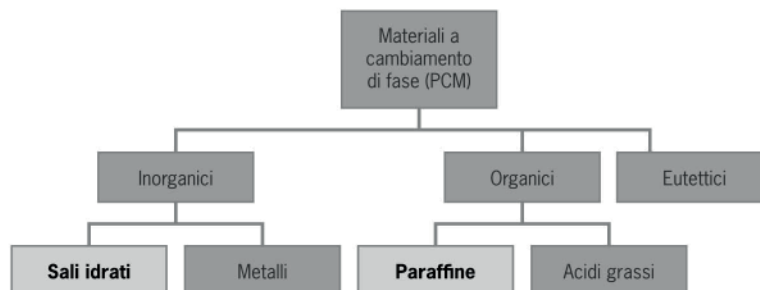


Figura 9. Schema dei diversi materiali a cambiamento di fase presenti sul mercato.

I PCM eutettici sono invece poco applicati dati i costi ancora estremamente elevati.

I composti organici sono suddivisi in paraffine e non. La maggior parte dei PCM non paraffine sono costituiti da acidi, nocivi e costosi, e oli vegetali.

Per i moduli S1 e S2, non si è tenuto conto soltanto della capacità termica del materiale, ma anche di altre proprietà fisiche che permettono l'assorbimento e la trasmissione della luce a lunghezze d'onda specifiche. La trasmissione della luce dell'acqua coincide perfettamente con la curva di sensibilità dell'occhio umano, per questo motivo, sono stati selezionati, in S1 e S2, PCM ad alto contenuto d'acqua, come i sali idrati, al fine di ottenere elementi di costruzione trasparenti.

Infatti, i sali idrati sono composti chimici costituiti da molecole di sale combinate con molecole di acqua. Il loro punto di fusione è compreso in un intervallo di temperature tra i 15 °C e gli 80 °C. I vantaggi dei sali idrati sono il basso costo, una capacità di stoccaggio di un elevato calore latente, un preciso punto di fusione ed un'elevata conducibilità termica. Tra gli svantaggi possiedono scarse proprietà di nucleazione che li rendono vulnerabili al sottoraffreddamento, fenomeno in cui una sostanza si raffredda sotto il punto di congelamento senza solidificarsi, questa situazione può essere utile in alcune applicazioni, ma per la maggior parte degli impieghi necessitano dell'aggiunta di agenti specifici per evitare questo problema, una variazione di volume nella fase solido/ liquido può essere maggiore del 10%, risulta così necessario prevedere speciali contenitori per consentire questa variazione di volume. Inoltre alcuni sali idrati non riescono a cristallizzare completamente dopo ogni ciclo, di conseguenza perdono ogni capacità di utilizzo del proprio calore latente e alcuni possono essere tossici e molto corrosivi verso i metalli, presentando problemi di sicurezza e smaltimento.

Negli ultimi anni sono stati proposti in letteratura diversi componenti edilizi trasparenti che incorporano PCM traslucido o trasparente. Il PCM trasparente è un materiale che lascia passare la luce ma assorbe la parte infrarossa dello spettro e questo aumenta la temperatura del PCM fino al punto di fusione, che come in tutti i PCM avviene a temperatura costante.

Confrontando il comportamento di un prototipo che utilizza un sistema di vetratura semplice al cui interno è inserito del PCM con quello di un doppio vetro di riferimento convenzionale, emerge come l'analisi ha indicato che il sistema di vetrate con PCM ha fornito condizioni termiche interne migliori rispetto al sistema convenzionale per la maggior parte del tempo durante le varie stagioni. Inoltre, è stato riscontrato che maggiore è l'irraggiamento solare esterno, maggiori sono i vantaggi offerti dall'unità di vetratura con PCM.

Infatti, più del 50% dell'energia della radiazione solare incidente viene misurata nella gamma dello spettro visibile. Sulla base di questo fatto, il concetto di elemento trasparente dovrebbe consentire la trasmissione della radiazione visibile e la radiazione invisibile nella parte infrarossa dello spettro da assorbire e convertire in calore.

Per questi moduli, il PCM utilizzato per immagazzinare energia termica in forma latente è composto di sali idrati $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ con temperatura di cambiamento di fase di 27°C . Dalle nostre simulazioni il PCM incorporato all'interno di lastre di vetro, ha un accumulo termico latente fino a 4268 kJ/m^2 , il che significa che trascorrono 7 ore prima che il calore venga trasmesso. In Estate, questa proprietà posticipa la richiesta di energia massima durante la notte, riducendo le temperature interne della stanza di almeno 5°C . Mentre in inverno, i guadagni solari sono massimizzati grazie alle proprietà del PCM di incorporare il calore durante il giorno per poi rilasciarlo all'interno dell'edificio nelle ore notturne, durante la fase di solidificazione.

Lo strato di aerogel costituisce insieme al PCM il nucleo prestazionale dei moduli S1 e S2. Ad esso viene affidato il compito di isolamento termico.

Esistono cinque tipi di aerogel: silice, ossido di metallo, organico, carbonio e aerogel ibridi e compositi. Di questi, l'aerogel di silice è il tipo più ampiamente studiato e utilizzato. È composto da una matrice isolante flessibile a base di fibre di vetro e da una elevata concentrazione di aerogel nanoporoso, in grado di garantire le migliori prestazioni termiche in ogni condizione applicativa.

Gli aerogel organici possono derivare da una grande varietà di precursori monomerici o polimerici come: melammina-formaldeide, fenolo-furfurolo-formaldeide, isocianato polimerico, fenolo melammina, polivinilcloruro. Le proprietà di questi aerogel dipendono in gran parte dai precursori utilizzati. Gli aerogel organici sono materiali ideali per isolanti termici e acustici.

Gli aerogel di carbonio sono derivati da aerogel organici e sono materiali di carbonio amorfo con elevata porosità che contengono cluster interconnessi di nanoparticelle di carbonio con diametri rispettivamente tra 3 e 20 nm. Per ottenerli sono necessarie temperature superiori a 600°C che attivano un processo di pirolisi o carbonizzazione in un'atmosfera di gas inerte (elio, azoto o argon), formando una rete di carbonio poroso, che include regioni sia grafitiche che amorfe. Questi materiali promettenti, vengono applicati come elettrodi per l'idrogeno e l'accumulo elettrico, isolanti termici e acustici, adsorbenti, strumenti per la deionizzazione capacitiva e supporti per catalizzatori.

Gli aerogel ibridi più studiati contengono elementi sia inorganici che organici e nanoparticelle nella matrice gel, che vengono miscelate con polimeri reticolati e rinforzate con fibre e materiali riempitivi, formando reti compenetranti. Questi aerogel sono stati ottenuti per migliorare le proprietà meccaniche, fisiche e di lavorabilità.

Gli aerogel compositi sono ottenuti mediante copiolisi di fibre morbide come poliacrilonitrile (PAN) e matrice di aerogel RF. Attraverso questo processo di ottenimento vengono migliorate la tenacità, la resistenza e la conduttività termica degli aerogel.

Grazie dell'elevata porosità e della dimensione dei nanometri dei pori, gli aerogel hanno ridotti valori di conducibilità solida, di conduttività termica gassosa e di trasmissione infrarossa radiativa.+

Nella ricerca della massima protezione termica, nel progetto dei moduli S1 e S2 si propone l'utilizzo di un aerogel traslucido di silicio, nanostrutturato composto da circa il 96% di aria e 4% di silice, questo risulta un isolante essenziale per le sue proprietà uniche: conduttività termica estremamente bassa, $0,014 \text{ W/(m}^*\text{K)}$, flessibilità elevata, resistenza alla compressione, idrofobicità e facilità d'uso. Utilizzabile in una fascia di temperature comprese tra -200°C e $+450^\circ\text{C}$, disponibile in spessori variabili, consente di ottimizzare le dimensioni dell'involucro, garantendo i più alti valori di resistenza termica a parità di spessore con i materiali isolanti di tipo convenzionale. Il suo impiego consente di ottenere importanti risultati in questo progetto di ricerca, garantendo un effettivo incremento dell'efficienza energetica complessiva nei moduli S1 e S2 con ottimi risultati termici e acustici, grazie agli elevati valori R per unità di superficie.

Sono disponibili in forma granulata e monolitica. Gli aerogel granulari sono relativamente

facili da produrre e meno costosi dei pannelli monolitici, ma mostrano prestazioni ottiche e termiche peggiori. Gli aerogel monolitici consentono la visione attraverso il materiale, ma il loro processo di fabbricazione non è sviluppato su scala industriale.

Gli aerogel di silice sono ragionevolmente trasparenti nello spettro infrarosso. Un parametro importante che influenza il trasporto termico è lo spessore ottico del campione. Il trasporto radiativo diventa un modo dominante di conduzione termica a temperature più elevate, cioè sopra i 2000 ° C, ma a basse temperature anche il trasporto radiativo si riduce.

La sua specifica composizione garantisce inoltre ottime prestazioni di resistenza al fuoco (Euroclasse A2) consentendo quindi l'applicazione in condizioni di utilizzo molto gravose o dove sia richiesta una prestazione di livello superiore.

L'utilizzo dell'aerogel dello spessore di 25 mm tra due vetri float, sp. 4 mm, garantisce una riduzione del 62% delle perdite di calore, con una diminuzione del 17% della trasmissione della luce rispetto a un doppio vetro con uno strato basso emissivo.

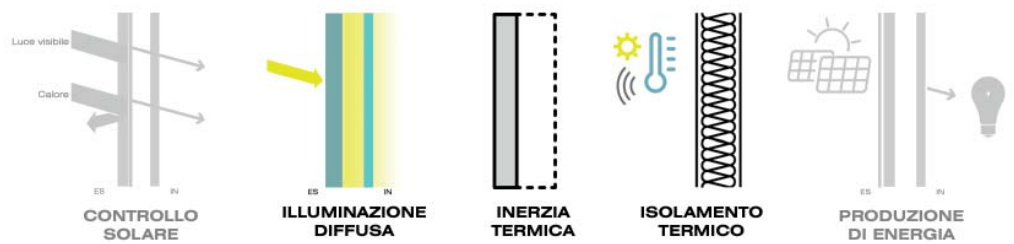


Figura 10. Schema delle funzioni affidate al modulo S1

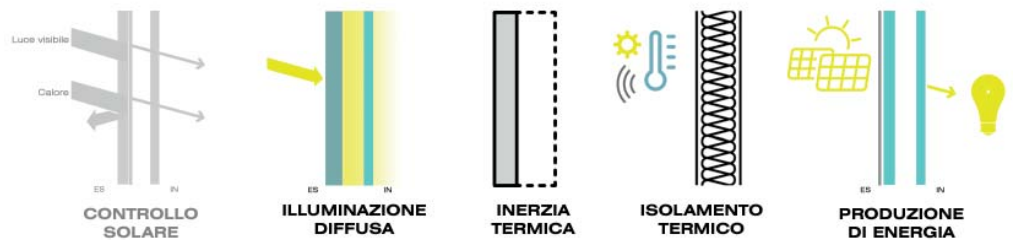


Figura 11. Schema delle funzioni affidate al modulo S2

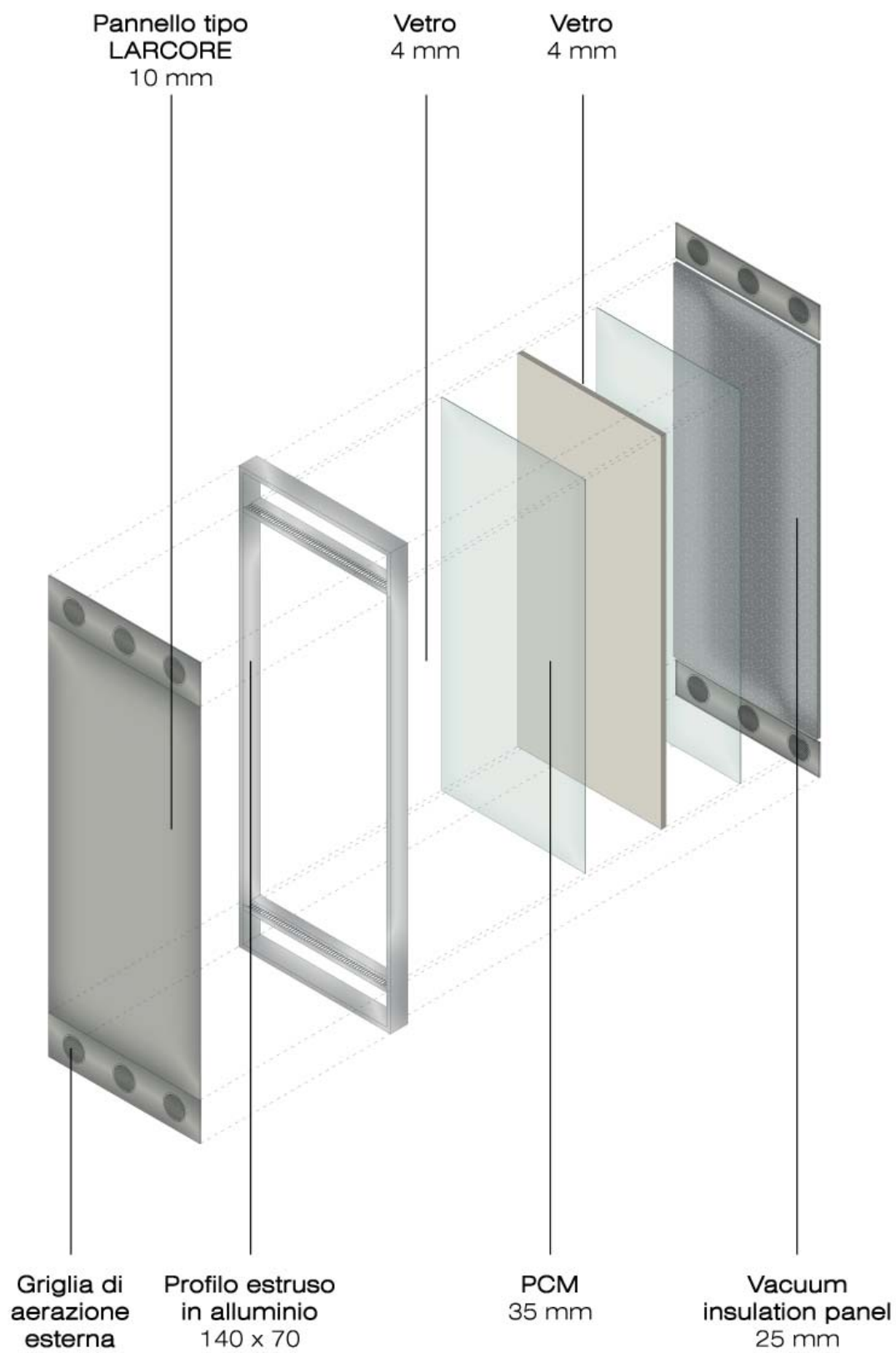
01_ Modulo Opaco



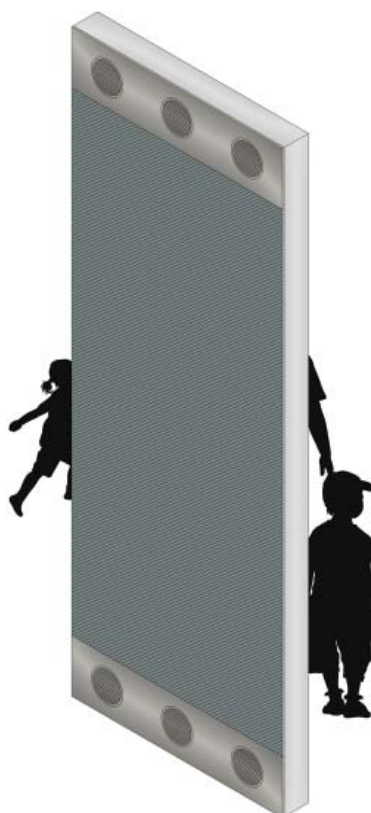
01		MODULO OPACO					
Specifiche (partendo dallo strato interno)	Spessore	Densità	Conduktività	Resistenza	g-Value		T _v
	[mm]	[Kg/m ³]	[W/mK]	[m ² K/W]			
<i>Superficie Interna</i>							
1	Vacuum insulation panel	25	400	0,002	0,130		
2	Vetro	4	2500	1,000	15,723		
3	PCM	35	800	0,140	0,250		
4	Vetro	4	2500	1,000	0,004		
5	Intercapedine d'aria	70	1	0,193	0,665	-	-
	Alluminio	1					
6	Nido d'aape in alluminio	8	2700	220	0,296		
	Alluminio	1					
<i>Superficie Esterna</i>							
				0,040			
TOTALE		148			17,11	-	-

Trasmittanza U	0,058 W/m ² K
Massa Superficiale	63,48 Kg/m ²
Capacità Termica	153,70 KJ/m ² K
Sfasamento	14h 5' - Valore invernale 14h 11' - Valore estivo

Tabella 7. Specifiche modulo 01



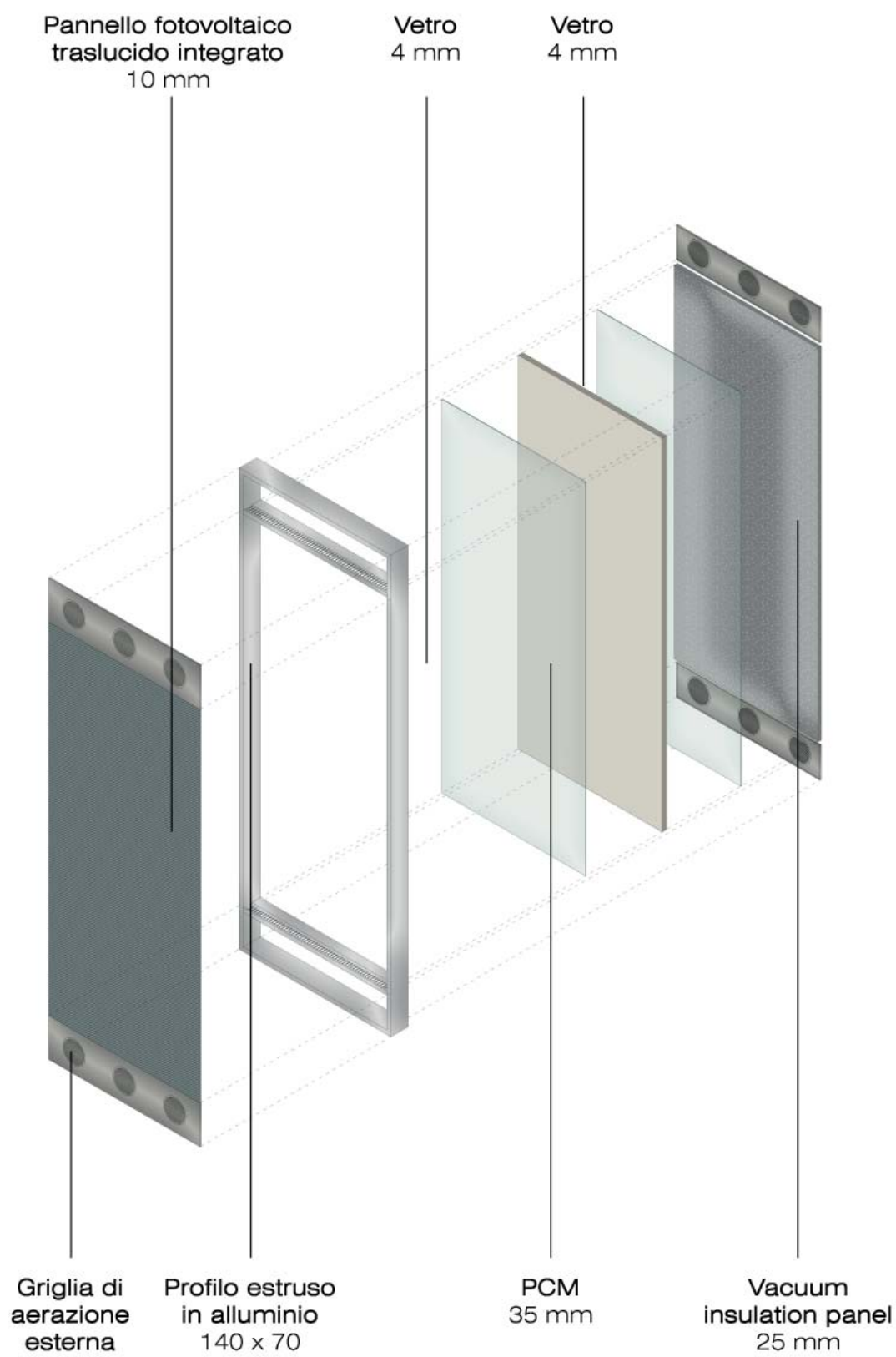
O2_ Modulo Opaco



O2 MODULO OPACO						
Specifiche (partendo dallo strato interno)	Spessore [mm]	Densità [Kg/m ³]	Conduttività [W/mK]	Resistenza [m ² kW]	g-Value	T _v
<i>Superficie Interna</i>				0,130		
1 Vacuum insulation panel	25	400	0,002	15,723		
2 Vetro	4	2500	1,000	0,004		
3 PCM	35	800	0,140	0,250		
4 Vetro	4	2500	1,000	0,004		
5 Intercapedine d'aria Vetro posteriore nero Incapsulante	70	1	0,193	0,665	-	-
6 Materiali conduttivi anneriti Celle solari monocristalline Inchiostro ceramico	10	2400	0,200	0,050		
<i>Superficie Esterna</i>				0,040		
TOTALE	148			16,87	-	-

Trasmittanza U	0,061 W/m ² K
Massa Superficiale	82,07 Kg/m ²
Capacità Termica	168,20 KJ/m ² K
Sfasamento	13h 39' - Valore invernale 13h 48' - Valore estivo

Tabella 8. Specifiche modulo O2



I moduli opachi O1 ed O2, come anche per i moduli semitrasparenti S1 e S2, differiscono tra loro soltanto per lo strato di finitura esterna; la camera di ventilazione e lo strato prestazionale sono i medesimi.

Il modulo O1 è pensato con uno strato di finitura esterna in pannelli di alluminio a nido d'ape dello spessore di 10 mm, mentre il modulo O2 prevede la produzione di energia attraverso sistemi fotovoltaici opachi integrati nell'elemento di facciata, anche in questo caso dello spessore di 10 mm, riuscendo così a garantire l'uniformità complessiva dello spessore dei pannelli.

Il pannello sandwich in alluminio con struttura a nido d'ape è costituito da lamiere di rivestimento in alluminio accoppiate al nucleo centrale attraverso un procedimento produttivo continuo che avviene attraverso l'utilizzo di un film termoplastico.

A seconda delle diverse case produttrici che operano sul mercato, si possono trovare pannelli con diversi formati e dimensioni, ma nella stragrande maggioranza dei casi, i prodotti compositi in alluminio vengono fabbricati nelle dimensioni lineari standard di larghezze: 1250 e 1500 mm e lunghezze: 2000, 4000, e 6000 mm. Lo spessore complessivo del pannello può variare tra i 6 e i 25 mm.

Leggerezza, ma allo stesso tempo una grande capacità di durare nel tempo e di sapersi adattare a forme architettoniche geometriche articolate. I pannelli compositi in alluminio sono estremamente durevoli e possono resistere all'azione degli agenti atmosferici fino a 30 anni, mantenendo invariate le caratteristiche fisiche e meccaniche originali. Possono essere tagliati, piegati, curvati, forati, senza che essi perdano l'integrità strutturale di cui sono dotati.

Le caratteristiche di durezza e resistenza si devono alla capacità intrinseca dell'alluminio di resistere alla corrosione. Quando l'alluminio è esposto all'aria, crea un sottile strato di ossido di alluminio che rende la facciata resistente ai fenomeni corrosivi. Va detto, inoltre, che i materiali e i compositi in alluminio presenti in commercio, vengono pretrattati con appositi prodotti, formando una patina protettiva che li rende ancor più resistenti alla corrosione e quindi ideali per essere installati su edifici situati in contesti costieri o comunque in ambienti estremi.

Grazie alle sue caratteristiche di resistenza ai processi di deterioramento ed usura, gli involucri edilizi costituiti da pannelli di composito in alluminio, richiedono un livello di manutenzione molto basso, rispetto alle facciate costruite in maniera tradizionale, (intonaco, legno e cemento). I costi e lo sforzo di manutenzione dei sistemi di rivestimento in alluminio sono quasi inesistenti; sono infatti sufficienti semplici processi di pulizia con acqua a pressione moderata, da ripetere una o due volte l'anno, per rimuovere residui di terriccio e polvere.

Come già citato in precedenza, la stragrande maggioranza dei produttori di pannelli compositi in alluminio offrono un'ampia gamma di forme e colori che consentono infinite soluzioni progettuali. I moduli in composito però, non vanno considerati come semplici elementi di finitura della facciata; essi fanno parte di un sistema involucro che deve garantire prestazioni più complesse: ad esempio, se accoppiati con altri materiali, i moduli in composito offrono caratteristiche funzionali come isolamento termico e acustico. Inoltre l'alluminio, essendo classificato come materiale non combustibile, risulta idoneo per tutte le richieste di sicurezza antincendio. Se esposto a temperature oltre i 600° Celsius, si scioglie, ma non è infiammabile, non sviluppa gas, ne rilascia sostanze tossiche.

L'alternativa al composito in alluminio schiuma di alluminio è la possibilità di produrre energia elettrica attraverso l'applicazione di moduli BIPV (Building Integrated Photovoltaics) opachi.

Infatti, per il modulo di facciata O2 sono previsti sistemi BIPV, utilizzati come fonte di energia rinnovabile per fornire energia elettrica.

I prodotti scelti per la produzione di energia elettrica integrata sono moduli fotovoltaici personalizzati in cui le celle solari sono incorporate all'interno di vetro stratificato temperato. Il vetro posteriore è rivestito con uno smalto nero e il vetro anteriore è stampato digitalmente con inchiostri ceramici con un motivo puntiforme omogeneo. La combinazione di celle nere e vetro posteriore con i pixel in ceramica crea un'illusione ottica di un colore o un'immagine omogenea da una distanza di oltre 5 metri.

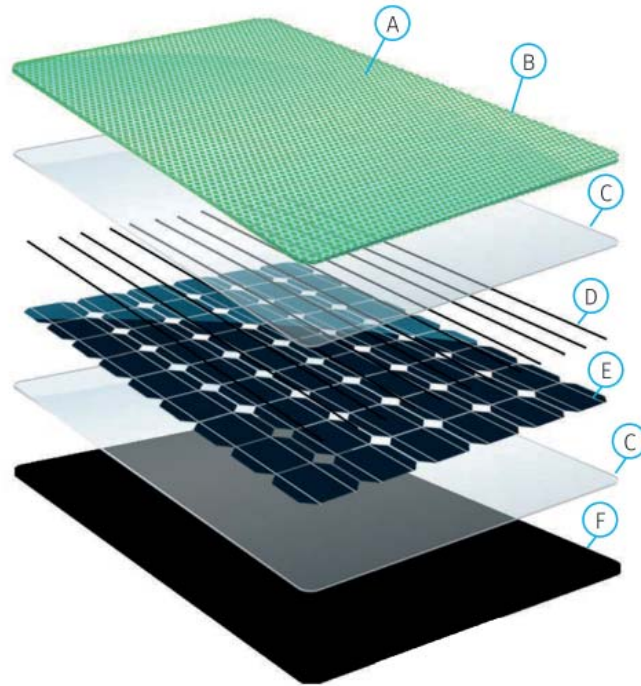


Figura 12. Schema degli strati del sistemi fotovoltaico scelto_ Kamaleon solar dell'azienda ColorBlast

La tecnologia si compone dei seguenti strati:

A. Inchiostri ceramici

Stampati all'esterno o all'interno del vetro, gli inchiostri mantengono invariato il colore resistendo agli agenti atmosferici e agli urti per un periodo di 50 anni.

B. Vetro anteriore

Il vetro frontale temperato da 4 mm può avere diversi livelli di riflettività, da altamente riflettente a diffusa.

C. Incapsulanti EVA

L'EVA fornisce una protezione ottimale contro gli elementi per le celle solari e una forte adesione.

D. Materiali conduttivi scuri

I componenti conduttivi d'argento risultano essere nascosti per mantenere l'illusione ottica.

E. Celle solari monocristalline

Vengono utilizzate celle monocristalline da 6" ad alta efficienza

F. Vetro posteriore nero

Il vetro posteriore temperato nero da 5 mm è generalmente collegato a un sistema di supporto adesivo.

E' stato scelto di utilizzare un film incorporato che permette di ottenere un colore desiderato applicabile su qualsiasi modulo fotovoltaico standard (PV). Questo consente un'integrazione completa del PV in facciata, ottenendo un colore totalmente uniforme, e personalizzabile in base alle esigenze di progetto.

Il mercato attuale offre, nella maggior parte dei casi, prodotti fotovoltaici (PV) progettati soprattutto per massimizzare l'assorbimento della radiazione solare sottovalutando invece la tematica dell'integrazione architettonica. Per questo progetto di ricerca si è scelto invece di utilizzare un prodotto che privilegi l'integrazione architettonica con il resto della facciata.

Inoltre, i componenti del pannello solare (celle e / o connettori interni) risultano essere

invisibili e totalmente integrati.

Generalmente, i moduli sono disponibili nelle dimensioni di lunghezza variabile da 347 mm a 2900 mm e larghezza variabile da 238 mm a 1800 mm, lo spessore è di 10 mm. Pertanto, le dimensioni disponibili sul mercato, si adattano facilmente alle dimensioni del modulo di progetto; sono comunque possibili anche formati personalizzati.

La produzione di energia elettrica dipende dal colore scelto, colori più scuri garantiscono una maggiore produzione rispetto ai colori più chiari, fino a un massimo di 150 Wp per m².

Come già anticipato all'inizio della descrizione, i moduli opachi O1 e O2, sono costituiti dallo stesso strato prestazionale interno, il quale si compone dei seguenti materiali:

PCM opaco dello spessore di mm 35 interposto tra due lastre di vetro, isolante VIP dello spessore di mm 25 e uno strato di finitura interna non calcolata nel modello poiché variabile in relazione alle soluzioni progettuali e/o funzionali.

Il PCM è tra due vetri per via del cambiamento di fase e vicino all'intercapedine perché il suo cambiamento di fase è inerente alla temperatura e quindi influisce sui moti convettivi dell'intercapedine.

Come per i moduli S1 e S2, anche nei moduli opachi, il PCM utilizza lo stesso principio di funzionamento, ovvero, sfrutta la sua capacità di accumulare grosse quantità di energia ad una temperatura vicina a quella di fusione. Infatti, durante il processo di cambiamento di fase, il calore viene accumulato e rilasciato senza notevoli variazioni di temperatura. Il PCM immagazzina la quantità di energia latente necessaria per cambiare il proprio stato (solido - liquido) migliorando la gestione energetica dell'involucro edilizio e facilitando il raffrescamento e/o riscaldamento degli ambienti interni al fine di limitare le dispersioni termiche.

In questo caso, trattandosi di moduli opachi, non si è reso necessario l'utilizzo di materiali traslucidi, e pertanto la scelta del Tipo di PCM è ricaduta nelle paraffine poiché presentano le migliori proprietà di impiego nel settore.

Hanno una temperatura di fusione di poco superiore a quella ambiente, non sono tossiche né corrosive e igroscopiche, sono chimicamente stabili e compatibili con la maggior parte dei materiali edilizi.

Le paraffine sono miscele di idrocarburi saturi derivate dalla distillazione del petrolio, e hanno una consistenza cerosa a temperatura ambiente, con temperatura di transizione di fase fra i - 8 ed i 40 °C. Hanno una buona capacità di accumulo termico e si sono dimostrate capaci di solidificare/congelare senza ulteriore sottoraffreddamento. Possiedono una elevata stabilità chimica anche dopo innumerevoli cicli di congelamento e riscaldamento. Non sono corrosive e sono compatibili con la maggior parte dei materiali di incapsulamento. Hanno di contro una gamma limitata dei punti di fusione e il loro costo è collegato ai prezzi (instabili) del petrolio, oltre ad avere un impatto ambientale non trascurabile. Alcuni composti di paraffine sono altresì pericolosi per la salute, provocando ferite cutanee, agli occhi e alle mucose.

Per questi moduli, il PCM utilizzato per immagazzinare energia termica in forma latente è composto di paraffine con temperatura di cambiamento di fase di 27°C

Dalle nostre simulazioni il PCM incorporato all'interno di lastre di vetro, ha un accumulo termico latente fino a 6198 kJ/m², il che significa che trascorrono 14 ore prima che il calore venga trasmesso. In Estate, questa proprietà posticipa la richiesta di energia massima durante la notte, riducendo le temperature interne della stanza di almeno 8 °C. Mentre in inverno, i guadagni solari sono massimizzati grazie alle proprietà del PCM di incorporare il calore durante il giorno per poi rilasciarlo all'interno dell'edificio nelle ore notturne, durante la fase di solidificazione.

Lo strato VIP (Vacuum Insulated Panels) costituisce insieme al PCM il nucleo prestazionale dei moduli O1 e O2. Ad esso viene affidato il compito di isolamento termico.

I pannelli sottovuoto VIP sono dei prodotti, composti solitamente da una componente minerale pressata, messa sottovuoto da uno speciale involucro: è un prodotto a base di minerale (acido silicico microporoso) in polvere pressato, inserito in un involucro di alluminio sottovuoto. I pannelli vengono privati dell'aria al loro interno fino a ottenere una pressione di pochi millibar e sigillati. Tale processo riduce enormemente la mobilità

delle poche molecole d'aria contenute nei pori; di conseguenza la conduttività termica dell'aria viene soppressa e il trasferimento di calore è pressoché inesistente. Si ottiene un materiale isolante con valori di 8 volte superiori ai materiali tradizionali. Pur avendo spessori ridottissimi i pannelli sottovuoto garantiscono prestazioni decisamente superiori e, occupando meno spazio, consentono il loro impiego in diverse soluzioni architettoniche.

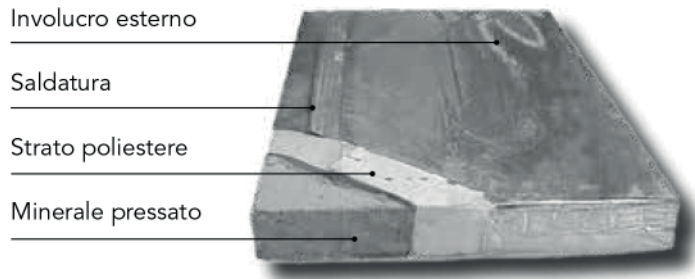


Figura 13. Composizione del VIP (Vacuum Insulated Panels)

Il pannello CZ della IsolCore è composto da un nucleo (core) principalmente in fibra di vetro e da una speciale incamiciatura in tessuto in fibra di vetro e alluminio che lo rende molto più resistente al taglio e all'erosione, rispetto a tutti gli altri pannelli sottovuoto (VIP) attualmente in commercio. Questa speciale pellicola lo rende impermeabile al gas e al vapore preservando le prestazioni per quasi 50 anni.

I pannelli, privati dell'aria al loro interno, raggiungono valori di conducibilità termica inferiori a 0,002 W/mK.

Questa elevata capacità isolante, ottenuta mediante la sottrazione di aria dall'interno dei pannelli stessi, comporta una riduzione della trasmissione di energia per conduzione termica, irraggiamento e convezione. Questo procedimento sopprime la conduttività termica dell'aria e il trasferimento di calore, ottenendo un materiale altamente isolante con un ridotto spessore.

Dati tecnici

Spessori disponibili (<i>altri su richiesta</i>)	10-15-20-30 mm
Densità	400 kg/m ³
Peso	4 kg/m ²
Resistenza alla compressione	140 - 180 kPa
Conducibilità termica "λ" 10°	0,00159 W/mK *
Resistenza caldo/ freddo	da -50 a +90°C
Resistenza al vapore acqueo	1688 μ +/- 253 **
Classe di reazione al fuoco	classe A2 fl -S1***
Formati standard (in mm) (<i>altri su richiesta</i>)	1000x500 600x500 500x250 250x150

Spessore (mm)	λd10 W/mK	Rd m ² K/W	Ud W/m ² K
CZ 10 (10mm)	0,00159	6,29	0,16
CZ 15 (15mm)		9,43	0,11
CZ 20 (20mm)		12,58	0,08
CZ 30 (30mm)		18,87	0,05

* Test eseguito da Istituto Giordano (ACCREDIA) - Rapporto di prova n. 363989

Tabella 9. Dati tecnici pannello CZ VIP (Vacuum Insulated Panels) dell'azienda Isolcore

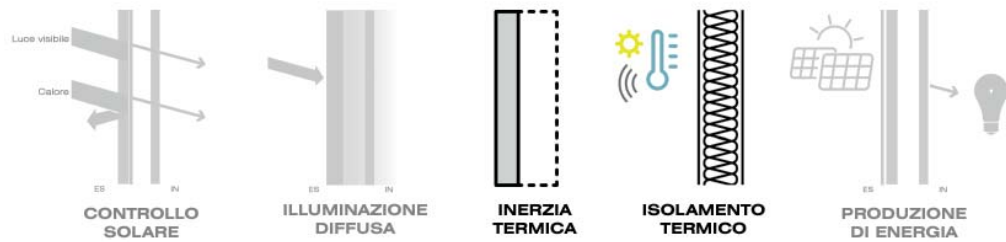


Figura 14. Schema delle funzioni affidate al modulo 01

² Legenda: A_B (mm^2) area aperture di presa ed uscita; ℓ (m) larghezza di facciata; A_C (m^2) area copertura.

– Per intercapedine d’aria orizzontale si intende un’intercapedine con angolo di inclinazione fino a 30° rispetto al piano orizzontale

– Il criterio di dimensionamento di massima proposto (UNI EN ISO 6946) si applica ad intercapedini limitate da due facce parallele, perpendicolari alla direzione del flusso termico e con emissività non inferiore a 0.8. L’intercapedine deve avere uno spessore minore del 10% rispetto alle altre due dimensioni (lunghezza e larghezza della parete) e comunque non superiore a 30 cm. L’intercapedine d’aria non deve essere collegata con l’ambiente interno. Non si considerano fra le aperture di presa e uscita dell’aria le aperture dovute ai giunti del paramento esterno o le aperture di drenaggio.

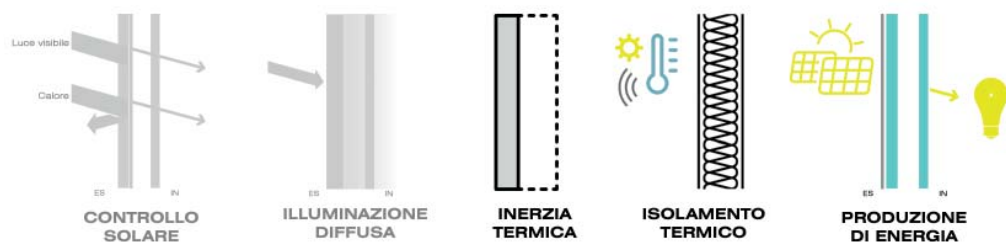


Figura 15. Schema delle funzioni affidate al modulo 02

FUNZIONAMENTO VENTILAZIONE

Nella normativa tecnica nazionale sono definite le soluzioni conformi di facciate ventilate (UNI 11018) e di coperture ventilate (UNI 9460 e UNI 10372) e vengono fornite alcune indicazioni tecnico-progettuali in particolare sui tipi di materiali costituenti i vari strati e sui fissaggi meccanici del paramento esterno alla parete interna.

Nella norma UNI EN ISO 6946 (Tabella 10) ² sono riportate delle indicazioni di massima sul dimensionamento delle aperture di presa e di uscita dell’aria dall’intercapedine di ventilazione, in base al quale si distinguono le pareti non ventilate, debolmente ventilate e fortemente ventilate.

Criteri di dimensionamento di massima secondo UNI EN ISO 6946		
	Facciate ventilate (intercapedini d’aria verticali)	Coperture ventilate (intercapedini d’aria orizzontali)
Fortemente ventilata	$A_B/\ell > 1500$	$A_B/A_C > 1500$
Debolmente ventilata	$500 < A_B/\ell \leq 1500$	$500 < A_B/A_C \leq 1500$
Non ventilata	$A_B/\ell \leq 500$	$A_B/A_C \leq 500$

Tabella 10. Criteri di dimensionamento di massima delle aperture di presa e di uscita dell’aria dall’intercapedine di ventilazione.

La norma di riferimento per il calcolo della resistenza termica delle intercapedini d’aria è la UNI EN ISO 6946, che individua 3 tipologie: intercapedini non ventilate, debolmente ventilate e fortemente ventilate.

Nelle tabelle seguenti è riportato il metodo per individuare la resistenza termica d'intercapedine per ognuno dei tre casi.

Intercapedini d'aria non ventilate, valori di resistenza termica (m²K/W)

Tipo di intercapedine	Spessore intercapedine in mm								
	0	5	7	10	15	25	50	100	300
Strato d'aria orizzontale (flusso di calore ascendente)	0	0.11	0.13	0.15	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
Strato d'aria verticale (flusso di calore orizzontale)	0	0.11	0.13	0.15	0.17	0.18	0.18	0.18	0.18
Strato d'aria orizzontale (flusso di calore discendente)	0	0.11	0.13	0.15	0.17	0.19	0.21	0.22	0.23

Tabella 11. Tipologie di intercapedini debolmente ventilate

Intercapedini d'aria debolmente ventilate, valori di resistenza termica

Un'intercapedine d'aria debolmente ventilata è quella nella quale vi è un passaggio d'aria limitato, proveniente dall'ambiente esterno attraverso aperture aventi le caratteristiche seguenti:

>500 mm² ma ≤ 1500 mm² per metro di lunghezza per intercapedini d'aria verticali

>500 mm² ma ≤ 1500 mm² per metro quadrato di superficie per intercapedini d'aria orizzontali

La resistenza termica utile di un'intercapedine d'aria debolmente ventilata è uguale alla metà del valore corrispondente di un'intercapedine d'aria non ventilata.

Intercapedini d'aria fortemente ventilate, valori di resistenza termica

Un'intercapedine d'aria è fortemente ventilata se le aperture tra l'intercapedine d'aria e l'ambiente esterno sono maggiori di:

>1500 mm² per metro di lunghezza per intercapedini d'aria verticali

>1500 mm² per metro quadrato di superficie per intercapedini d'aria orizzontali

La resistenza termica totale di un componente per l'edilizia contenente un'intercapedine d'aria fortemente ventilata, si ottiene trascurando la resistenza termica dell'intercapedine d'aria e di tutti gli altri strati che separano detta intercapedine d'aria dall'ambiente esterno e includendo una resistenza termica superficiale esterna pari alla resistenza termica superficiale interna del medesimo componente.

In questo progetto di ricerca, l'intercapedine d'aria debolmente ventilata della dimensione di 70 mm, oltre alla resistenza termica descritta e calcolata secondo la normativa UNI EN ISO 6946, stabilisce una relazione diretta con il materiale PCM, attivando il cambiamento di fase dello stesso e quindi immagazzinando e rilasciando energia per il riscaldamento ed il raffrescamento indoor, riducendo notevolmente i consumi di picco dovuti alla climatizzazione degli ambienti interni.

Per i moduli di facciata semitrasparenti e opachi, il PCM viene utilizzato per immagazzinare energia termica in forma latente, il che significa che il calore viene rilasciato quando è realmente necessario. Il PCM subisce un cambiamento di fase da fluido a solido e viceversa, fornendo un grande potenziale per il controllo della temperatura dello spazio interno. I moduli funzionano sostanzialmente come una parete dotata di inerzia termica, ma con il vantaggio di avere riscaldamento solare passivo senza aumentare la massa.

La cavità d'aria è posta tra lo strato di finitura esterno e o strato prestazionale a diretto contatto con il PCM, al fine di regolare meglio la sua temperatura e quindi i tempi di immagazzinamento e rilascio di energia. Le modalità di ventilazione per il periodo invernale ed estivo durante il giorno e la notte sono illustrate dalla Figura 16 alla Figura 22.

In estate la fase di immagazzinamento (Figura 16) avviene durante le ore notturne; le prese d'aria esterne di ingresso ed uscita vengono aperte, mentre le prese d'aria interne di ingresso ed uscita interne sono chiuse, questo per consentire la ventilazione soltanto tra l'intercapedine e l'ambiente esterno. Un ventilatore assiale favorisce il moto ascensionale e il flusso d'aria esterno, pompato all'interno dell'intercapedine, innesca il processo di solidificazione del materiale a cambiamento di fase, immagazzinando energia latente di raffreddamento. La temperatura esterna deve essere inferiore alla temperatura del cambiamento di fase.

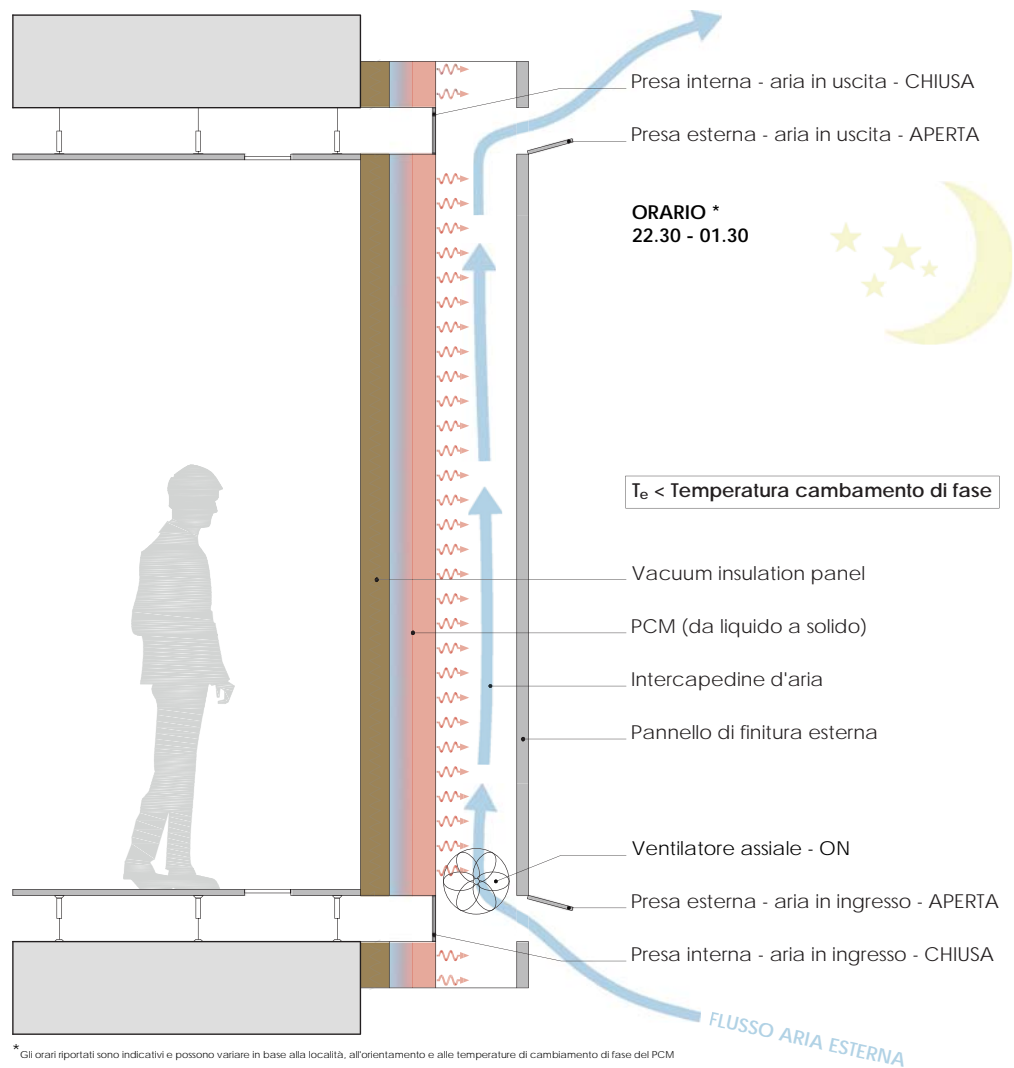


Figura 16. Schema delle ventilazione estiva _ Fase di immagazzinamento notturno

Di notte, una volta completato il processo di solidificazione del PCM, il sistema muta la propria configurazione e il flusso di aria esterna pompato all'interno dell'intercapedine da un ventilatore assiale viene immesso all'interno dell'edificio, sfruttando direttamente l'aria fresca, notturna, proveniente dall'esterno, per raffreddare gli ambienti interni (Figura 17).

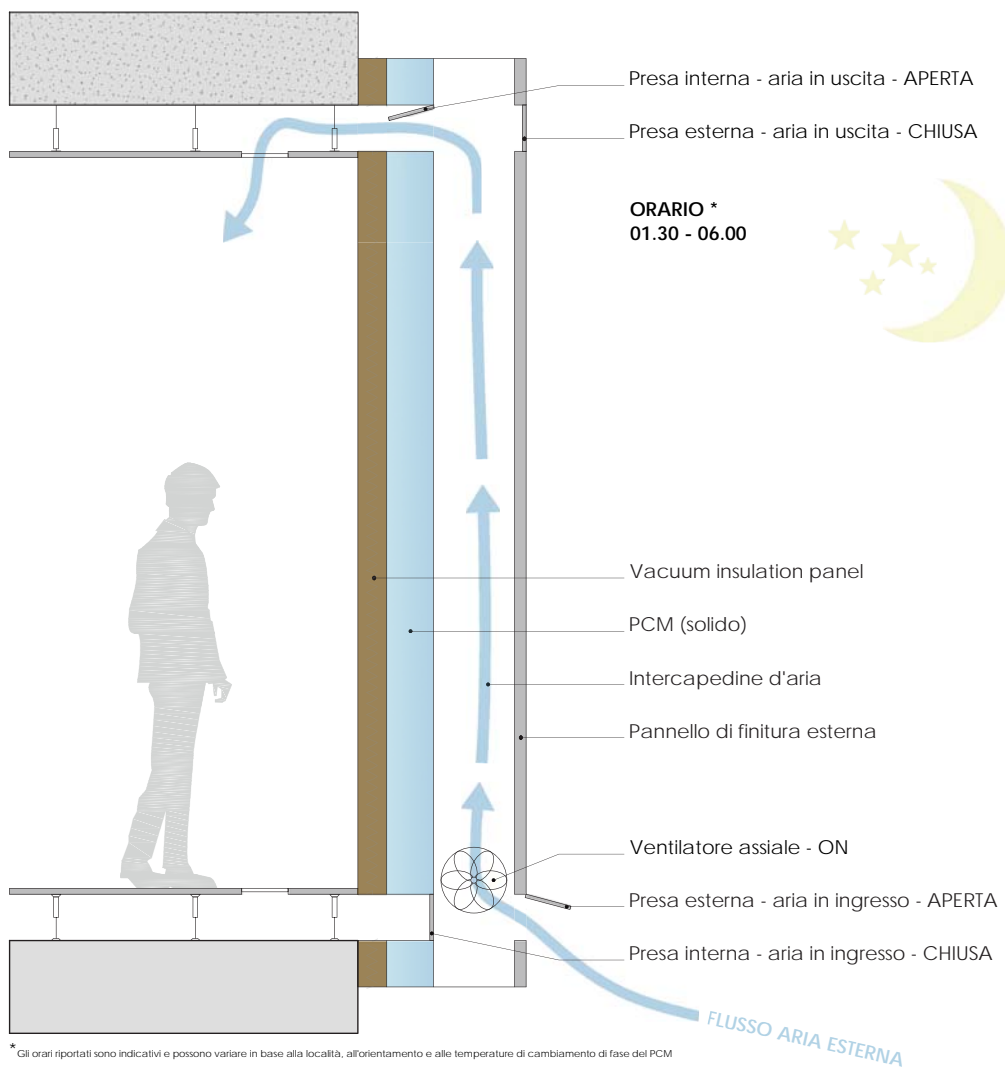
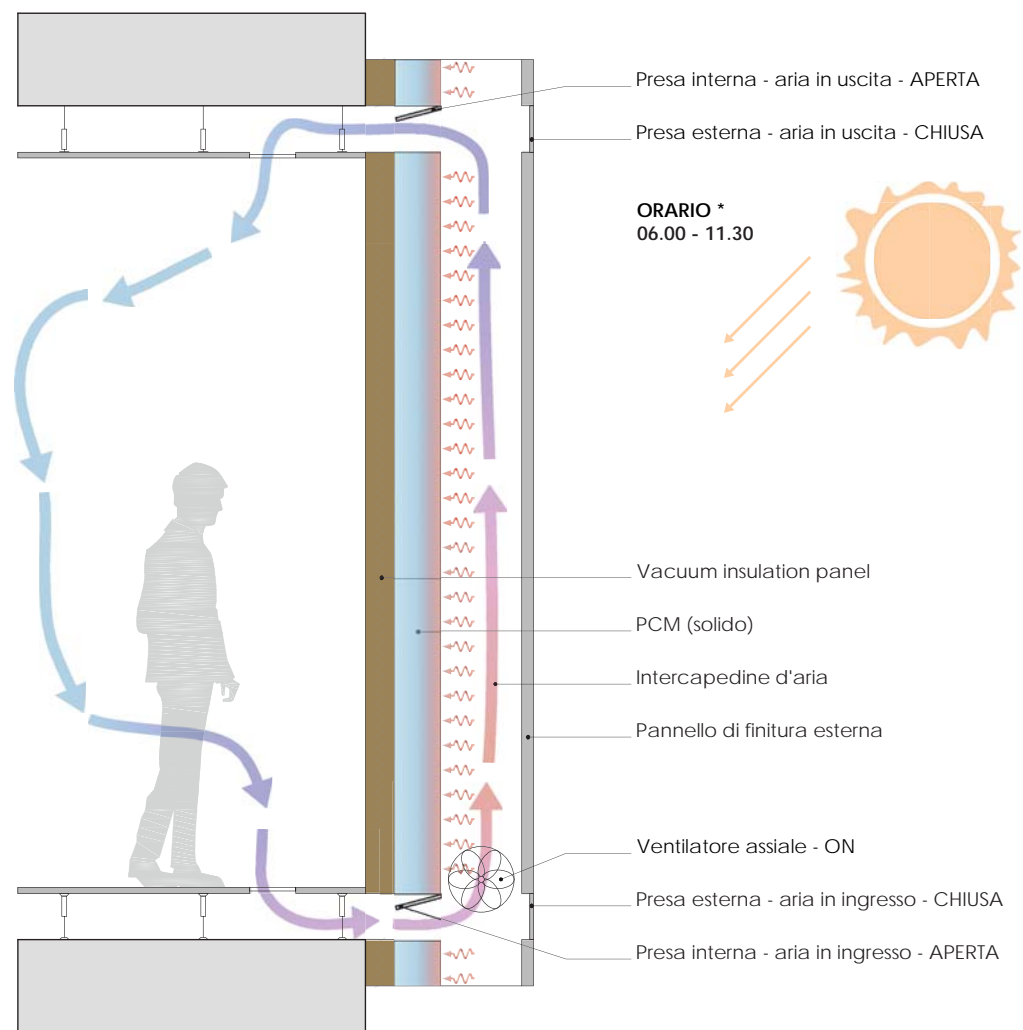


Figura 17. Schema delle ventilazione estiva _ Fase di raffreddamento notturno

Durante il giorno, il sistema cambia di nuovo la sua configurazione chiudendo tutte le sue aperture verso l'esterno. Nelle ore diurne più calde, il materiale a cambiamento di fase rilascia la sua energia e inizia il processo di raffreddamento dell'aria che si trova nell'intercapedine. Il flusso d'aria raffreddato dal PCM viene pompato all'interno degli ambienti indoor, riducendo i picchi di energia richiesti per la climatizzazione estiva (Figura 18).



* Gli orari riportati sono indicativi e possono variare in base alla località, all'orientamento e alle temperature di cambiamento di fase del PCM

Figura 18. Schema delle ventilazione estiva _ Fase di rilascio diurno

Dopo che tutta l'energia di raffreddamento, immagazzinata nel PCM, è stata rilasciata, il sistema ritorna nella sua configurazione iniziale aprendo le bocchette di ventilazione esterne e chiudendo quelle interne. Il flusso di aria esterna che entra nell'intercapedine si surriscalda e attraverso l'attivazione del moto convettivo naturale, per differenza di temperatura, l'aria calda estiva viene espulsa tramite la bocchetta d'aria superiore, evitando il surriscaldamento estivo (Figura 19).

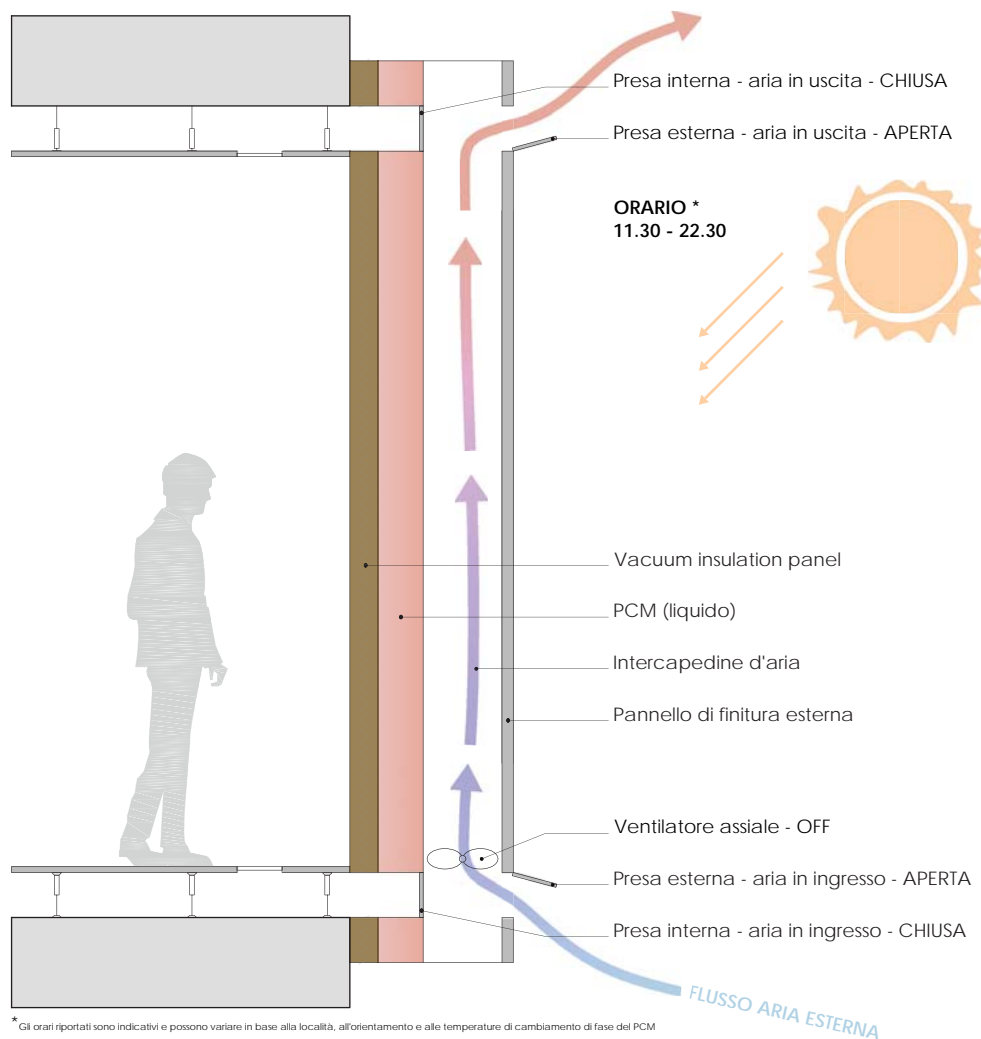


Figura 19. Schema delle ventilazione naturale estiva

In inverno, la fase di immagazzinamento avviene durante le ore diurne. Il sistema è chiuso all'interno e verso l'esterno, così da permettere che l'aria all'interno dell'intercapedine, si surriscaldi per irraggiamento solare, attivando il processo di liquefazione del materiale a cambiamento di fase (Figura 20).

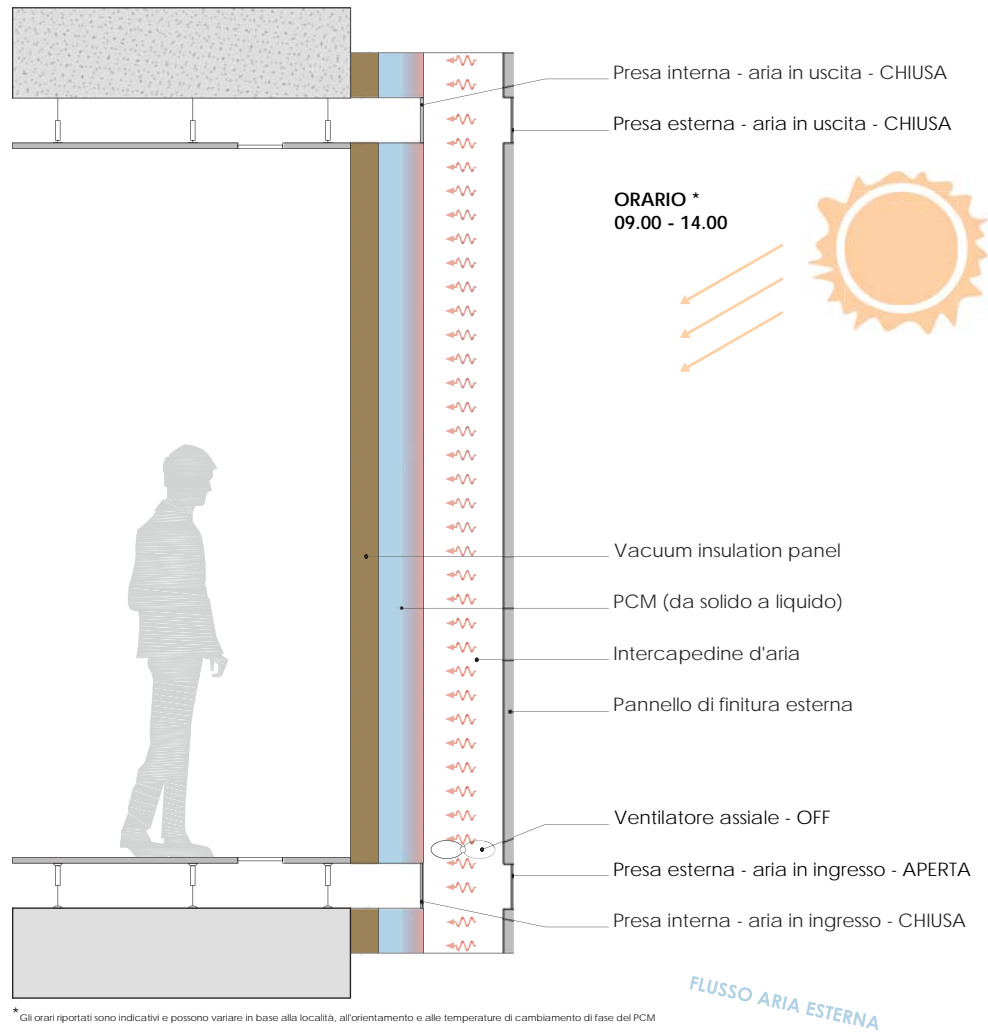
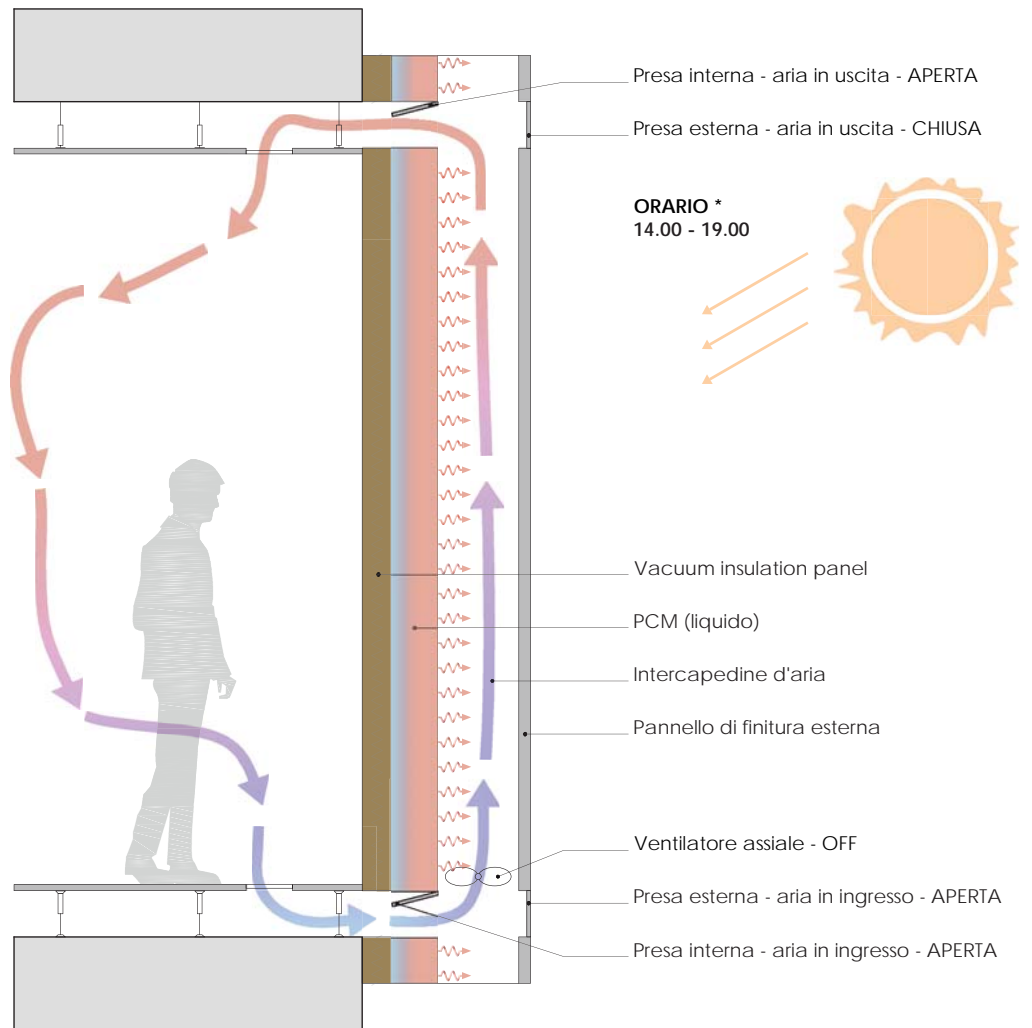


Figura 20. Schema delle ventilazione invernale _ Fase di immagazzinamento diurno

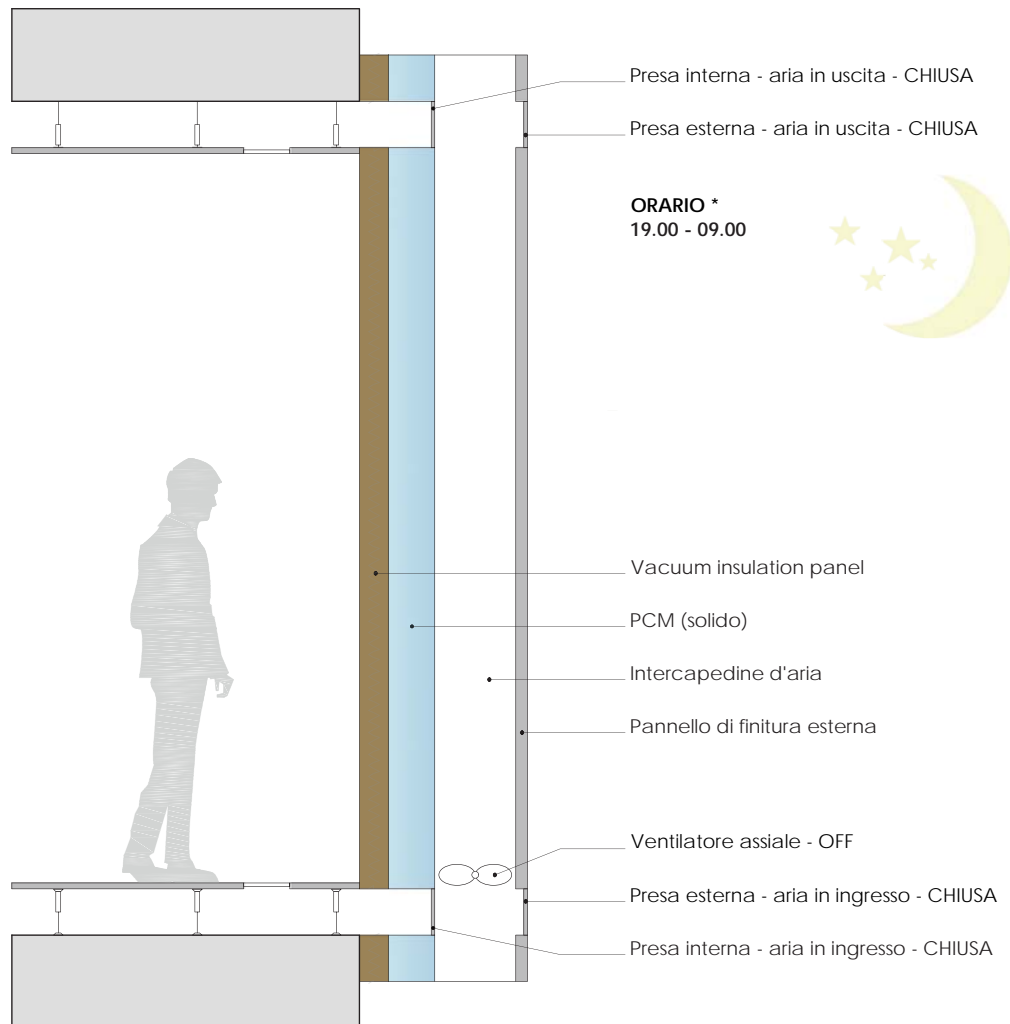
Una volta che il PCM si trova allo stato liquido ed è necessaria la richiesta energia per il riscaldamento degli ambienti interni, inizia la fase di rilascio del PCM, che riscalda l'aria contenuta all'interno della camera di ventilazione. Le aperture guidano l'aria riscaldata che fluisce dall'interno dell'intercapedine verso gli ambienti da climatizzare riducendo la domanda di energia dovuta al riscaldamento (Figura 21).



* Gli orari riportati sono indicativi e possono variare in base alla località, all'orientamento e alle temperature di cambiamento di fase del PCM

Figura 21. Schema delle ventilazione invernale _ Fase di rilascio diurno

Questa fase di scarico viene eseguita fino a quando non è più necessaria energia termica e/o fino a quando il PCM è in grado di fornirla, ritornando allo stato solido. Di seguito il sistema chiude tutte le sue aperture assumendo la funzione di muro di Trombe per ridurre al minimo le dispersioni termiche (Figura 22).



* Gli orari riportati sono indicativi e possono variare in base alla località, all'orientamento e alle temperature di cambiamento di fase del PCM

Figura 22. Schema delle ventilazione invernali _ Fase di scarico

Grazie al suo basso peso proprio, l'alluminio è ideale come materiale per facciate, in particolare per il rinnovo di edifici esistenti in cui i carichi aggiuntivi devono essere ridotti al minimo. Inoltre, l'alluminio ha un alto tasso di riciclaggio ed è quindi adatto anche per motivi ecologici per soddisfare gli obiettivi del progetto. Uno svantaggio dell'alluminio è la sua elevata conduttività termica. Ciò comporta la formazione di ponti termici consistenti nell'area tra gli elemento isolati e il telaio. Questo effetto è illustrato di seguito come esempio (Figura 23).

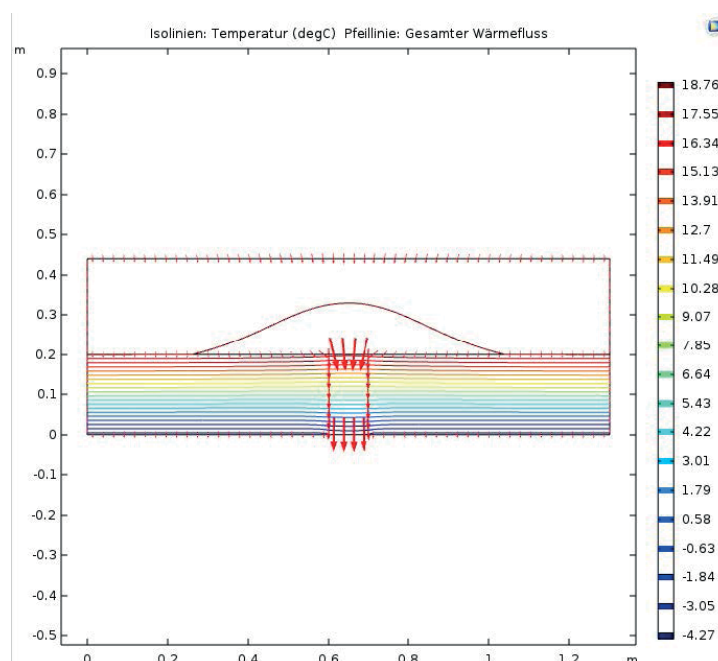


Figura 23. Flusso di calore attraverso un telaio in alluminio, posto al centro, rispetto alle aree termicamente isolate ,a sinistra e a destra del telaio.

Le frecce indicano l'area con il maggior flusso di calore. L'influenza dei ponti termici viene presa in considerazione nel calcolo della trasmittanza termica della nuova facciata. Il coefficiente di scambio termico di una facciata a montanti e traversi è determinato secondo la norma DIN EN ISO 12631, tenendo conto dei valori U del vetro, delle superfici opache e dei profili (Figura 24).

$$U_{cw} = \frac{\sum A_g U_g + \sum A_p U_p + \sum A_f U_f + \sum A_m U_m + \sum A_t U_t + \sum l_{t,g} \psi_{t,g} + \sum l_{m,g} \psi_{m,g}}{A_{cw}} + \frac{\sum l_{t,g} \psi_{t,g} + \sum l_{m,p} \psi_{m,p} + \sum l_{m,f} \psi_{m,f} + \sum l_{t,f} \psi_{t,f}}{A_{cw}}$$

Figura 24. Equazione per calcolare un valore U secondo DIN EN ISO 12631

Inoltre, devono essere considerati tutti i coefficienti di trasmittanza termica lineare dei collegamenti tra la stratigrafia del pannello ed il profilo sia in orizzontale che in verticale. In accordo con gli obiettivi di ricerca è stato sviluppato un profilo in alluminio della dimensione di 70x140 mm, con una capacità di carico che consente la progettazione di moduli per facciate di altezza fino a 4500 mm, a seconda del carico del vento di progetto. Il design del telaio consente l'inserimento di profili tubolari in acciaio standard, 25 x 50

mm di spessore 2 mm, che fungono sia da rinforzo strutturale, per lunghezze superiori ai 4500 mm o per carichi del vento più elevati, che da sistema per l'installazione dei moduli. Il sistema, essendo pensato secondo principi di modularità, consente un'installazione rapida, pulita ed efficiente. Una piastra in acciaio ancorata nell'intradosso del solaio strutturale permette di agganciare due unità modulari dall'interno dell'edificio, eliminando la necessità di accedere dall'esterno. I moduli saranno impilati tra loro, uno sopra l'altro, attraverso l'ausilio di un profilo a C 20 x 45 in acciaio. Tutti gli elementi del sistema, ivi comprese le guarnizioni e gli accessori, sono progettati come unità modulari per assicurare la massima integrazione e una facciata a filo con giunti incassati (Figura 25).

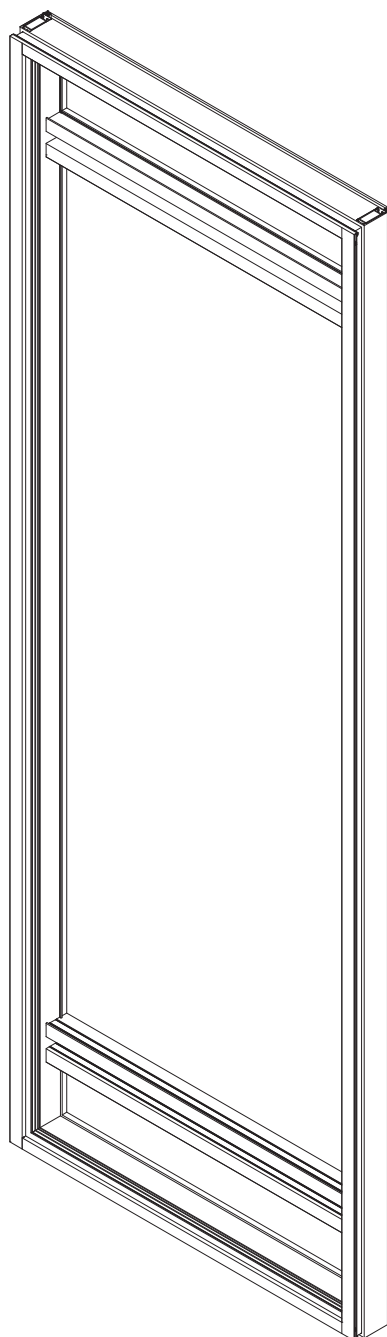


Figura 25. Telaio strutturale in alluminio, valido per i moduli T1, O1, O2, S1 e S2

Il telaio viene irrigidito da traversi orizzontali, costituiti da profili estrusi in alluminio, a taglio termico, di mm 72x 40, che consentono la continuità stratigrafica dello strato prestazionale e che ospitano, ove necessario, un ventilatore assiale per attivare i moti ascensionale nell'intercapedine, e la bocchetta apribile a controllo programmato attraverso la quale avviene la ventilazione sia in ingresso che in uscita, canalizzando il flusso di aria nel controsoffitto e nel pavimento.

Il sistema di facciata adattivo proposto rappresenta una soluzione innovativa, per le differenti soluzioni funzionali e tecnologiche che esso offre. Risulta, quindi, essere capace di rispondere in modo efficace alle richieste di mercato dei componenti di involucro per l'edilizia di nuova costruzione e di riqualificazione energetica del patrimonio immobiliare esistente. Un mercato sempre più orientato, come indicato precedentemente, a proporre soluzioni architettoniche di involucro capaci di cambiare colore e forma e funzionalità in breve tempo, con lo scopo ultimo di garantire il risparmio energetico, l'isolamento acustico ed il contenimento dei costi di produzione.

5.2 Analisi delle prestazioni energetiche su un caso studio virtuale

Parametri di caratterizzazione tradizionali per involucri edilizi, incentrati sul calcolo della trasmittanza (U) e sul fattore solare (g), si basano su ipotesi statiche.

Pertanto, nelle facciate adattive, a causa del loro comportamento variabile nel tempo, questi valori convenzionali forniscono informazioni limitate e potenzialmente fuorvianti per questi sistemi intrinsecamente dinamici.

Nel progetto di un involucro edilizio di tipo adattivo, la simulazione delle prestazioni degli edifici e dei suoi componenti permette di fornire le informazioni raccolte alle diverse figure professionali interessate direttamente o indirettamente nel processo di progettazione e costruzione dell'edificio, tra cui progettisti, ricercatori nel campo dei materiali, energy manager, e imprese edili.

Il potenziale dell'integrazione tra le attività di modellazione e simulazione per l'analisi delle prestazioni di facciate adattive permette di chiarire e valutare le possibili variabili prestazionali e formali degli edifici, in relazione ai sistemi e componenti dinamici della facciata.

Per questi motivi, la modellazione e la simulazione possono fornire spunti sulla reciproca influenza tra aspetti progettuali e prestazionali degli involucri adattativi degli edifici e possono quindi contribuire fortemente alla loro diffusione nel mercato dell'edilizia, nonché allo sviluppo di tecnologie innovative. Tuttavia, come dimostreremo in questo articolo, la simulazione di facciate adattive può essere significativamente più complessa della previsione prestazionale di facciate statiche convenzionali, poiché gli strumenti di simulazione esistenti non erano originariamente sviluppati per questo scopo.

Ci siamo limitati a valutare le prestazioni del componente rispetto alle condizioni geografiche di Milano, Ascoli Piceno e Agrigento, analizzando i risultati relativi al fabbisogno energetico dell'edificio di riferimento durante il periodo invernale e in quello estivo, in tre località differenti.

¹ Dati climatici ripresi dal sito: <https://www.ene-gyplus.net/weather>

Milano-Linate¹ caratterizzata da clima sub-tropicale umido, con inverni freddi ed estati calde:

- Latitudine: 45,45
- Longitudine: 9,18
- Altitudine: 122 m s.l.m.
- Zona climatica: E
- Gradi giorno: 2404

Ascoli Piceno caratterizzata da un clima sub-appenninico, con inverni umidi e freschi ed estati calde:

- Latitudine: 42,85
- Longitudine: 13,56
- Altitudine: 154 m s.l.m.
- Zona climatica: D
- Gradi giorno 1698

Agrigento caratterizzata da clima mediterraneo con estati calde, con inverni temperati ed estati con temperature piuttosto elevate:

- Latitudine: 37,18
- Longitudine: 13,58
- Altitudine: 230 m s.l.m.
- Zona climatica: B
- Gradi giorno: 729

Le simulazioni sono state condotte costruendo una test room virtuale (figura 1) di dimensioni 6,00m x 6,00m x h 3,60m, con destinazione d'uso uffici.

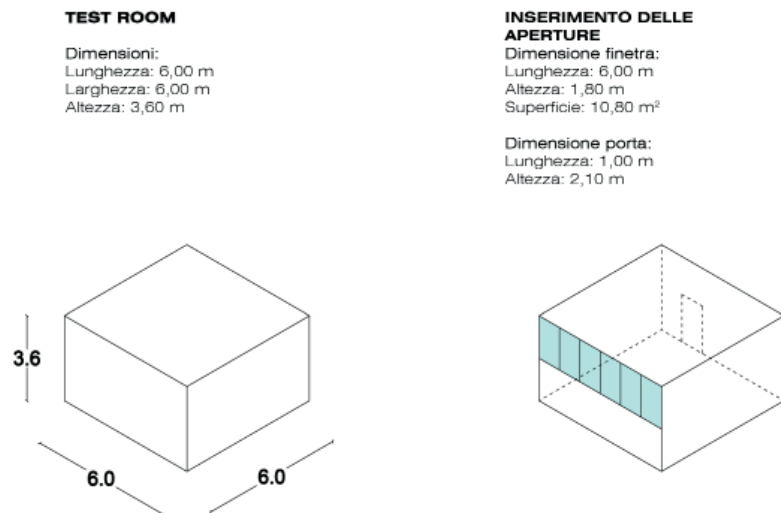


Figura 1. Definizione del progetto della test room

Al fine di garantire il corretto apporto illuminotecnico, sono state inserite delle aperture adeguate alla destinazione d'uso degli uffici, per una area finestrata totale di 10,80 m² pari al 50% della superficie della facciata.

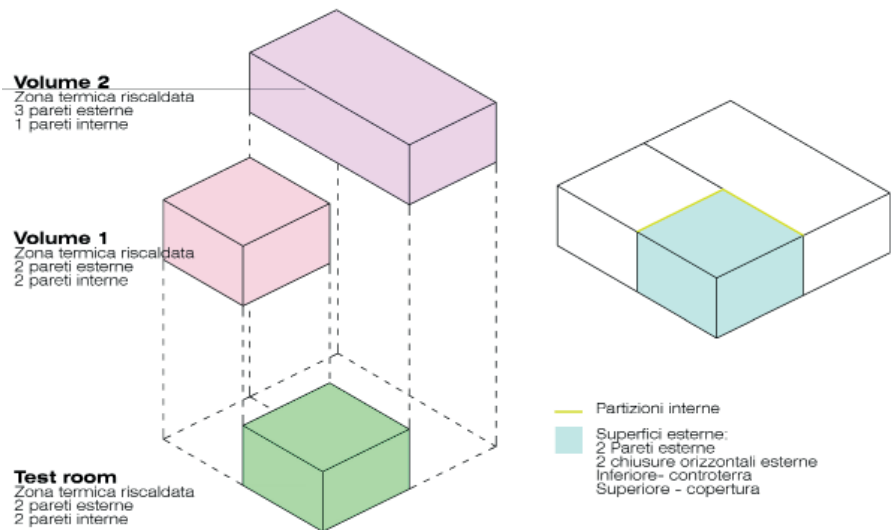


Figura 2. Definizione delle condizioni al contorno della test room.

La test room è stata pensata con le seguenti condizioni al contorno (figure 2 e 3):

- **Chiusura verticale "A"** adiacente ad uno spazio esterno, priva di aperture;
- **Chiusura verticale "B"** adiacente ad uno spazio esterno con inserimento di superficie finestrata apribile "W" (lunghezza 6 m altezza 1,80 m);
- **Chiusura verticale "C"** adiacente ad uno spazio interno riscaldato (volume 1), priva di aperture;
- **Chiusura verticale "D"** adiacente ad uno spazio interno riscaldato (volume 2), con inserimento di apertura porta;
- **Chiusura orizzontale "E"** inferiore a diretto contatto con il terreno (attacco a terra);
- **Chiusura orizzontale "F"** superiore adiacente ad uno spazio esterno (copertura).

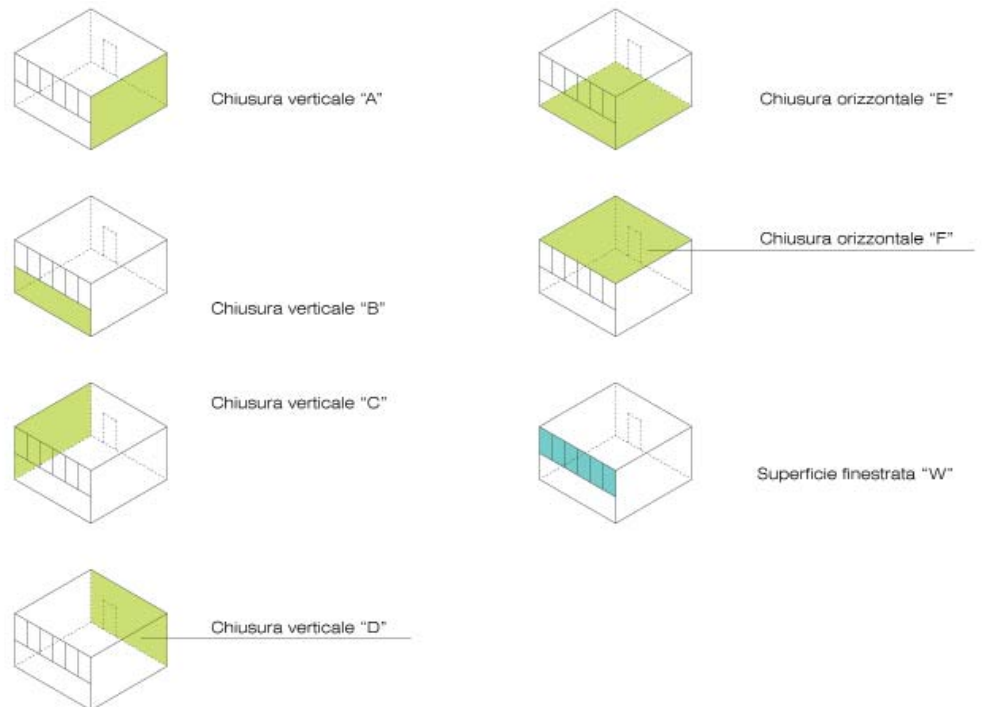
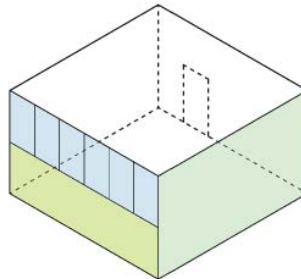
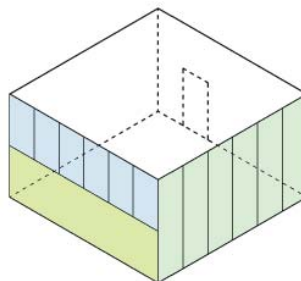


Figura 3. Identificazione delle superfici d'involucro della Test room.

Dopo aver definito le caratteristiche termo igrometriche delle chiusure della Test room, facendo riferimento ai valori di trasmittanza limite, previsti nel allegato A del D.M. requisiti minimi del 26 giugno 2015, per l'edificio di riferimento, e volendo valutare come l'adozione dei componenti di facciata adattiva O1 e S2 possa influenzare il fabbisogno energetico dell'intero edificio, abbiamo effettuato le simulazioni energetiche confrontando i valori di energia primaria per il riscaldamento ed il raffrescamento derivanti da quattro configurazioni di chiusure differenti.

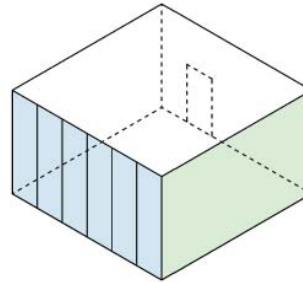


CONFIGURAZIONE "1"								
ELEMENTO	TIPO	CONDIZIONE CONTORNO	N° MODULI	DIMENSIONI (m)	SP. (m)	CARATTERISTICHE	TRASITTANZA (W/m ² K)	Trasm. LIMITE allegato A del D.M. 26 Giugno 2015-Valori 2019-21 (W/m ² K)
Chiusura verticale	A	ESTERNO	-	6,00 x 3,60	0,42	Doppio laterizio con intercapedine isolata	0,26	0,26
	B	ESTERNO	-	6,00 x 1,80	0,42	Doppio laterizio con intercapedine isolata	0,26	0,26
	C	INTERNO	-	6,00 x 3,60	0,10	Parete divisoria in cartongesso con intercapedine isolata	0,36	0,8
	D	INTERNO	-	6,00 x 3,60	0,10	Parete divisoria in cartongesso con intercapedine isolata, con porta	0,36	0,8
Chiusura orizzontale	E	TERRA	-	6,00 x 6,00	0,44	Salaio controlterra in cls gettato in opera isolato	0,23	0,26
	F	ESTERNO	-	6,00 x 6,00	0,50	Solaio di copertura calpestabile laterocemento isolato	0,22	0,22
Superficie finestrata	W	ESTERNO	6	6,00 x 1,80	0,07	Infisso alluminio taglio termico, doppio vetro basso emissivo con argon 4-16-4	1,35	1,4

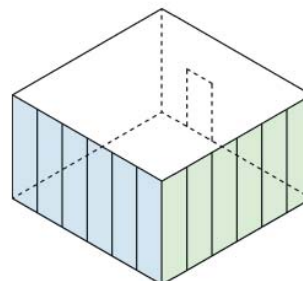


CONFIGURAZIONE "2"								
ELEMENTO	TIPO	CONDIZIONE CONTORNO	N° MODULI	DIMENSIONI (m)	SP. (m)	CARATTERISTICHE	TRASITTANZA (W/m ² K)	Trasm. LIMITE allegato A del D.M. 26 Giugno 2015-Valori 2019-21 (W/m ² K)
Chiusura verticale	A	ESTERNO	6	1,00 x 3,60	0,15	Pannello O1	0,058	0,26
	B	ESTERNO	-	6,00 x 1,80	0,42	Doppio laterizio con intercapedine isolata	0,26	0,26
	C	INTERNO	-	6,00 x 3,60	0,10	Parete divisoria in cartongesso con intercapedine isolata	0,36	0,8
	D	INTERNO	-	6,00 x 3,60	0,10	Parete divisoria in cartongesso con intercapedine isolata	0,36	0,8
Chiusura orizzontale	E	TERRA	-	6,00 x 6,00	0,44	Salaio controlterra in cls gettato in opera isolato	0,23	0,26
	F	ESTERNO	-	6,00 x 6,00	0,50	Solaio di copertura calpestabile laterocemento isolato	0,22	0,22
Superficie finestrata	W	ESTERNO	6	6,00 x 1,80	0,07	Infisso alluminio taglio termico, doppio vetro basso emissivo con argon 4-16-4	1,35	1,4

Figura 4. Definizione delle trasmittanze delle chiusure opache e trasparenti della test room, nelle configurazioni 1 e 2.



CONFIGURAZIONE "3"								
ELEMENTO	TIPO	CONDIZIONE CONTORNO	N° MODULI	DIMENSIONI (m)	SP. (m)	CARATTERISTICHE	TRASITTANZA (W/m²K)	Trasm. LIMITE allegato A del D.M. 26 Giugno 2015-Valori 2019-21 (W/m²K)
Chiusura verticale	A	ESTERNO	-	6,00 x 3,60	0,42	Doppio laterizio con intercapedine isolata	0,26	0,26
	B	ESTERNO	6	6,00 x 1,80	0,07	Pannello S2_trasparenza 50%	0,345	1,4
	C	INTERNO	-	6,00 x 3,60	0,10	Parete divisoria in cartongesso con intercapedine isolata	0,36	0,8
	D	INTERNO	-	6,00 x 3,60	0,10	Parete divisoria in cartongesso con intercapedine isolata	0,36	0,8
Chiusura orizzontale	E	TERRA	-	6,00 x 6,00	0,44	Salaio controterra in cls gettato in opera isolato	0,23	0,26
	F	ESTERNO	-	6,00 x 6,00	0,50	Solaio di copertura calpestabile laterocemento isolato	0,22	0,22
Superficie finestrata	W	-	-	-	-	-	-	-



CONFIGURAZIONE "4"								
ELEMENTO	TIPO	CONDIZIONE CONTORNO	N° MODULI	DIMENSIONI (m)	SP. (m)	CARATTERISTICHE	TRASITTANZA (W/m²K)	Trasm. LIMITE allegato A del D.M. 26 Giugno 2015-Valori 2019-21 (W/m²K)
Chiusura verticale	A	ESTERNO	6	1,00 x 3,60	0,15	Pannello O1	0,058	0,26
	B	ESTERNO	6	6,00 x 1,80	0,07	Pannello S2_trasparenza 50%	0,345	1,4
	C	INTERNO	-	6,00 x 3,60	0,10	Parete divisoria in cartongesso con intercapedine isolata	0,36	0,8
	D	INTERNO	-	6,00 x 3,60	0,10	Parete divisoria in cartongesso con intercapedine isolata	0,36	0,8
Chiusura orizzontale	E	TERRA	-	6,00 x 6,00	0,44	Salaio controterra in cls gettato in opera isolato	0,23	0,26
	F	ESTERNO	-	6,00 x 6,00	0,50	Solaio di copertura calpestabile laterocemento isolato	0,22	0,22
Superficie finestrata	W	-	-	-	-	-	-	-

Figura 5. Definizione delle trasmittanze delle chiusure opache e trasparenti della test room, nelle configurazioni 3 e 4.

- **Configurazione 1:** Chiusura verticale "A" costituita da un involucro opaco di tipo tradizionale. Chiusura verticale "B" costituita da un involucro di tipo tradizionale e componente finestrato trasparente apribile (Figura 4).
- **Configurazione 2:** Chiusura verticale "A" costituita da 6 moduli opachi tipo O1. Chiusura verticale "B" costituita da un involucro di tipo tradizionale e componente finestrato trasparente apribile (Figura 4).
- **Configurazione 3:** Chiusura verticale "A" costituita da un involucro opaco di tipo tradizionale. Chiusura verticale "B" costituita da 6 moduli S2 con grado di trasparenza variabile tra il 35 % PCM allo stato solido, e il 41% PCM liquido (Figura 5).
- **Configurazione 4:** Chiusura verticale "A" costituita da 6 moduli opachi tipo O1. Chiusura verticale "B" costituita da 6 moduli S2 con grado di trasparenza variabile tra il 35 % PCM allo stato solido, e il 41% PCM liquido (Figura 5).

Le simulazioni sono state condotte con il software EnergyPlus sviluppato dall' U.S. Department of Energy's (DOE) Building Technologies Office (BTO) Si tratta di un programma di calcolo che permette di definire le caratteristiche dei vari componenti d'involucro e quindi, in relazione ai dati climatici della località geografica scelta ed alla tipologia di impianto di condizionamento adottato, consente di determinare il fabbisogno di energia primaria necessario alla climatizzazione e conseguentemente di valutare il corretto dimensionamento dell'impianto di riscaldamento e raffrescamento. Il software permette, infatti, di stimare, in termini di fabbisogno di energia primaria (kWh), il contributo dato dai sistemi di involucro opaco e trasparente. EnergyPlus svolge la maggior parte del suo compito utilizzando il kit di sviluppo software OpenStudio e la suite di applicazioni.

Il software EnergyPlus, in particolare, ci ha permesso di definire le prestazioni dei componenti di facciata scelti per le simulazioni, attraverso la valutazione:

- del Fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento (Qheat, kWh)
- del Fabbisogno di energia primaria per il raffrescamento (Qcool, kWh)

Da cui abbiamo ricavato:

- Il fabbisogno di energia primaria totale (kWh)
- I Consumi energetici per riscaldamento e raffrescamento (€)
- Le Emissioni di CO₂ per il riscaldamento ed il raffrescamento (kg)

Per quantificare, da un punto di vista economico, i costi relativi ai consumi per il riscaldamento ed il raffrescamento dell'unità di simulazione, è necessario, in primo luogo, stabilire la tipologia di impianto da adottare. In tal senso abbiamo ipotizzato una pompa di calore elettrica che fornisce energia ad un impianto ad aria, con i seguenti indici di prestazione:

- COP per il riscaldamento 4,2
- EER per il raffrescamento 3,4

Dopo aver determinato il rendimento della pompa di calore, abbiamo ipotizzato una tariffa unitaria (€) per ogni kWh di energia elettrica, necessaria per calcolare il costo effettivo dell'energia fornita alla Test Room espressa in €/KW (tabella 1) e successivamente si sono quantificate le relative emissioni di CO₂ (tabella 2)

DATI ECONOMICI DEL FABBISOGNO ENERGETICO PER IL RISCALDAMENTO	
COP	4,20
Prezzo dell'energia elettrica al kWh	0,20 €
1 kW fornito all'impianto di riscaldamento equivale a:	0,048 €/kW

DATI ECONOMICI DEL FABBISOGNO ENERGETICO PER IL RAFFRESCAMENTO	
EER	3,40
Prezzo dell'energia elettrica al kWh	0,20 €
1 kW fornito all'impianto di riscaldamento equivale a:	0,059 €/kW

Tabella 1. Monetizzazione del fabbisogno energetico di riscaldamento e raffrescamento di una pompa di calore elettrica che fornisce energia ad un impianto ad aria.

Per la definizione del COP (coefficiente di prestazione) e dell'indice EER (rapporto di efficienza energetica) che si riferiscono rispettivamente al rapporto di riscaldamento e raffrescamento fornito da una pompa di calore in base alla potenza in ingresso necessaria per generarlo, ci siamo basati sulla media dei valori attualmente presenti in commercio, mentre per il costo dell'energia elettrica, valore è quello indicato dall'Autorità di regolazione per energia reti ed ambiente (ARERA). Il costo dell'energia elettrica tiene conto delle spese per l'approvvigionamento e la commercializzazione al dettaglio dell'energia, le spese per il trasporto e la gestione del contatore, le spese per gli oneri di sistema e le imposte.

CALCOLO DELLA CO₂ PRODOTTA PER IL RISCALDAMENTO	
COP	4,20
CO ₂ immessa nell'atmosfera per produrre 1 kWh (corrente elettrica)	0,58 kg di CO ₂
1 kW fornito all'impianto di riscaldamento equivale a:	0,14 kg di CO₂

CALCOLO DELLA CO₂ PRODOTTA PER IL RAFFRESCAMENTO	
EER	3,40
CO ₂ immessa nell'atmosfera per produrre 1 kWh (corrente elettrica)	0,58 kg di CO ₂
1 kW fornito all'impianto di riscaldamento equivale a:	0,17 kg di CO₂

Tabella 2. Calcolo della CO₂ prodotta per il riscaldamento ed il raffrescamento da una pompa di calore elettrica che fornisce energia ad un impianto ad aria.

Nella valutazione dei costi generali, invece, non sono state considerate le spese di manutenzione a cui potrebbe essere soggetto l'impianto, poiché avrebbero inciso in maniera significativa rispetto dimensioni ridotte della test room, alterando negativamente i risultati finali.

Nelle pagine seguenti sono riportati i risultati sintetici ottenuti per le quattro configurazioni analizzate attraverso le simulazioni con il software EnergyPlus. I risultati ottenuti dalle simulazioni sono stati sintetizzati attraverso una scheda riepilogativa, dove vengono messi a confronto i seguenti valori:

- Consumi per il condizionamento estivo ed invernale;
- Fabbisogno di energia primaria totale;
- Consumi di energia elettrica
- Emissione di CO₂.

CONFIGURAZIONE 1

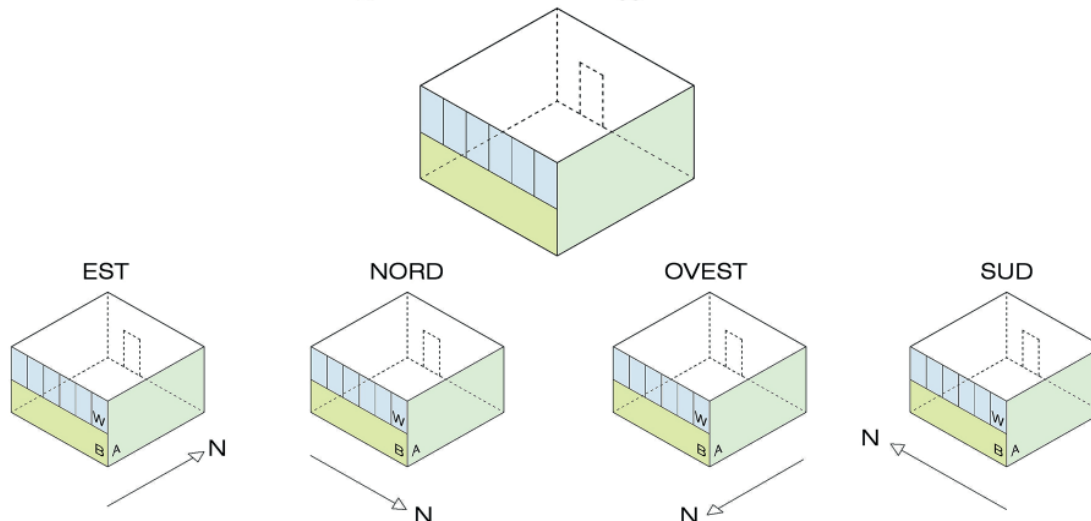
La configurazione è stata condotta per i 4 orientamenti nella località di Milano

LOCALIZZAZIONE

Latitudine	45,45	Zona climatica	E
Longitudine	9,18	Gradi giorno	2404
Altitudine	122 m s.l.m.		

SIMULAZIONI

Software	EnergyPlus	Oggetto di analisi	Test Room virtuale
----------	------------	--------------------	--------------------



INFORMAZIONI DIMENSIONALI DELLA TEST ROOM

Larghezza	Lunghezza	Altezza	Superficie	Volume
6,00 m	6,00 m	3,60 m	36,00 m ²	129,60 m ³

APERTURE DELLA TEST ROOM

Collocazione	Lunghezza	Altezza	Superficie	%
Chiusura Verticale "B"				
Superficie finestrata "W"	6,00 m	1,80 m	10,80 m ²	50%
Chiusura Verticale "D"				
Porta in legno	1,00 m	2,10 m	2,10 m ²	10%

VENTILAZIONE

Ricambi d'aria per ventilazione naturale	0,5 1/h
Sistema di ventilazione meccanica	assente

FONTI RINNOVABILI

Fotovoltaico integrato in facciata	assente
------------------------------------	---------

SISTEMA DI RISCALDAMENTO ATTIVO

Combustibile	Energia Elettrica
Tem. Off	20°
Periodo di accensione	15 Ottobre -14 Aprile
Schedules	Ufficio 9:00-19:00 Dal lunedì al venerdì escluso i festivi

CARATTERISTICHE DELL'INVOLUCRO

			da esterno verso interno	W/m ² K
Chiusura verticale	A	ESTERNO	Intonaco 2cm, blocchi di laterizio 20cm, isolante in lana di vetro 10cm, laterizio forato 8cm, intonaco 2cm.	0,26
	B	ESTERNO	Intonaco 2cm, blocchi di laterizio 20cm, isolante in lana di vetro 10cm, laterizio forato 8cm, intonaco 2cm.	0,26
	C	INTERNO	Cartongesso in lastre 1,25cm, isolante in lana di vetro 7,5cm, cartongesso in lastre 1,25cm.	0,36
	D	INTERNO	Cartongesso in lastre 1,25cm, pannello in lana di vetro 7,5cm, cartongesso in lastre 1,25cm.	0,36
Chiusura orizzontale	E	TERRA	Tessuto non tessuto 0,5cm, isolante in lana di vetro 12cm, freno a vapore 0,16cm, soletta in cls armato 20cm, sottofondo in malta di cemento 3cm, massetto il cls ordinario 6cm, pavimentazione in gress 2cm.	0,23
	F	ESTERNO	Pavimentazione in Klinker 3cm, membrana impermeabilizzante 0,4cm, massetto il cls ordinario 6cm, isolante in lana di vetro 12cm, freno a vapore 0,16cm, solaio in laterocemento 26cm, intonaco 2cm.	0,22
Superficie finestrata	W	ESTERNO	Infisso alluminio taglio termico, doppio vetro con rivestimento basso emissivo ed argon (4-16-4)	1,35

CONFIGURAZIONE 1

FABBISOGNO ENERGETICO PER IL RISCALDAMENTO ED IL RAFFRESCAMENTO

	Est	Nord	Ovest	Sud
Q_{heat} [KW/h]	332,214	727,56	1136,56	704,33
Q_{cool} [KW/h]	2617,44	3129,61	1627,47	3155,31

FABBISOGNO ENERGIA PRIMARIA

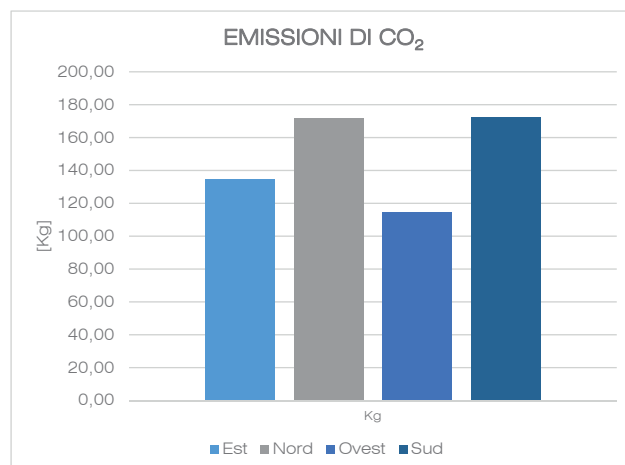
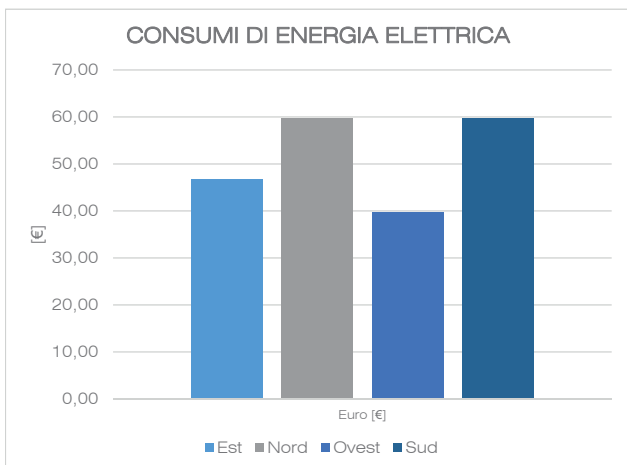
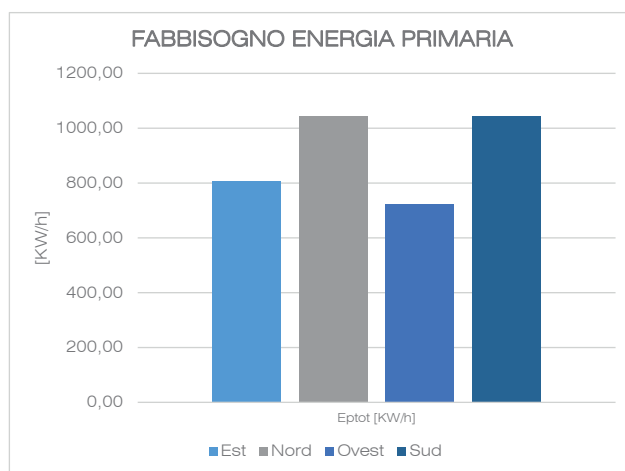
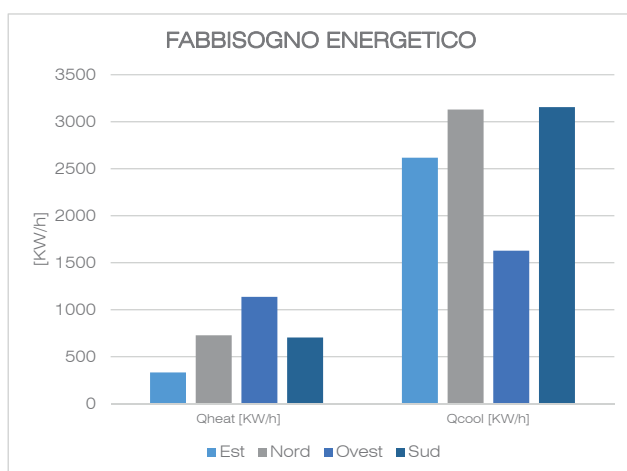
	Est	Nord	Ovest	Sud
E_{ptot} [KW/h]	806,17	1042,56	722,68	1044,17

CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA

	Est	Nord	Ovest	Sud
Euro [€]	46,69	59,61	39,66	59,76

EMISSIONI DI CO₂

	Est	Nord	Ovest	Sud
Kg	134,68	172,04	114,74	172,48



CONFIGURAZIONE 2

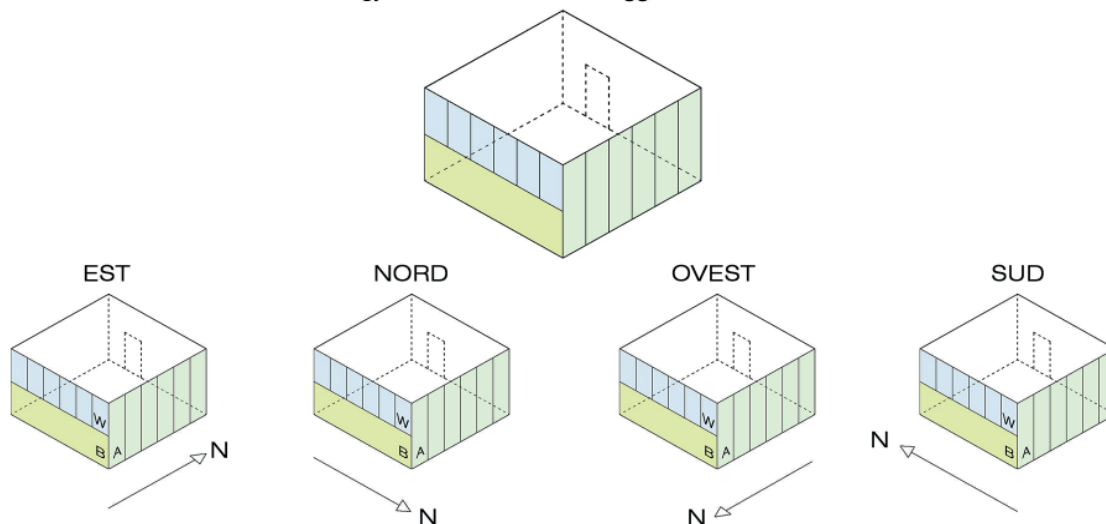
La configurazione è stata condotta per i 4 orientamenti nella località di Milano

LOCALIZZAZIONE

Latitudine	45,45	Zona climatica	E
Longitudine	9,18	Gradi giorno	2404
Altitudine	122 m s.l.m.		

SIMULAZIONI

Software	EnergyPlus	Oggetto di analisi	Test Room virtuale
----------	------------	--------------------	--------------------



INFORMAZIONI DIMENSIONALI DELLA TEST ROOM

Larghezza	Lunghezza	Altezza	Superficie	Volume
6,00 m	6,00 m	3,60 m	36,00 m ²	129,60 m ³

APERTURE DELLA TEST ROOM

Collocazione	Lunghezza	Altezza	Superficie	%
Chiusura Verticale "B"				
Superficie finestrata "W"	6,00 m	1,80 m	10,80 m ²	50%
Chiusura Verticale "D"				
Porta in legno	1,00 m	2,10 m	2,10 m ²	10%

VENTILAZIONE

Ricambi d'aria per ventilazione naturale	0,5 1/h
Sistema di ventilazione meccanica	assente

FONTI RINNOVABILI

Fotovoltaico integrato in facciata	assente
------------------------------------	---------

SISTEMA DI RISCALDAMENTO ATTIVO

Combustibile	Energia Elettrica
Tem. Off	20°
Periodo di accensione	15 Ottobre -14 Aprile
Schedules	Ufficio 9:00-19:00 Dal lunedì al venerdì escluso i festivi

CARATTERISTICHE DELL'INVOLUCRO

			da esterno verso interno	W/m ² K
Chiusura verticale	A	ESTERNO	Pannello O1: pannello alluminio Honeycomb 1 cm, camera d'aria ventilata 7cm, vetro 0,4cm, Pcm 3,5 cm vetro 0,4 cm, VIP 2,5cm	0,058
	B	ESTERNO	Intonaco 2cm, blocchi di laterizio 20cm, isolante in lana di vetro 10cm, laterizio forato 8cm, intonaco 2cm.	0,26
	C	INTERNO	Cartongesso in lastre 1,25cm, isolante in lana di vetro 7,5cm, cartongesso in lastre 1,25cm.	0,36
	D	INTERNO	Cartongesso in lastre 1,25cm, pannello in lana di vetro 7,5cm, cartongesso in lastre 1,25cm.	0,36
Chiusura orizzontale	E	TERRA	Tessuto non tessuto 0,5cm, isolante in lana di vetro 12cm, freno a vapore 0,16cm, soletta in cls armato 20cm, sottofondo in malta di cemento 3cm, massetto il cls ordinario 6cm, pavimentazione in gress 2cm.	0,23
	F	ESTERNO	Pavimentazione in Klinker 3cm, membrana impermeabilizzante 0,4cm, massetto il cls ordinario 6cm, isolante in lana di vetro 12cm, freno a vapore 0,16cm, solaio in laterocemento 26cm, intonaco 2cm.	0,22
Superficie finestrata	W	ESTERNO	Infisso alluminio taglio termico, doppio vetro con rivestimento basso emissivo ed argon (4-16-4)	1,35

CONFIGURAZIONE 2

FABBISOGNO ENERGETICO PER IL RISCALDAMENTO ED IL RAFFRESCAMENTO

	Est	Nord	Ovest	Sud
Q_{heat} [KW/h]	121,23	535,95	868,64	531,10
Q_{cool} [KW/h]	1905,39	2257,41	1168,20	2262,67

FABBISOGNO ENERGIA PRIMARIA

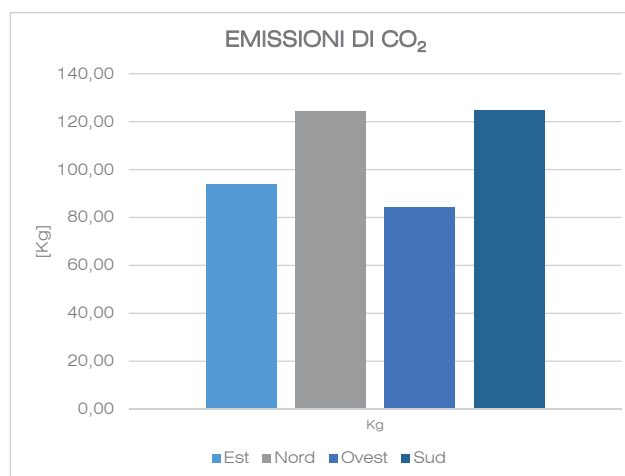
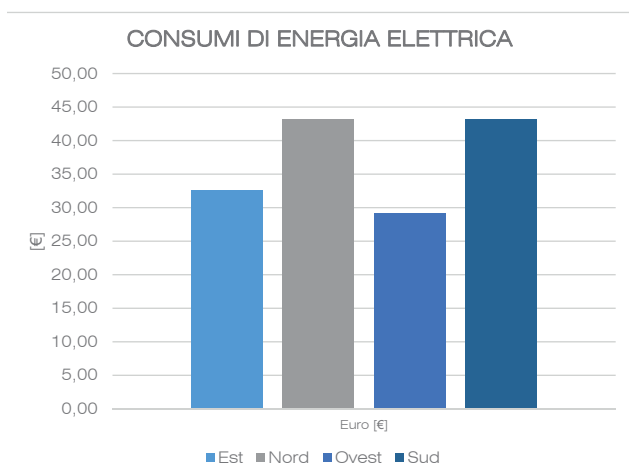
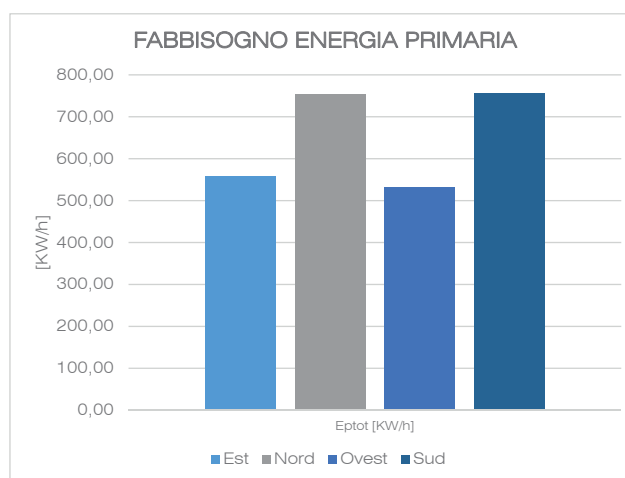
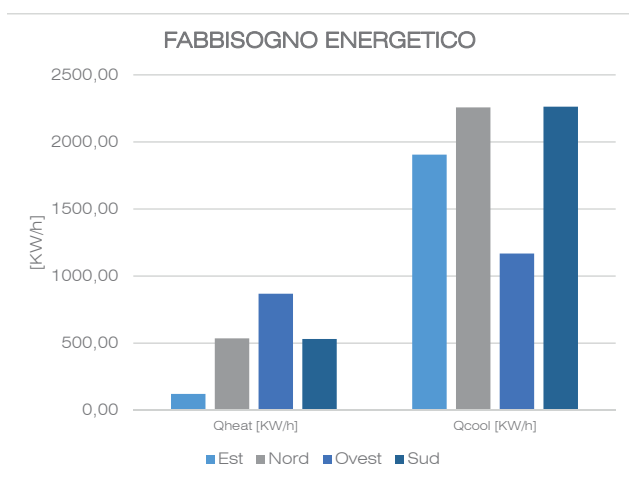
	Est	Nord	Ovest	Sud
E_{ptot} [KW/h]	558,14	754,67	531,32	754,97

CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA

	Est	Nord	Ovest	Sud
Euro [€]	32,61	43,12	29,07	43,15

EMISSIONI DI CO₂

	Est	Nord	Ovest	Sud
Kg	94,02	124,46	84,12	124,55



CONFIGURAZIONE 3

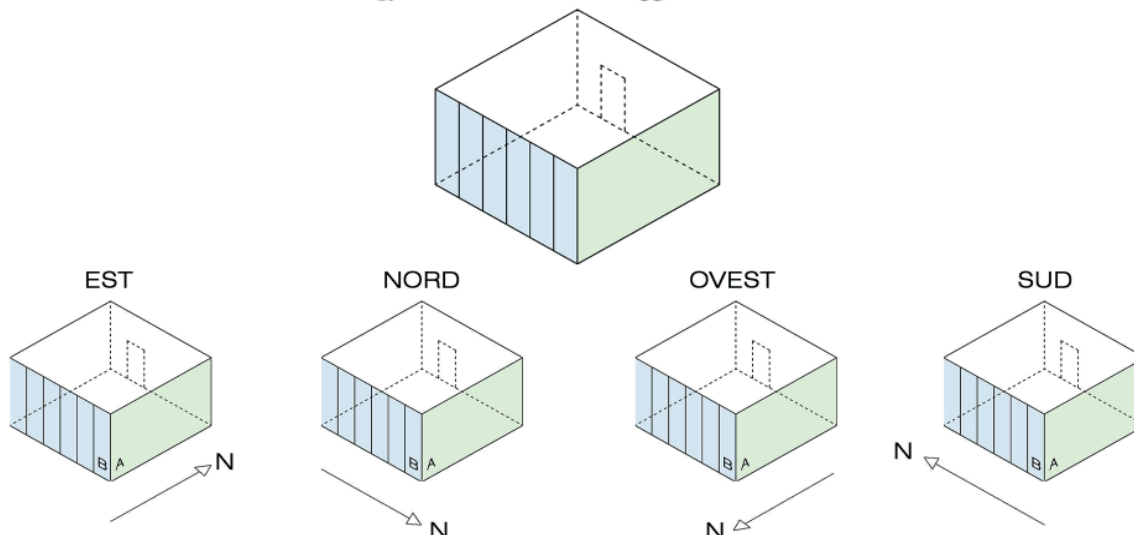
La configurazione è stata condotta per i 4 orientamenti nella località di Milano

LOCALIZZAZIONE

Latitudine	45,45	Zona climatica	E
Longitudine	9,18	Gradi giorno	2404
Altitudine	122 m s.l.m.		

SIMULAZIONI

Software	EnergyPlus	Oggetto di analisi	Test Room virtuale
----------	------------	--------------------	--------------------



INFORMAZIONI DIMENSIONALI DELLA TEST ROOM

Larghezza	Lunghezza	Altezza	Superficie	Volume
6,00 m	6,00 m	3,60 m	36,00 m ²	129,60 m ³

APERTURE DELLA TEST ROOM

Collocazione	Lunghezza	Altezza	Superficie	%
Chiusura Verticale "B"				
Superficie finestrata "W"	6,00 m	1,80 m	10,80 m ²	50%
Chiusura Verticale "D"				
Porta in legno	1,00 m	2,10 m	2,10 m ²	10%

VENTILAZIONE

Ricambi d'aria per ventilazione naturale	0,5 1/h
Sistema di ventilazione meccanica	Presente - Ibrido

FONTI RINNOVABILI

Fotovoltaico integrato in facciata	Presente
Potenza di picco	3240 W

SISTEMA DI RISCALDAMENTO ATTIVO

Combustibile	Energia Elettrica
Tem. Off	20°
Periodo di accensione	15 Ottobre -14 Aprile
Schedules	Ufficio 9:00-19:00 Dal lunedì al venerdì escluso i festivi

CARATTERISTICHE DELL'INVOLUCRO

		da esterno verso interno	W/m ² K	
Chiusura verticale	A	ESTERNO	Intonaco 2cm, blocchi di laterizio 20cm, isolante in lana di vetro 10cm, laterizio forato 8cm, intonaco 2cm.	0,26
	B	ESTERNO	Pannello S2: Fotovoltaico traslucido integrato 1cm, camera d'aria ventilata 7cm, vetro 0,4cm, Pcm 3cm, vetro 0,4cm, Aerogel 2,5cm, Vetro 0,4cm.	0,34
	C	INTERNO	Cartongesso in lastre 1,25cm, isolante in lana di vetro 7,5cm, cartongesso in lastre 1,25cm.	0,36
	D	INTERNO	Cartongesso in lastre 1,25cm, pannello in lana di vetro 7,5cm, cartongesso in lastre 1,25cm.	0,36
Chiusura orizzontale	E	TERRA	Tessuto non tessuto 0,5cm, isolante in lana di vetro 12cm, freno a vapore 0,16cm, soletta in cls armato 20cm, sottofondo in malta di cemento 3cm, massetto il cls ordinario 6cm, pavimentazione in gress 2cm.	0,23
	F	ESTERNO	Pavimentazione in Klinker 3cm, membrana impermeabilizzante 0,4cm, massetto il cls ordinario 6cm, isolante in lana di vetro 12cm, freno a vapore 0,16cm, solaio in laterocemento 26cm, intonaco 2cm.	0,22
Superficie finestrata	W	-	-	-

CONFIGURAZIONE 3

FABBISOGNO ENERGETICO PER IL RISCALDAMENTO ED IL RAFFRESCAMENTO

	Est	Nord	Ovest	Sud
Q_{heat} [KW/h]	284,30	445,48	595,65	406,23
Q_{cool} [KW/h]	1536,66	1733,06	1548,81	1837,91

FABBISOGNO ENERGIA PRIMARIA

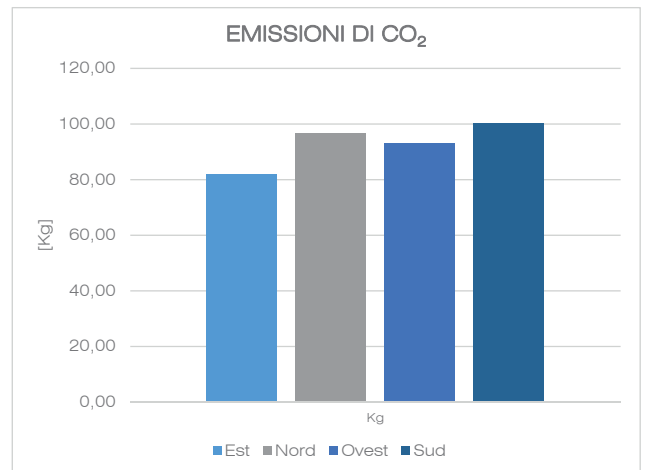
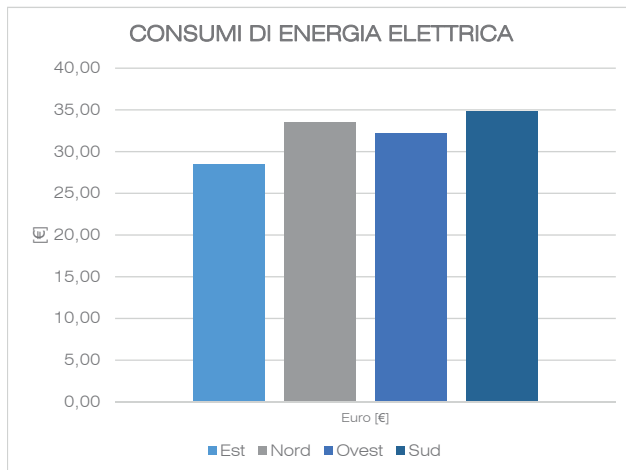
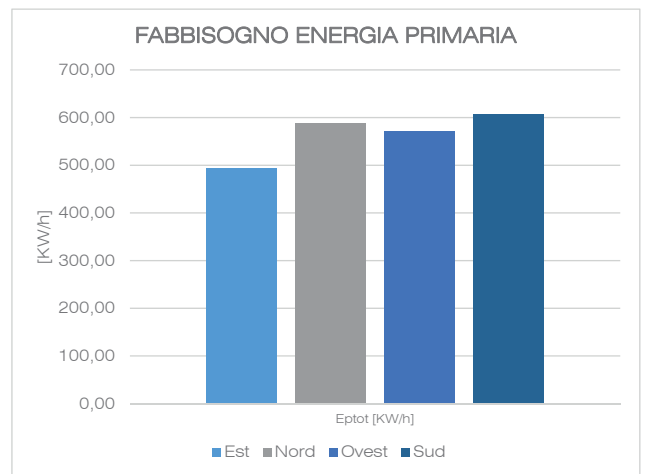
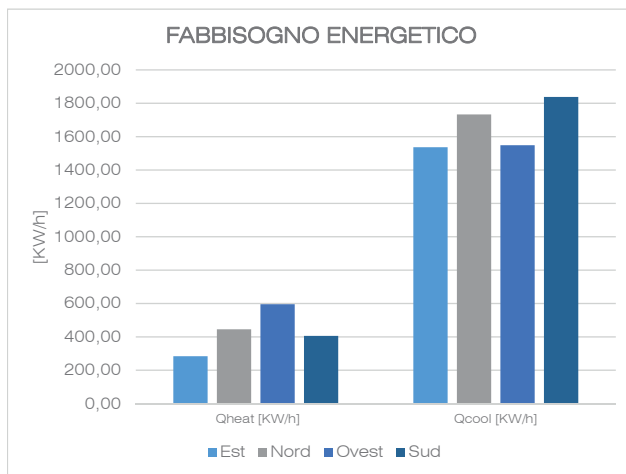
	Est	Nord	Ovest	Sud
E_{pot} [KW/h]	494,54	587,47	572,05	607,25

CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA

	Est	Nord	Ovest	Sud
Euro [€]	28,43	33,49	32,19	34,76

EMISSIONI DI CO₂

	Est	Nord	Ovest	Sud
Kg	82,04	96,69	92,99	100,33



CONFIGURAZIONE 4

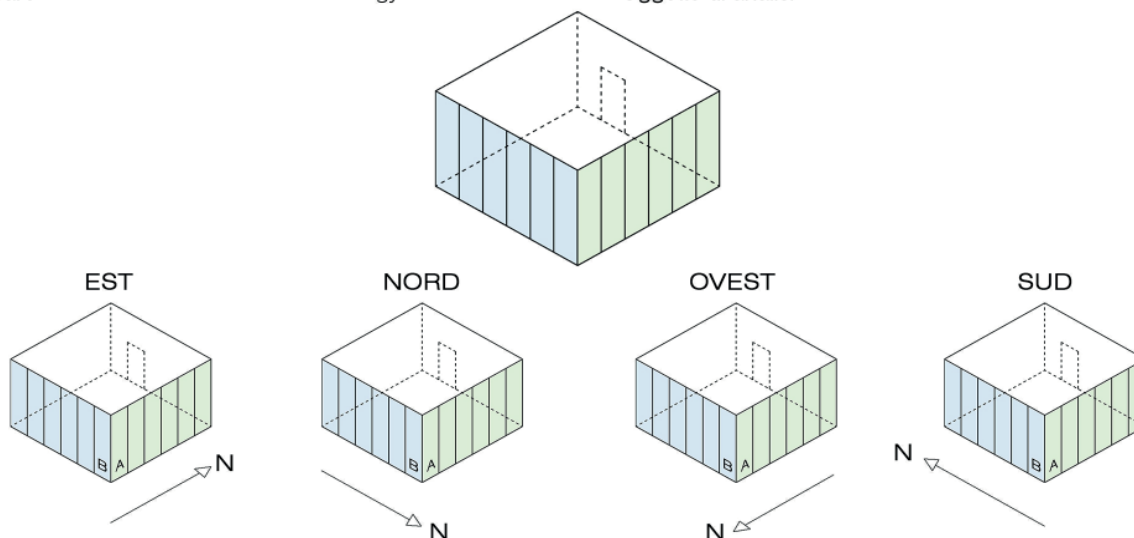
La configurazione è stata condotta per i 4 orientamenti nella località di Milano

LOCALIZZAZIONE

Latitudine	45,45	Zona climatica	E
Longitudine	9,18	Gradi giorno	2404
Altitudine	122 m s.l.m.		

SIMULAZIONI

Software	EnergyPlus	Oggetto di analisi	Test Room virtuale
----------	------------	--------------------	--------------------



INFORMAZIONI DIMENSIONALI DELLA TEST ROOM

Larghezza	Lunghezza	Altezza	Superficie	Volume
6,00 m	6,00 m	3,60 m	36,00 m ²	129,60 m ³

APERTURE DELLA TEST ROOM

Collocazione	Lunghezza	Altezza	Superficie	%
Chiusura Verticale "B"				
Superficie finestrata "W"	6,00 m	1,80 m	10,80 m ²	50%
Chiusura Verticale "D"				
Porta in legno	1,00 m	2,10 m	2,10 m ²	10%

VENTILAZIONE

Ricambi d'aria per ventilazione naturale	0,5 1/h
Sistema di ventilazione meccanica	Presente - Ibrido

FONTI RINNOVABILI

Fotovoltaico integrato in facciata	Presente
Potenza di picco	3240 W

SISTEMA DI RISCALDAMENTO ATTIVO

Combustibile	Energia Elettrica
Tem. Off	20°
Periodo di accensione	15 Ottobre -14 Aprile
Parametri di riscaldamento	Ufficio
Schedules	9:00-19:00
	Dal lunedì al venerdì escluso i festivi

CARATTERISTICHE DELL'INVOLUCRO

		da esterno verso interno	W/m ² K	
Chiusura verticale	A	ESTERNO	Pannello O1: pannello alluminio Honeycomb 1 cm, camera d'aria ventilata 7cm, vetro 0,4cm, Pcm 3,5 cm vetro 0,4 cm, VIP 2,5cm	0,058
	B	ESTERNO	Pannello S2: Fotovoltaico traslucido integrato 1cm, camera d'aria ventilata 7cm, vetro 0,4cm, Pcm 3cm, vetro 0,4cm, Aerogel 2,5cm, Vetro 0,4cm.	0,34
	C	INTERNO	Cartongesso in lastre 1,25cm, isolante in lana di vetro 7,5cm, cartongesso in lastre 1,25cm.	0,36
	D	INTERNO	Cartongesso in lastre 1,25cm, pannello in lana di vetro 7,5cm, cartongesso in lastre 1,25cm.	0,36
Chiusura orizzontale	E	TERRA	Tessuto non tessuto 0,5cm, isolante in lana di vetro 12cm, freno a vapore 0,16cm, soletta in cls armato 20cm, sottofondo in malta di cemento 3cm, massetto il cls ordinario 6cm, pavimentazione in gress 2cm.	0,23
	F	ESTERNO	Pavimentazione in Klinker 3cm, membrana impermeabilizzante 0,4cm, massetto il cls ordinario 6cm, isolante in lana di vetro 12cm, freno a vapore 0,16cm, solaio in laterocemento 26cm, intonaco 2cm.	0,22
Superficie finestrata	W	-	-	-

CONFIGURAZIONE 4

FABBISOGNO ENERGETICO PER IL RISCALDAMENTO ED IL RAFFRESCAMENTO

	Est	Nord	Ovest	Sud
Q_{heat} [KW/h]	200,45	332,23	454,51	310,02
Q_{cool} [KW/h]	1116,34	1266,65	1108,74	1330,59

FABBISOGNO ENERGIA PRIMARIA

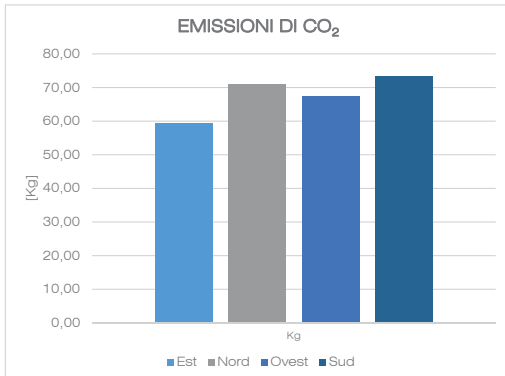
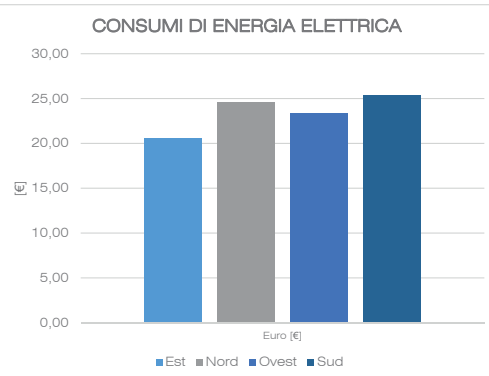
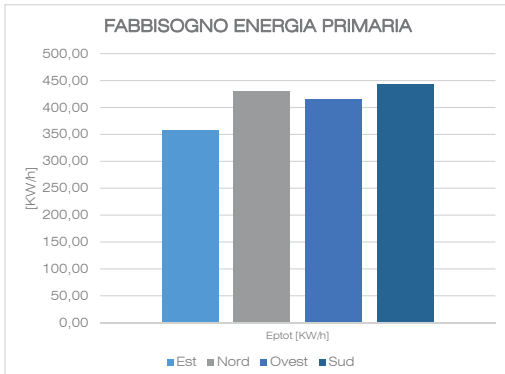
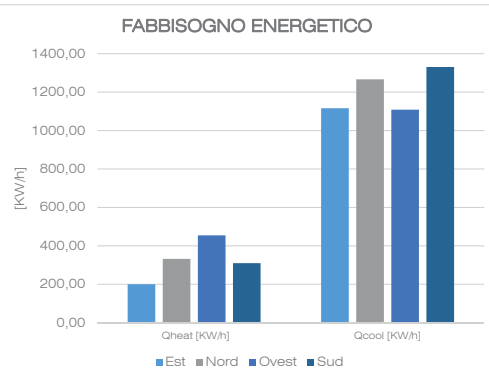
	Est	Nord	Ovest	Sud
EP_{tot} [KW/h]	357,82	430,95	416,20	443,42

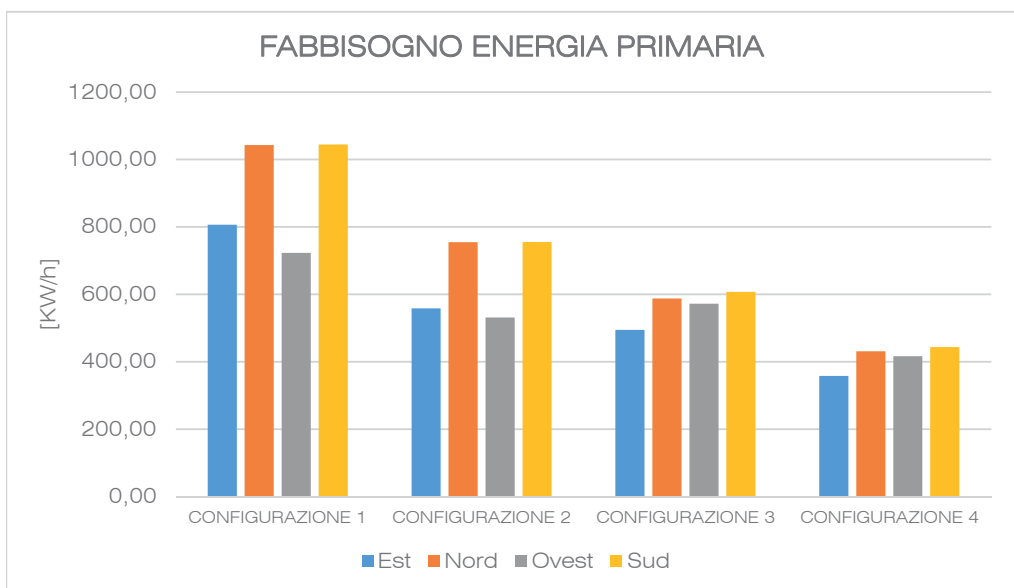
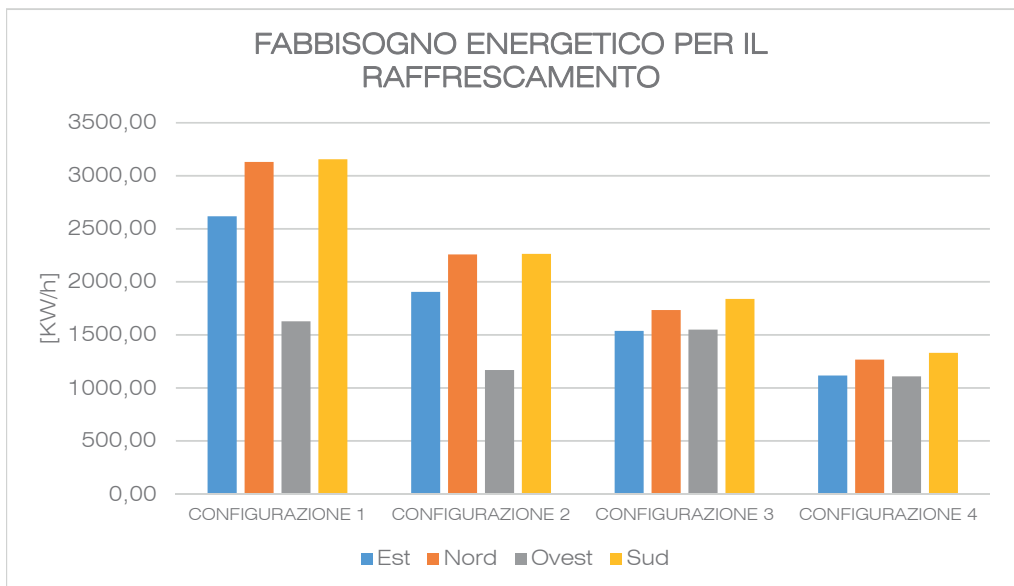
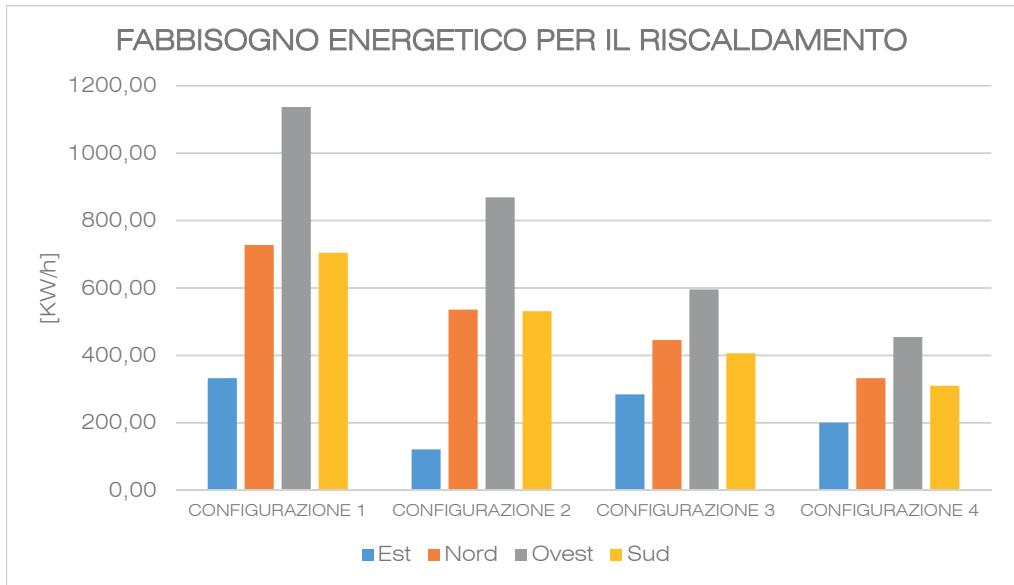
CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA

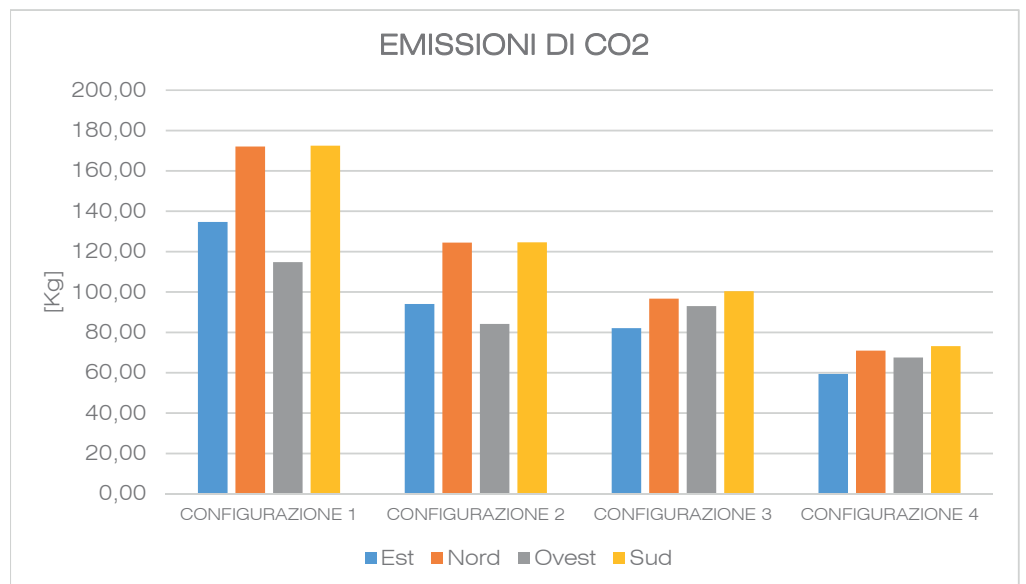
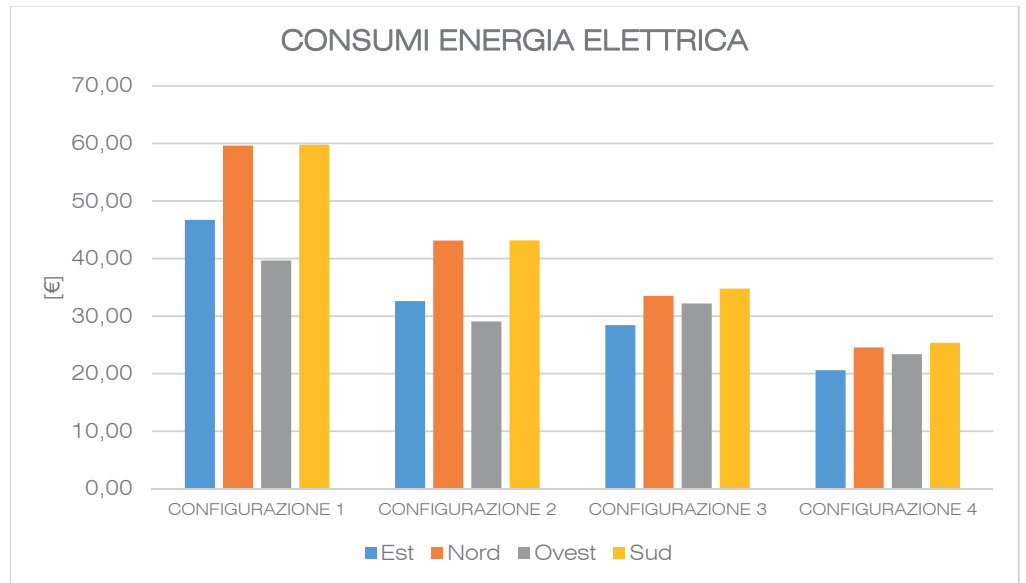
	Est	Nord	Ovest	Sud
Euro [€]	20,59	24,56	23,37	25,35

EMISSIONI DI CO₂

	Est	Nord	Ovest	Sud
Kg	59,40	70,89	67,51	73,17







Le simulazioni, condotte sulle quattro configurazioni di involucro verticale scelte, per analizzare le prestazioni del componente di facciata adattivo, nella area geografica di Milano, hanno dimostrato che:

- Il fabbisogno energetico della test room per il raffrescamento è sempre superiore a quello per il riscaldamento. Infatti, la configurazione della stanza, essendo concepita con due pareti esterne disperdenti e due pareti interne adiacenti verso locali riscaldati, risulta essere vantaggiosa per quanto riguarda il fabbisogno di riscaldamento, mentre è peggiorativa per ciò che concerne il fabbisogno energetico per il raffrescamento. Questo scenario era facilmente prevedibile, in considerazione del fatto che, anche per la "configurazione 1", dove non sono stati applicati i prodotti dalla presente ricerca, sono state comunque adottate delle stratigrafie esterne che rispettano i parametri di legge definiti nell'allegato A del D.M. 26 Giugno 2015, per "l'edificio di riferimento" da costruire a partire dal 1 gennaio 2021. La scelta di avere una test room nella quale la richiesta di energia per il raffrescamento fosse superiore a quella per il riscaldamento è stata pensata per simulare una condizione diffusa e più difficile da controllare, che spesso viene sottovalutata, ma che di solito si verifica durante la fase di progettazione. Lo scopo è quello di dimostrare i vantaggi che il presente prodotto di ricerca è in grado di fornire, non solo in termini di riduzione del fabbisogno energetico per il riscaldamento, ma anche e soprattutto per ciò che concerne la prestazione estiva dell'involucro.
- Per quanto riguarda il fabbisogno per il riscaldamento, la configurazione 2 con esposizione est registra il valore minimo assoluto di 121,21 kW/h con una riduzione del 64% rispetto alla configurazione 1. L'applicazione del pannello O1, con i suoi valori di trasmittanza, attenuazione e sfasamento, in combinazione con gli apporti solari derivanti dalla superficie finestrata presente nella parete B, ci permette di ottenere questo ottimo risultato.
- In tutte e quattro le configurazioni con esposizione ovest, il fabbisogno di energia per il riscaldamento richiesto è sempre superiore rispetto alle esposizioni est, nord e sud. Nonostante i significativi guadagni rispetto alla configurazione 1, la test room con esposizione ovest, registra valori di fabbisogno energetico per il riscaldamento sempre superiori rispetto alle esposizioni est, nord e sud. Questo può essere spiegato dal fatto che nell'esposizione ovest, la chiusura B, dotata di aperture trasparenti, (configurazioni 1 e 2) o semitrasparenti, (configurazioni 3 e 4), è sempre rivolta verso nord, riducendo quindi al minimo gli apporti di energia solare.
- Nella configurazioni 2,3,4 il PCM, contenuto all'interno dei pannelli O1 ed S2, contribuisce ad abbassare il fabbisogno di energia per il riscaldamento poiché durante le ore diurne, di massimo irraggiamento solare, il flusso di aria entrante nella cavità inferiore si surriscalda attivando il cambiamento di stato, da solido a liquido, rilasciando così l'energia immagazzinata sotto-forma di calore. In termini percentuali la riduzione maggiore si ha nella configurazione 4 con esposizione ad ovest, nella quale si registra una riduzione del 60% rispetto alla "1", ma in termini assoluti la richiesta minima di energia si verifica ad est nella configurazione 2.
- Per quanto riguarda il fabbisogno per il raffrescamento, la configurazione 4 con esposizione ovest registra il valore minimo assoluto di 1108,74 kW/h con una riduzione del 32% rispetto alla configurazione 1. In termini generali, l'esposizione ovest risulta essere sempre più vantaggiosa rispetto alle altre tre. Sostanziali riduzioni del fabbisogno di raffrescamento si verificano, allo stesso modo, dove l'esposizione è meno favorevole. Questo sta a significare che i pannelli O1 ed S2 contribuiscono in modo significativo alla riduzione del fabbisogno energetico per il raffrescamento. Nello specifico nella configurazione 4 ad est, nord e sud, il fabbisogno viene ridotto rispettivamente del 57%, 60%, 58% rispetto alla configurazione 1.
- Nelle configurazioni 2,3,4 il PCM, contenuto all'interno dei pannelli O1 ed S2, contribuisce ad abbassare in modo piuttosto significativo il fabbisogno di energia per il raffrescamento poiché durante le ore notturne, quando si registrano temperature più basse, il flusso d'aria esterno, pompato all'interno dell'intercapedine, innesca il processo di solidificazione del materiale a cambiamento di fase, immagazzinando

- energia latente di raffrescamento da immettere direttamente nella test room.
- La produzione di energia proveniente dal fotovoltaico integrato sulla facciata del modulo S2, contribuisce a ridurre il fabbisogno per il raffrescamento ed il riscaldamento nelle configurazioni 3 e 4. L'inclinazione a 90° dei moduli fotovoltaici (verticali), influisce chiaramente sulla produzione di energia elettrica. Se nell'esposizione est, (pannello S2 rivolto a sud), l'inclinazione dei moduli non è quella ideale, nell'esposizione nord (pannello S2 rivolto ad est) e sud (pannello S2 rivolto ad ovest), la radiazione solare più bassa delle ore mattutine e di quelle serali, garantisce una produzione di energia comunque vantaggiosa con valori simili tra le tre esposizioni. Nello specifico:
 - 2128,40 KW/h esposizione Est,
 - 1990,90 KW/h esposizione nord,
 - 1113,80 KW/h esposizione ovest
 - 2111,30 KW/h esposizione sud.
- Come era prevedibile, la produzione di energia con esposizione ovest (pannello S2 rivolto a nord) da valori sensibilmente inferiori rispetto alle altre tre esposizioni.
- Facendo un bilancio complessivo tra il fabbisogno energetico per il riscaldamento ed il raffrescamento, nella configurazione 4 con esposizione est, la quantità di energia primaria globalmente richiesta, per assicurare un'adeguata climatizzazione estiva ed invernale, è quella con il valore più basso (357,82 KW/h), registrando una riduzione del 56% rispetto alla configurazione 1. In generale nella configurazione 4 si registrano i valori più bassi di fabbisogno di energia primaria, confermando come la combinazione del pannello O1 e S2 contribuisca significativamente alla riduzione dei consumi energetici e alla riduzione delle emissioni di CO₂. In termini percentuali nella altre esposizioni si rilevano una riduzione dei consumi energetici a nord del 59%, ad ovest del 42% e a sud del 58%.

CONFIGURAZIONE 1

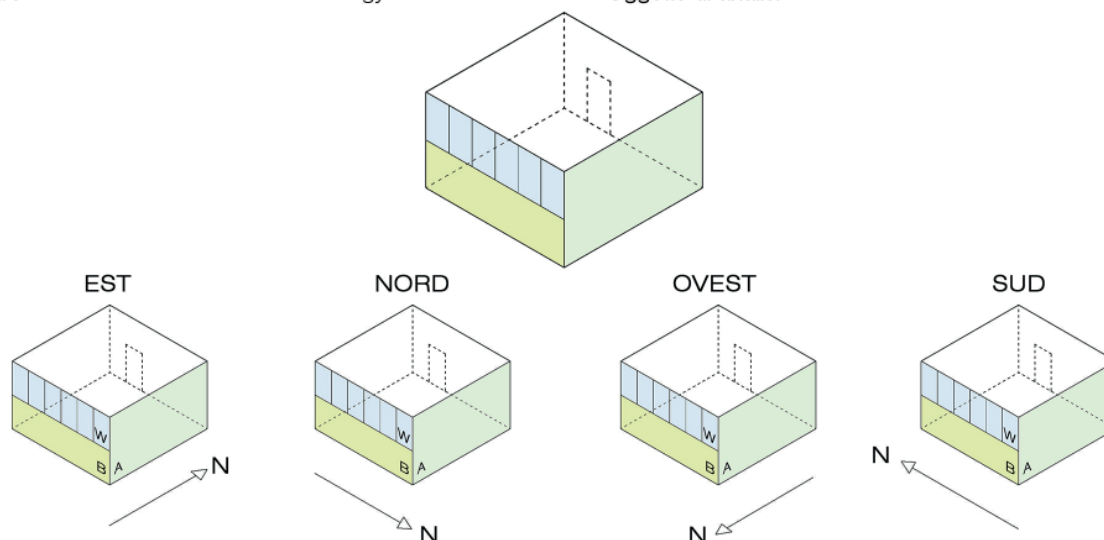
La configurazione è stata condotta per i 4 orientamenti nella località di Ascoli Piceno

LOCALIZZAZIONE

Latitudine	42,85	Zona climatica	D
Longitudine	13,56	Gradi giorno	1698
Altitudine	154 m s.l.m.		

SIMULAZIONI

Software	EnergyPlus	Oggetto di analisi	Test Room virtuale
----------	------------	--------------------	--------------------



INFORMAZIONI DIMENSIONALI DELLA TEST ROOM

Larghezza	Lunghezza	Altezza	Superficie	Volume
6,00 m	6,00 m	3,60 m	36,00 m ²	129,60 m ³

APERTURE DELLA TEST ROOM

Collocazione	Lunghezza	Altezza	Superficie	%
Chiusura Verticale "B" Superficie finestrata "W"	6,00 m	1,80 m	10,80 m ²	50%
Chiusura Verticale "D" Porta in legno	1,00 m	2,10 m	2,10 m ²	10%

VENTILAZIONE

Ricambi d'aria per ventilazione naturale	0,5 1/h
Sistema di ventilazione meccanica	assente

FONTI RINNOVABILI

Fotovoltaico integrato in facciata	assente
------------------------------------	---------

SISTEMA DI RISCALDAMENTO ATTIVO

Combustibile	Energia Elettrica
Tem. Off	20°
Periodo di accensione	01 Novembre -15 Aprile
Parametri di riscaldamento	Ufficio
Schedules	9:00-19:00
	Dal lunedì al venerdì escluso i festivi

CARATTERISTICHE DELL'INVOLUCRO

		da esterno verso interno	W/m ² K	
Chiusura verticale	A	ESTERNO	Intonaco 2cm, blocchi di laterizio 20cm, isolante in lana di vetro 10cm, laterizio forato 8cm, intonaco 2cm.	0,26
	B	ESTERNO	Intonaco 2cm, blocchi di laterizio 20cm, isolante in lana di vetro 10cm, laterizio forato 8cm, intonaco 2cm.	0,26
	C	INTERNO	Cartongesso in lastre 1,25cm, isolante in lana di vetro 7,5cm, cartongesso in lastre 1,25cm.	0,36
	D	INTERNO	Cartongesso in lastre 1,25cm, pannello in lana di vetro 7,5cm, cartongesso in lastre 1,25cm.	0,36
Chiusura orizzontale	E	TERRA	Tessuto non tessuto 0,5cm, isolante in lana di vetro 12cm, freno a vapore 0,16cm, soletta in cls armato 20cm, sottofondo in malta di cemento 3cm, massetto il cls ordinario 6cm, pavimentazione in gress 2cm.	0,23
	F	ESTERNO	Pavimentazione in Klinker 3cm, membrana impermeabilizzante 0,4cm, massetto il cls ordinario 6cm, isolante in lana di vetro 12cm, freno a vapore 0,16cm, solaio in laterocemento 26cm, intonaco 2cm.	0,22

CONFIGURAZIONE 1

FABBISOGNO ENERGETICO PER IL RISCALDAMENTO ED IL RAFFRESCAMENTO

	Est	Nord	Ovest	Sud
Q_{heat} [KW/h]	819,842	819,04	1043,21	806,23
Q_{cool} [KW/h]	2089,43	2934,77	1488,43	2952,25

FABBISOGNO ENERGIA PRIMARIA

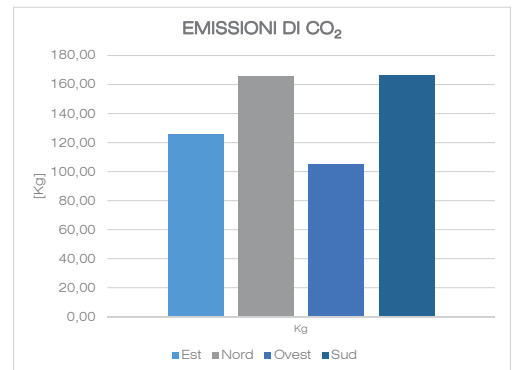
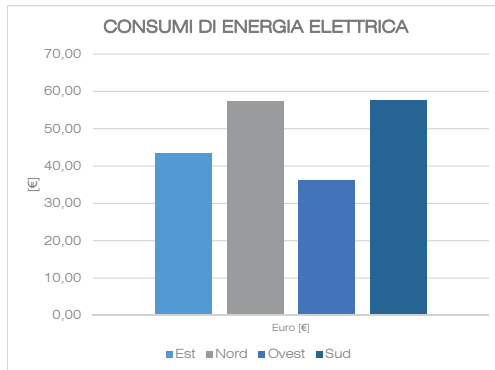
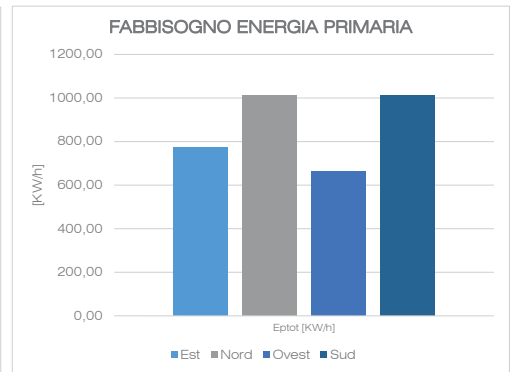
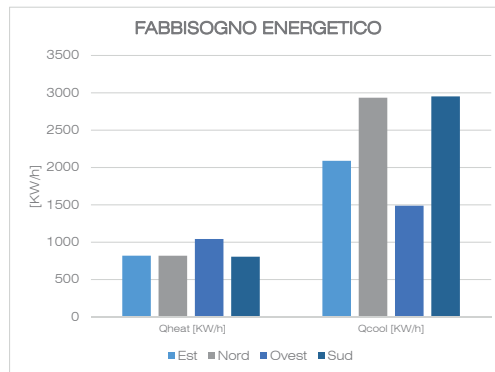
	Est	Nord	Ovest	Sud
E_{ptot} [KW/h]	775,60	1010,22	661,84	1012,03

CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA

	Est	Nord	Ovest	Sud
Euro [€]	43,61	57,46	36,32	57,60

EMISSIONI DI CO₂

	Est	Nord	Ovest	Sud
Kg	126,00	165,89	105,06	166,29



CONFIGURAZIONE 2

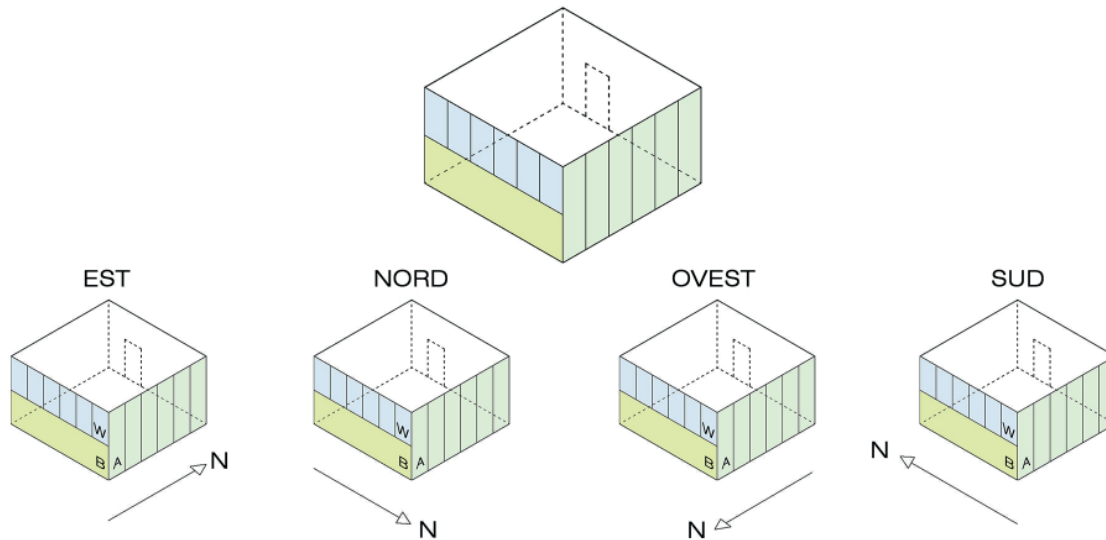
La configurazione è stata condotta per i 4 orientamenti nella località di Ascoli Piceno

LOCALIZZAZIONE

Latitudine	42,85	Zona climatica	D
Longitudine	13,56	Gradi giorno	1698
Altitudine	154 m s.l.m.		

SIMULAZIONI

Software	EnergyPlus	Oggetto di analisi	Test Room virtuale
----------	------------	--------------------	--------------------



INFORMAZIONI DIMENSIONALI DELLA TEST ROOM

Larghezza	Lunghezza	Altezza	Superficie	Volume
6,00 m	6,00 m	3,60 m	36,00 m ²	129,60 m ³

APERTURE DELLA TEST ROOM

Collocazione	Lunghezza	Altezza	Superficie	%
Chiusura Verticale "B"				
Superficie finestrata "W"	6,00 m	1,80 m	10,80 m ²	50%
Chiusura Verticale "D"				
Porta in legno	1,00 m	2,10 m	2,10 m ²	10%

VENTILAZIONE

Ricambi d'aria per ventilazione naturale	0,5 1/h
Sistema di ventilazione meccanica	assente

FONTI RINNOVABILI

Fotovoltaico integrato in facciata	assente
------------------------------------	---------

SISTEMA DI RISCALDAMENTO ATTIVO

Combustibile	Energia Elettrica
Tem. Off	20°
Periodo di accensione	01 Novembre -15 Aprile
Parametri di riscaldamento	Ufficio
Schedules	9:00-19:00
	Dal lunedì al venerdì escluso i festivi

CARATTERISTICHE DELL'INVOLUCRO

		da esterno verso interno	W/m ² K	
Chiusura verticale	A	ESTERNO	Pannello O1: pannello alluminio Honeycomb 1 cm, camera d'aria ventilata 7cm, vetro 0,4cm, Pcm 3,5 cm vetro 0,4 cm, VIP 2,5cm	0,058
	B	ESTERNO	Intonaco 2cm, blocchi di laterizio 20cm, isolante in lana di vetro 10cm, laterizio forato 8cm, intonaco 2cm.	0,26
	C	INTERNO	Cartongesso in lastre 1,25cm, isolante in lana di vetro 7,5cm, cartongesso in lastre 1,25cm.	0,36
	D	INTERNO	Cartongesso in lastre 1,25cm, pannello in lana di vetro 7,5cm, cartongesso in lastre 1,25cm.	0,36
Chiusura orizzontale	E	TERRA	Tessuto non tessuto 0,5cm, isolante in lana di vetro 12cm, freno a vapore 0,16cm, soletta in cls armato 20cm, sottofondo in malta di cemento 3cm, massetto il cls ordinario 6cm, pavimentazione in gress 2cm.	0,23
	F	ESTERNO	Pavimentazione in Klinker 3cm, membrana impermeabilizzante 0,4cm, massetto il cls ordinario 6cm, isolante in lana di vetro 12cm, freno a vapore 0,16cm, solaio in laterocemento 26cm, intonaco 2cm.	0,22

CONFIGURAZIONE 2

FABBISOGNO ENERGETICO PER IL RISCALDAMENTO ED IL RAFFRESCAMENTO

	Est	Nord	Ovest	Sud
Q_{heat} [KW/h]	338,78	608,18	792,32	604,88
Q_{cool} [KW/h]	1520,53	2117,56	1075,72	2122,04

FABBISOGNO ENERGIA PRIMARIA

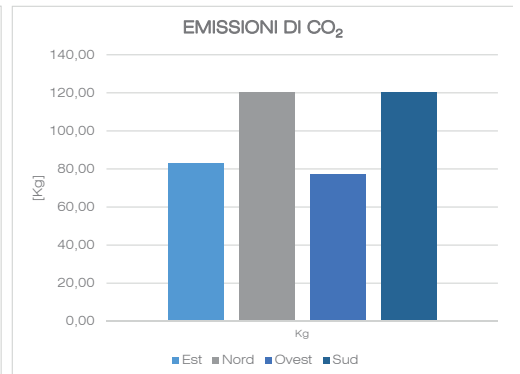
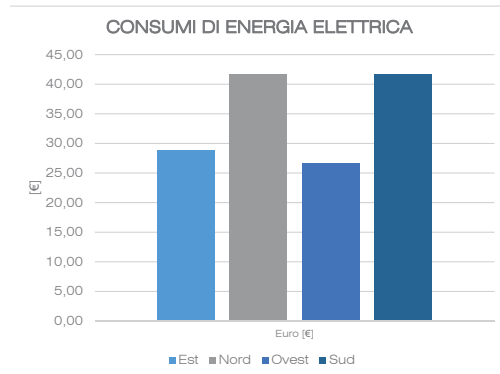
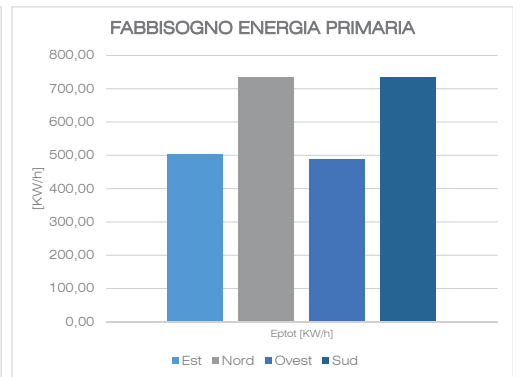
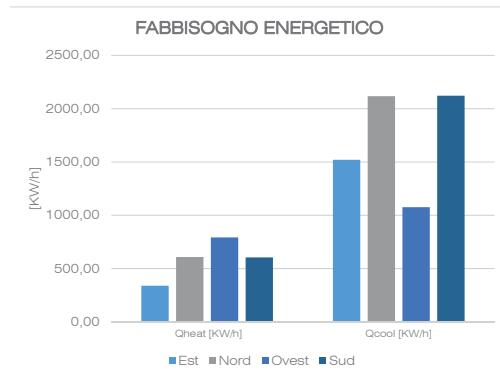
	Est	Nord	Ovest	Sud
Ep_{tot} [KW/h]	503,03	733,02	487,46	733,47

CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA

	Est	Nord	Ovest	Sud
Euro [€]	28,79	41,66	26,68	41,69

EMISSIONI DI CO₂

	Est	Nord	Ovest	Sud
Kg	83,10	120,27	77,21	120,37



CONFIGURAZIONE 3

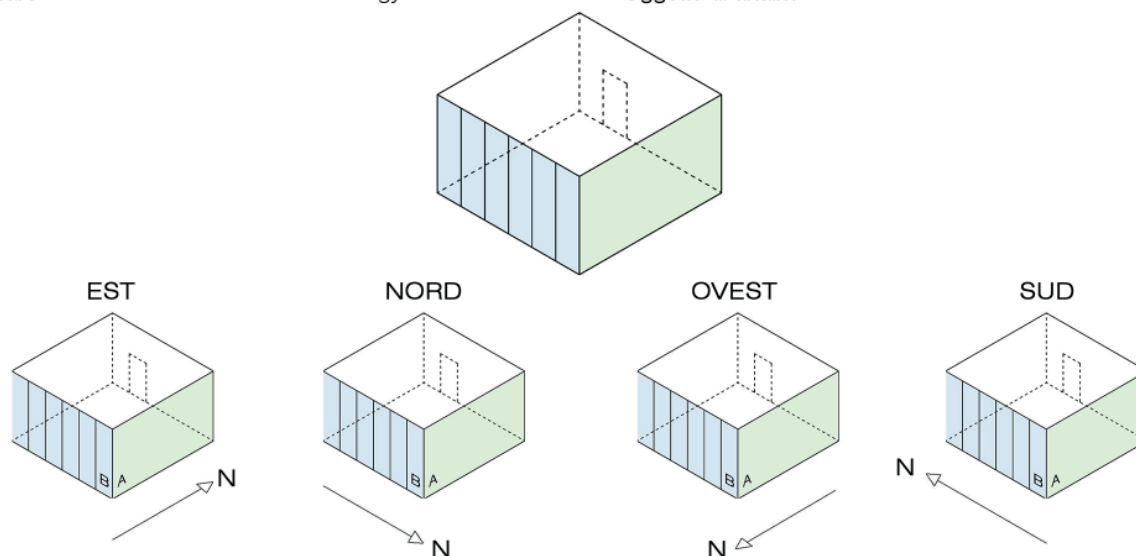
La configurazione è stata condotta per i 4 orientamenti nella località di Ascoli Piceno

LOCALIZZAZIONE

Latitudine	42,85	Zona climatica	D
Longitudine	13,56	Gradi giorno	1698
Altitudine	154 m s.l.m.		

SIMULAZIONI

Software	EnergyPlus	Oggetto di analisi	Test Room virtuale
----------	------------	--------------------	--------------------



INFORMAZIONI DIMENSIONALI DELLA TEST ROOM

Larghezza	Lunghezza	Altezza	Superficie	Volume
6,00 m	6,00 m	3,60 m	36,00 m ²	129,60 m ³

APERTURE DELLA TEST ROOM

Collocazione	Lunghezza	Altezza	Superficie	%
Chiusura Verticale "B"				
Superficie finestrata "W"	6,00 m	1,80 m	10,80 m ²	50%
Chiusura Verticale "D"				
Porta in legno	1,00 m	2,10 m	2,10 m ²	10%

VENTILAZIONE

Ricambi d'aria per ventilazione naturale	0,5 1/h
Sistema di ventilazione meccanica	Presente - Ibrido

FONTI RINNOVABILI

Fotovoltaico integrato in facciata	Presente
Potenza di picco	3240 W

SISTEMA DI RISCALDAMENTO ATTIVO

Combustibile	Energia Elettrica
Tem. Off	20°
Periodo di accensione	01 Novembre -15 Aprile
Parametri di riscaldamento	Ufficio
Schedules	9:00-19:00
	Dal lunedì al venerdì escluso i festivi

CARATTERISTICHE DELL'INVOLUCRO

		da esterno verso interno	W/m ² K	
Chiusura verticale	A	ESTERNO	Intonaco 2cm, blocchi di laterizio 20cm, isolante in lana di vetro 10cm, laterizio forato 8cm, intonaco 2cm.	0,26
	B	ESTERNO	Pannello S2: Fotovoltaico traslucido integrato 1cm, camera d'aria ventilata 7cm, vetro 0,4cm, Pcm 3cm, vetro 0,4cm, Aerogel 2,5cm, Vetro 0,4cm.	0,34
	C	INTERNO	Cartongesso in lastre 1,25cm, isolante in lana di vetro 7,5cm, cartongesso in lastre 1,25cm.	0,36
	D	INTERNO	Cartongesso in lastre 1,25cm, pannello in lana di vetro 7,5cm, cartongesso in lastre 1,25cm.	0,36
Chiusura orizzontale	E	TERRA	Tessuto non tessuto 0,5cm, isolante in lana di vetro 12cm, freno a vapore 0,16cm, soletta in cls armato 20cm, sottofondo in malta di cemento 3cm, massetto il cls ordinario 6cm, pavimentazione in gress 2cm.	0,23
	F	ESTERNO	Pavimentazione in Klinker 3cm, membrana impermeabilizzante 0,4cm, massetto il cls ordinario 6cm, isolante in lana di vetro 12cm, freno a vapore 0,16cm, solaio in laterocemento 26cm, intonaco 2cm.	0,22

CONFIGURAZIONE 3

FABBISOGNO ENERGETICO PER IL RISCALDAMENTO ED IL RAFFRESCAMENTO

	Est	Nord	Ovest	Sud
Q_{heat} [KW/h]	436,41	498,07	545,31	473,45
Q_{cool} [KW/h]	1305,81	1602,73	1449,67	1692,77

FABBISOGNO ENERGIA PRIMARIA

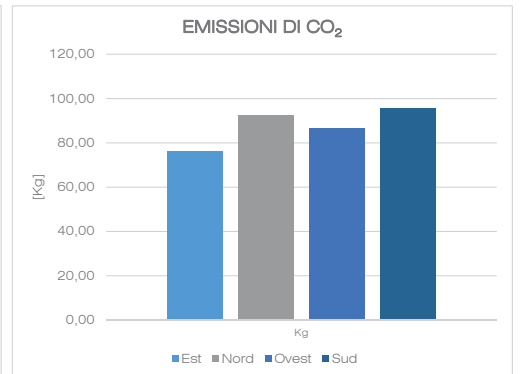
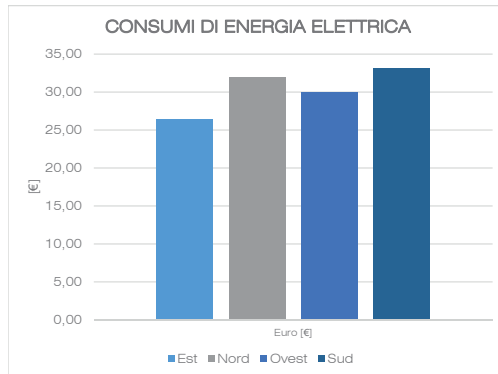
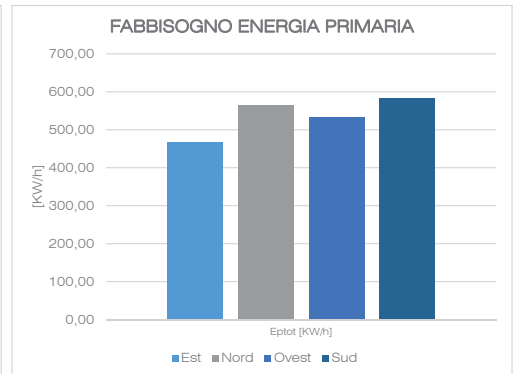
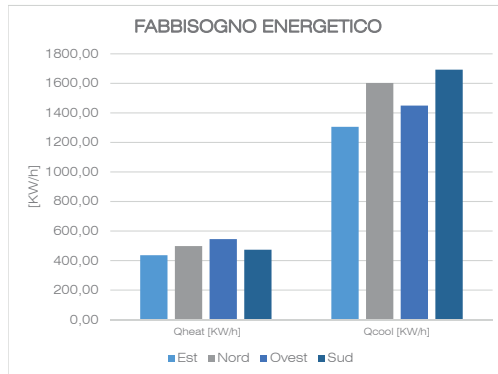
	Est	Nord	Ovest	Sud
Ep_{tot} [KW/h]	466,63	563,79	532,52	582,94

CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA

	Est	Nord	Ovest	Sud
Euro [€]	26,39	31,96	29,99	33,15

EMISSIONI DI CO₂

	Est	Nord	Ovest	Sud
Kg	76,21	92,29	86,63	95,72



CONFIGURAZIONE 4

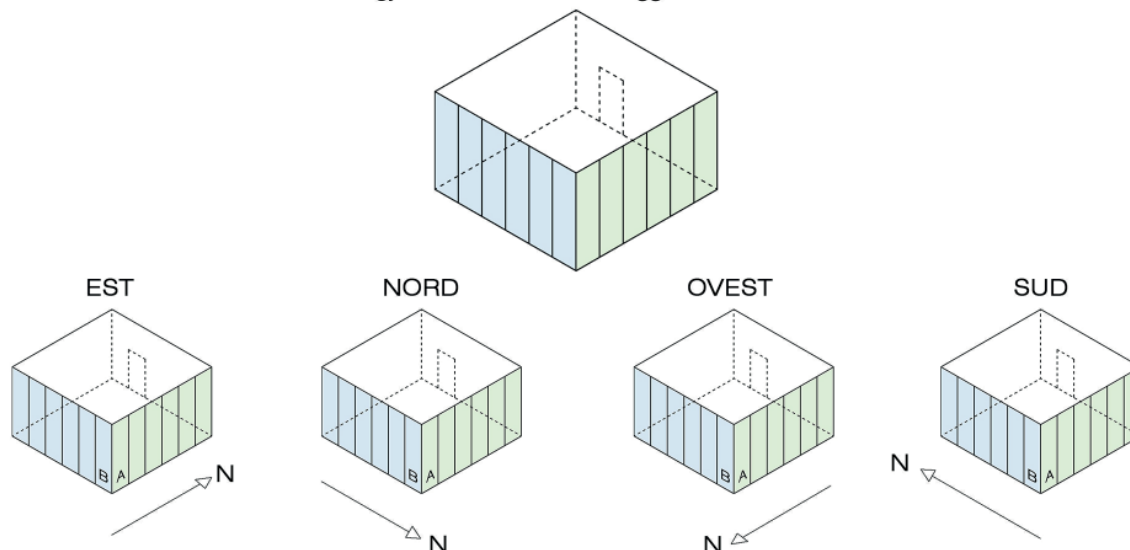
La configurazione è stata condotta per i 4 orientamenti nella località di Ascoli Piceno

LOCALIZZAZIONE

Latitudine	42,85	Zona climatica	D
Longitudine	13,56	Gradi giorno	1698
Altitudine	154 m s.l.m.		

SIMULAZIONI

Software	EnergyPlus	Oggetto di analisi	Test Room virtuale
----------	------------	--------------------	--------------------



INFORMAZIONI DIMENSIONALI DELLA TEST ROOM

Larghezza	Lunghezza	Altezza	Superficie	Volume
6,00 m	6,00 m	3,60 m	36,00 m ²	129,60 m ³

APERTURE DELLA TEST ROOM

Collocazione	Lunghezza	Altezza	Superficie	%
Chiusura Verticale "B"				
Superficie finestrata "W"	6,00 m	1,80 m	10,80 m ²	50%
Chiusura Verticale "D"				
Porta in legno	1,00 m	2,10 m	2,10 m ²	10%

VENTILAZIONE

Ricambi d'aria per ventilazione naturale	0,5 1/h
Sistema di ventilazione meccanica	Presente - Ibrido

FONTI RINNOVABILI

Fotovoltaico integrato in facciata	Presente
Potenza di picco	3240 W

SISTEMA DI RISCALDAMENTO ATTIVO

Combustibile	Energia Elettrica
Tem. Off	20°
Periodo di accensione	01 Novembre -15 Aprile
Parametri di riscaldamento	Ufficio
Schedules	9:00-19:00
	Dal lunedì al venerdì escluso i festivi

CARATTERISTICHE DELL'INVOLUCRO

		da esterno verso interno	W/m ² K	
Chiusura verticale	A	ESTERNO		
			Pannello O1: pannello alluminio Honeycomb 1 cm, camera d'aria ventilata 7cm, vetro 0,4cm, Pcm 3,5 cm vetro 0,4 cm, VIP 2,5cm	0,058
	B	ESTERNO		
			Pannello S2: Fotovoltaico traslucido integrato 1cm, camera d'aria ventilata 7cm, vetro 0,4cm, Pcm 3cm, vetro 0,4cm, Aerogel 2,5cm, Vetro 0,4cm.	0,34
Chiusura orizzontale	C	INTERNO		
			Cartongesso in lastre 1,25cm, isolante in lana di vetro 7,5cm, cartongesso in lastre 1,25cm.	0,36
	D	INTERNO		
			Cartongesso in lastre 1,25cm, pannello in lana di vetro 7,5cm, cartongesso in lastre 1,25cm.	0,36
	E	TERRA		
			Tessuto non tessuto 0,5cm, isolante in lana di vetro 12cm, freno a vapore 0,16cm, soletta in cls armato 20cm, sottofondo in malta di cemento 3cm, massetto il cls ordinario 6cm, pavimentazione in gress 2cm.	0,23
	F	ESTERNO		
			Pavimentazione in Klinker 3cm, membrana impermeabilizzante 0,4cm, massetto il cls ordinario 6cm, isolante in lana di vetro 12cm, freno a vapore 0,16cm, solaio in laterocemento 26cm, intonaco 2cm.	0,22

CONFIGURAZIONE 4

FABBISOGNO ENERGETICO PER IL RISCALDAMENTO ED IL RAFFRESCAMENTO

	Est	Nord	Ovest	Sud
Q_{heat} [KW/h]	324,92	374,70	416,37	361,34
Q_{cool} [KW/h]	950,37	1171,72	1047,58	1231,72

FABBISOGNO ENERGIA PRIMARIA

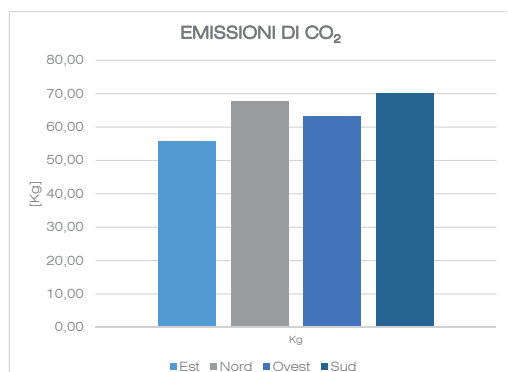
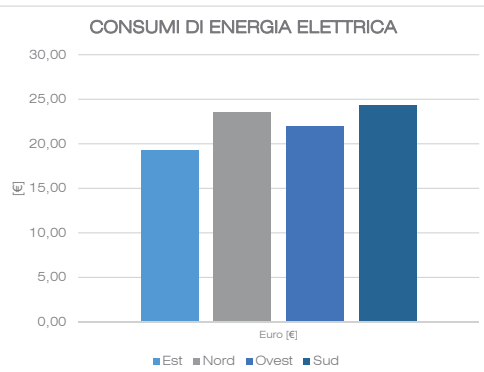
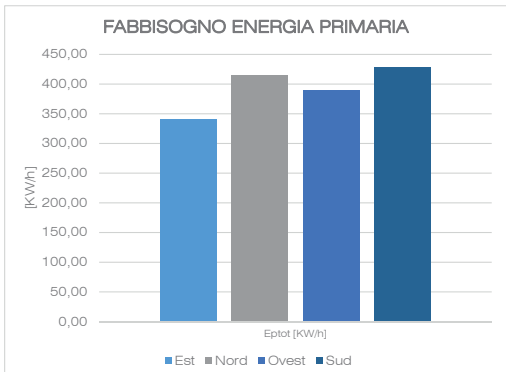
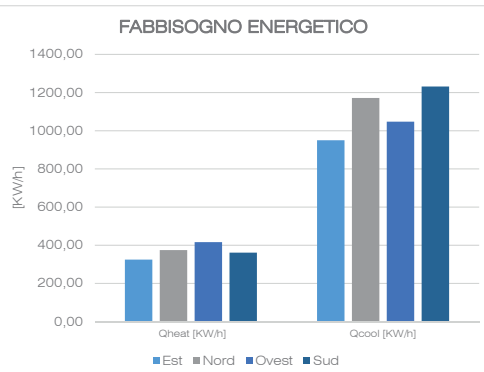
	Est	Nord	Ovest	Sud
Ep_{tot} [KW/h]	341,35	414,69	390,13	428,18

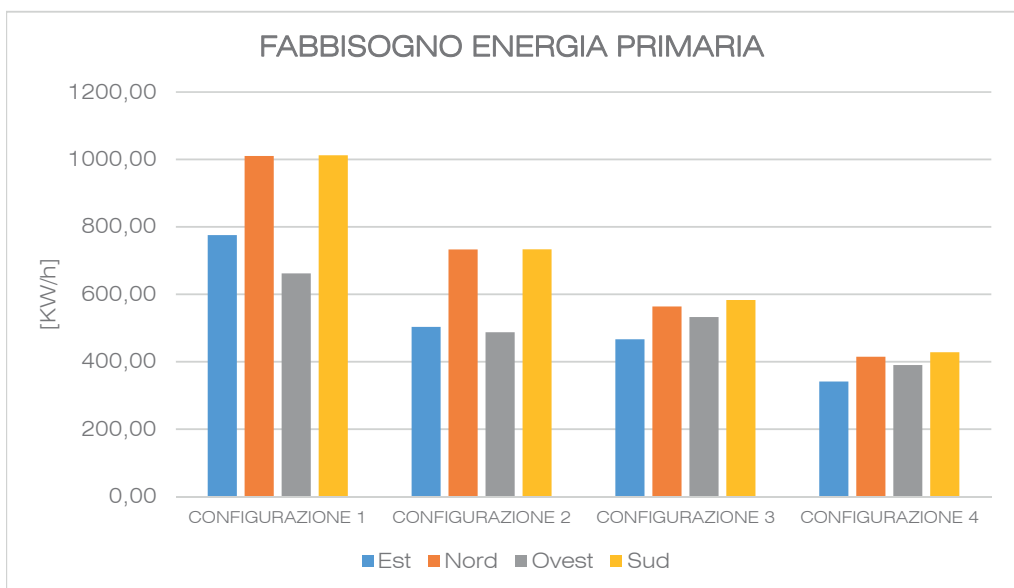
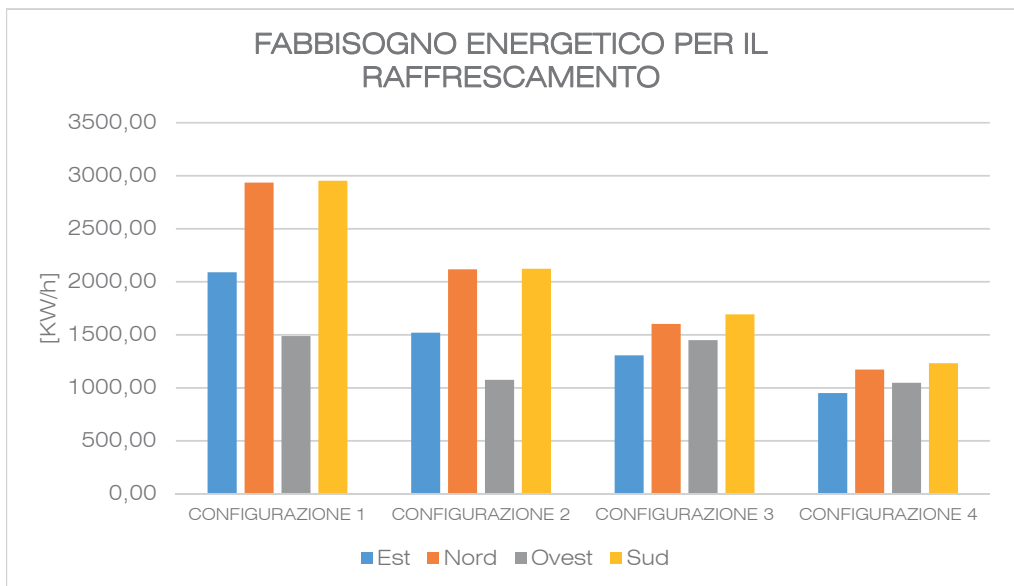
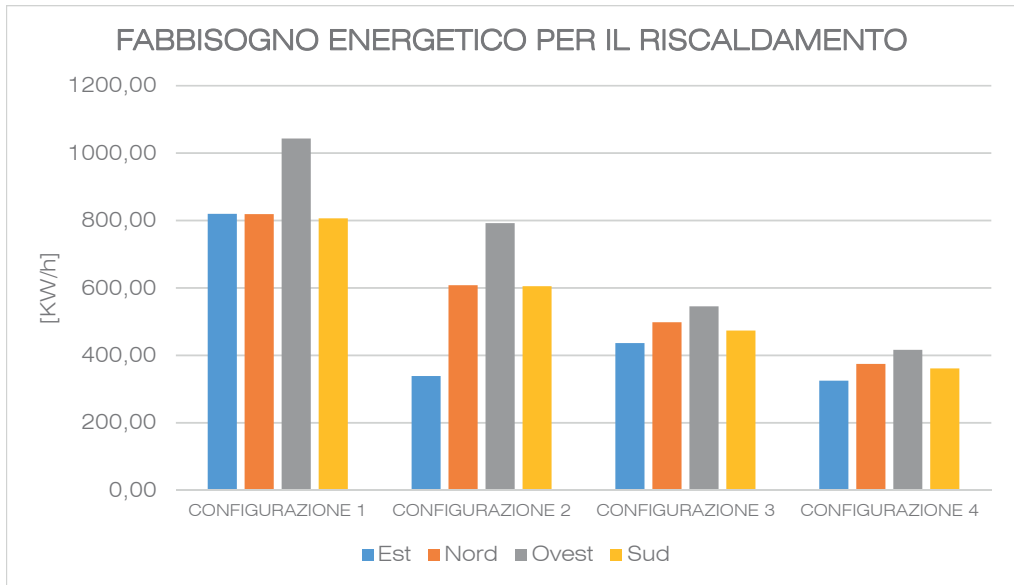
CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA

	Est	Nord	Ovest	Sud
Euro [€]	19,29	23,49	21,93	24,32

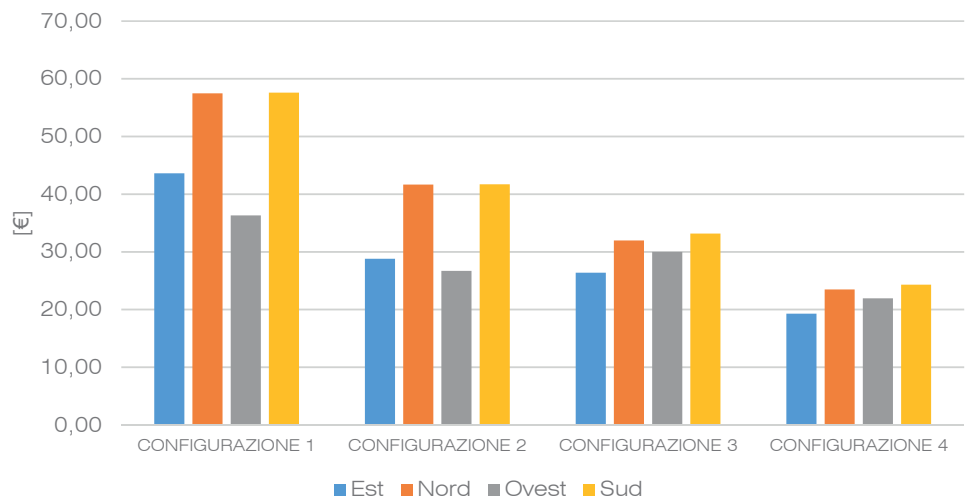
EMISSIONI DI CO₂

	Est	Nord	Ovest	Sud
Kg	55,71	67,82	63,35	70,21

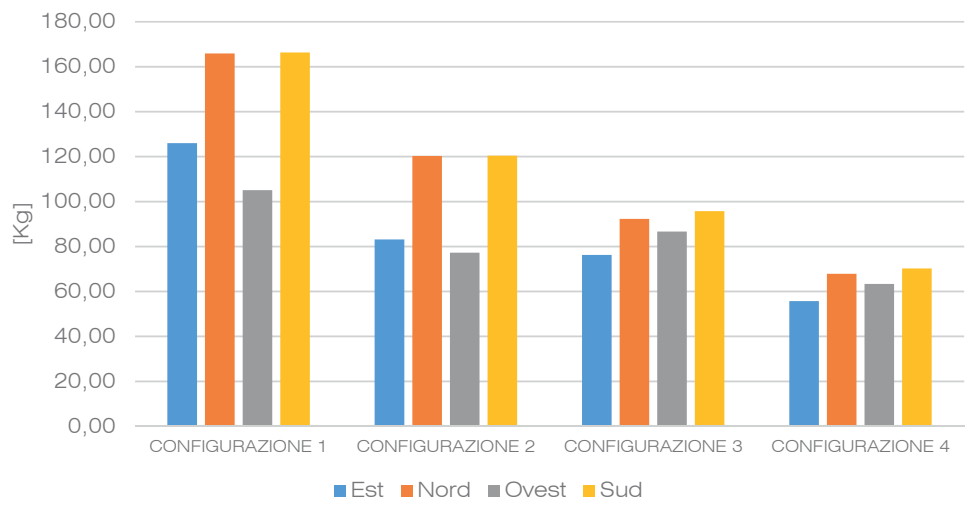




CONSUMI ENERGIA ELETTRICA



EMISSIONI DI CO2



Le simulazioni, condotte sulle quattro configurazioni di involucro verticale scelte, per analizzare le prestazioni del componente di facciata adattivo, nella area geografica di Ascoli Piceno, hanno dimostrato che:

- Il fabbisogno energetico della test room per il raffrescamento è sempre superiore a quello per il riscaldamento. Valgono anche qui le considerazioni fatte sulla configurazione della testroom e sulle stratigrafie adottate. Come per Milano infatti, la scelta di avere una test room nella quale la richiesta di energia per il raffrescamento fosse superiore a quella per il riscaldamento è stata pensata per simulare una condizione diffusa e più difficile da controllare, che spesso viene sottovalutata, ma che di solito si verifica durante la fase di progettazione. Lo scopo è quello di dimostrare i vantaggi che il presente prodotto di ricerca è in grado di fornire, non solo in termini di riduzione del fabbisogno energetico per il riscaldamento, ma anche e soprattutto per ciò che concerne la prestazione estiva dell'involucro.
- Per quanto riguarda il fabbisogno per il riscaldamento, la configurazione 4 con esposizione est registra il valore minimo assoluto di 324,92 kW/h con una riduzione del 60% rispetto alla configurazione 1. In questo caso l'applicazione del pannello O1, con i suoi valori di trasmittanza, attenuazione e sfasamento, in combinazione con il pannello S2, dà i risultati migliori poiché, rispetto a Milano, gli apporti solari attraverso le superfici trasparenti sono minori di circa il 18%. Valori piuttosto simili si hanno comunque anche nella configurazione 2 con esposizione ad Est, nella quale il fabbisogno energetico per il riscaldamento è di 338,78 kW/h con una riduzione del 59% rispetto alla configurazione 1. L'applicazione del pannello O1, in combinazione con gli apporti solari derivanti dalla superficie finestrata presente nella parete B, ci consente comunque di ottenere un risultato piuttosto significativo.
- Come per Milano, in tutte e quattro le configurazioni con esposizione ovest, il fabbisogno di energia per il riscaldamento richiesto è sempre superiore rispetto alle esposizioni est, nord e sud. Nonostante i significativi guadagni rispetto alla configurazione 1, la test room con esposizione ovest, registra valori di fabbisogno energetico per il riscaldamento sempre superiori rispetto alle esposizioni est, nord e sud. Questo può essere spiegato dal fatto che nell'esposizione ovest, la chiusura B, dotata di aperture trasparenti, (configurazioni 1 e 2) o semitrasparenti, (configurazioni 3 e 4), è sempre rivolta verso nord, riducendo quindi al minimo gli apporti di energia solare.
- Nella configurazioni 2,3,4 il PCM, contenuto all'interno dei pannelli O1 ed S2, contribuisce ad abbassare il fabbisogno di energia per il riscaldamento poiché durante le ore diurne, di massimo irraggiamento solare, il flusso di aria entrante nella cavità inferiore si surriscalda attivando il cambiamento di stato, da solido a liquido, rilasciando così l'energia immagazzinata sotto-forma di calore. In termini percentuali la riduzione maggiore si ha nella configurazione 4 con esposizione ad ovest, nella quale si registra una riduzione del 63% rispetto alla "1", ma in termini assoluti la richiesta minima di energia si verifica ad est nella configurazione 4.
- Per quanto riguarda il fabbisogno per il raffrescamento, la configurazione 4 con esposizione est registra il valore minimo assoluto di 950,37 kW/h con una riduzione del 55% rispetto alla configurazione 1. Sostanziali riduzioni del fabbisogno di raffrescamento si verificano, allo stesso modo, dove l'esposizione è meno favorevole. Questo sta a significare che i pannelli O1 ed S2 contribuiscono in modo significativo alla riduzione del fabbisogno energetico per il raffrescamento. Nello specifico nella configurazione 4 a nord, ovest e sud, il fabbisogno viene ridotto rispettivamente del 60%, 36%, 58% rispetto alla configurazione 1.
- Nelle configurazioni 2,3,4 il PCM, contenuto all'interno dei pannelli O1 ed S2, contribuisce ad abbassare in modo piuttosto significativo il fabbisogno di energia per il raffrescamento poiché durante le ore notturne, quando si registrano temperature più basse, il flusso d'aria esterno, pompato all'interno dell'intercapedine, innesca il processo di solidificazione del materiale a cambiamento di fase, immagazzinando energia latente di raffrescamento da immettere direttamente nella test room.
- La produzione di energia proveniente dal fotovoltaico integrato sulla facciata del modulo

S2, contribuisce a ridurre il fabbisogno per il raffrescamento ed il riscaldamento nelle configurazioni 3 e 4. L'inclinazione a 90° dei moduli fotovoltaici (verticali), influisce chiaramente sulla produzione di energia elettrica. Se nell'esposizione est, (pannello S2 rivolto a sud), l'inclinazione dei moduli non è quella ideale, nell'esposizione nord (pannello S2 rivolto ad est) e sud (pannello S2 rivolto ad ovest), la radiazione solare più bassa delle ore mattutine e di quelle serali, garantisce una produzione di energia comunque vantaggiosa con valori simili tra le tre esposizioni. Nello specifico:

- 1627,00 KW/h esposizione Est,
- 1914,90 KW/h esposizione nord,
- 1098,60 KW/h esposizione ovest
- 1964,20 KW/h esposizione sud.

Come era prevedibile, la produzione di energia con esposizione ovest (pannello S2 rivolto a nord) da valori sensibilmente inferiori rispetto alle altre tre esposizioni.

- Facendo un bilancio complessivo tra il fabbisogno energetico per il riscaldamento ed il raffrescamento, come per Milano, anche per Ascoli Piceno, nella configurazione 4 con esposizione est, la quantità di energia primaria globalmente richiesta, per assicurare un'adeguata climatizzazione estiva ed invernale, è quella con il valore più basso (341,35 KW/h), registrando una riduzione del 56% rispetto alla configurazione 1. In generale nella configurazione 4 si registrano i valori più bassi di fabbisogno di energia primaria, dimostrando come la combinazione del pannello O1 e S2 contribuisca significativamente alla riduzione dei consumi energetici e alla riduzione delle emissioni di CO₂ e confermando i risultati relativi alle simulazioni di Milano. In termini percentuali nella altre esposizioni si rilevano una riduzione dei consumi energetici a nord del 59%, ad ovest del 41% e a sud del 58%.

CONFIGURAZIONE 1

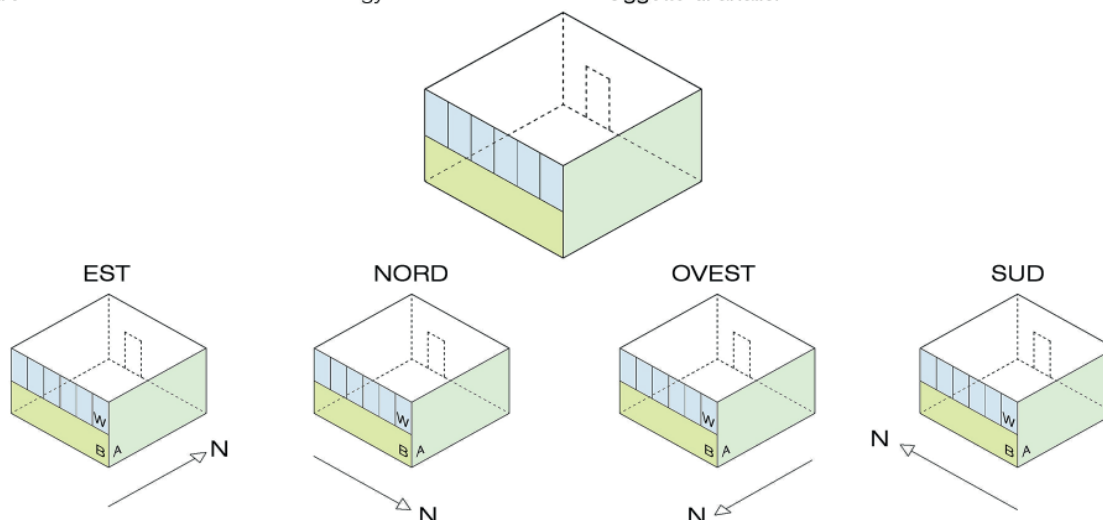
La configurazione è stata condotta per i 4 orientamenti nella località di Agrigento

LOCALIZZAZIONE

Latitudine	42,85	Zona climatica	D
Longitudine	13,56	Gradi giorno	1698
Altitudine	154 m s.l.m.		

SIMULAZIONI

Software	EnergyPlus	Oggetto di analisi	Test Room virtuale
----------	------------	--------------------	--------------------



INFORMAZIONI DIMENSIONALI DELLA TEST ROOM

Larghezza	Lunghezza	Altezza	Superficie	Volume
6,00 m	6,00 m	3,60 m	36,00 m ²	129,60 m ³
APERTURE DELLA TEST ROOM				
Collocazione	Lunghezza	Altezza	Superficie	%
Chiusura Verticale "B"				
Superficie finestrata "W"	6,00 m	1,80 m	10,80 m ²	50%
Chiusura Verticale "D"				
Porta in legno	1,00 m	2,10 m	2,10 m ²	10%
VENTILAZIONE				
Ricambi d'aria per ventilazione naturale		0,5 1/h		
Sistema di ventilazione meccanica		assente		
FONTI RINNOVABILI				
Fotovoltaico integrato in facciata		assente		

SISTEMA DI RISCALDAMENTO ATTIVO

Combustibile	Energia Elettrica
Tem. Off	20°
Periodo di accensione	01 Dicembre - 31 Marzo
Parametri di riscaldamento	Ufficio
Schedules	9:00-19:00
	Dal lunedì al venerdì escluso i festivi

CARATTERISTICHE DELL'INVOLUCRO

		da esterno verso interno	W/m ² K	
Chiusura verticale	A	ESTERNO	Intonaco 2cm, blocchi di laterizio 20cm, isolante in lana di vetro 10cm, laterizio forato 8cm, intonaco 2cm.	0,26
	B	ESTERNO	Intonaco 2cm, blocchi di laterizio 20cm, isolante in lana di vetro 10cm, laterizio forato 8cm, intonaco 2cm.	0,26
	C	INTERNO	Cartongesso in lastre 1,25cm, isolante in lana di vetro 7,5cm, cartongesso in lastre 1,25cm.	0,36
	D	INTERNO	Cartongesso in lastre 1,25cm, pannello in lana di vetro 7,5cm, cartongesso in lastre 1,25cm.	0,36
Chiusura orizzontale	E	TERRA	Tessuto non tessuto 0,5cm, isolante in lana di vetro 12cm, freno a vapore 0,16cm, soletta in cls armato 20cm, sottofondo in malta di cemento 3cm, massetto il cls ordinario 6cm, pavimentazione in gress 2cm.	0,23
	F	ESTERNO	Pavimentazione in Klinker 3cm, membrana impermeabilizzante 0,4cm, massetto il cls ordinario 6cm, isolante in lana di vetro 12cm, freno a vapore 0,16cm, solaio in laterocemento 26cm, intonaco 2cm.	0,22
Superficie finestrata	W	ESTERNO	Infisso alluminio taglio termico, doppio vetro con rivestimento basso emissivo ed argon (4-16-4)	1,35

CONFIGURAZIONE 1

FABBISOGNO ENERGETICO PER IL RISCALDAMENTO ED IL RAFFRESCAMENTO

	Est	Nord	Ovest	Sud
Q_{heat} [KW/h]	144,678	327,616	568,28	290,24
Q_{cool} [KW/h]	3336,92	3820,56	2008,31	3849,05

FABBISOGNO ENERGIA PRIMARIA

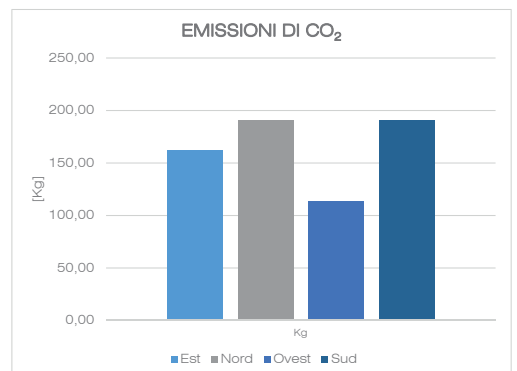
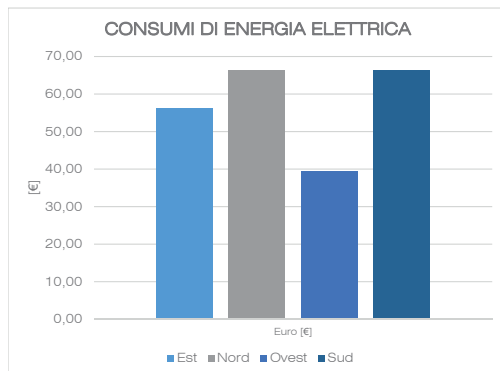
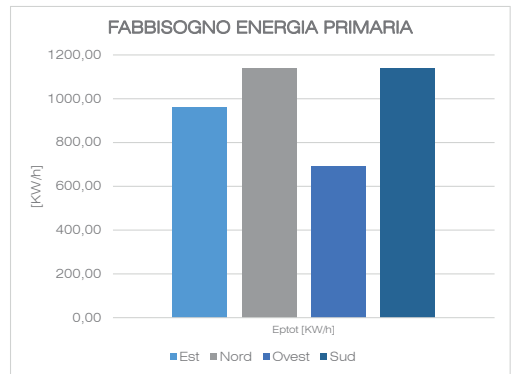
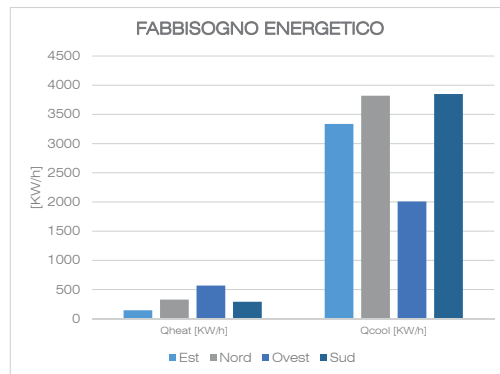
	Est	Nord	Ovest	Sud
E_{ptot} [KW/h]	961,37	1139,27	693,17	1138,29

CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA

	Est	Nord	Ovest	Sud
Euro [€]	56,34	66,36	39,41	66,40

EMISSIONI DI CO₂

	Est	Nord	Ovest	Sud
Kg	162,40	191,34	113,78	191,44

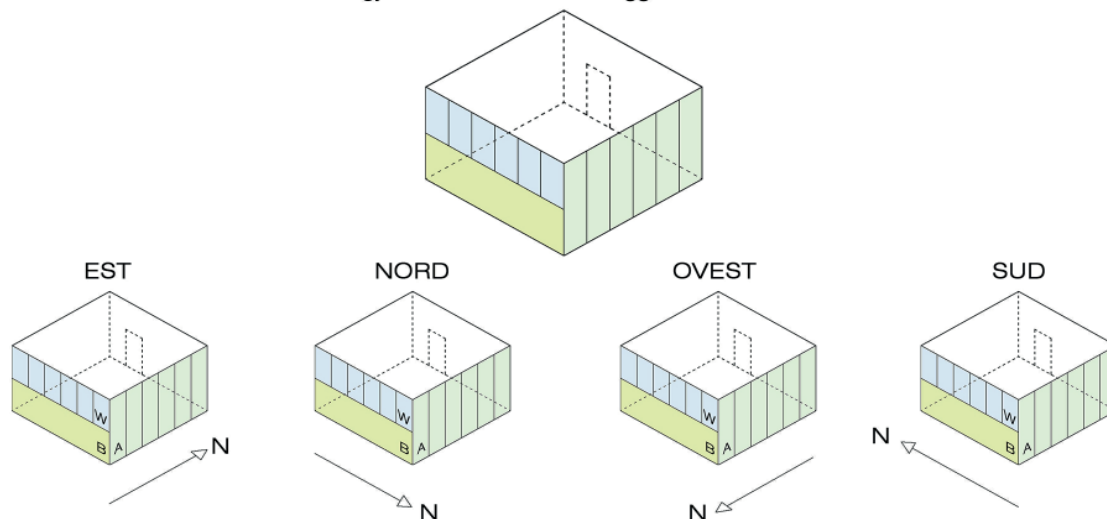


CONFIGURAZIONE 2

La configurazione è stata condotta per i 4 orientamenti nella località di Agrigento

LOCALIZZAZIONE			
Latitudine	42,85	Zona climatica	D
Longitudine	13,56	Gradi giorno	1698
Altitudine	154 m s.l.m.		

SIMULAZIONI			
Software	EnergyPlus	Oggetto di analisi	Test Room virtuale



INFORMAZIONI DIMENSIONALI DELLA TEST ROOM				
Larghezza	Lunghezza	Altezza	Superficie	Volume
6,00 m	6,00 m	3,60 m	36,00 m ²	129,60 m ³

APERTURE DELLA TEST ROOM				
Collocazione	Lunghezza	Altezza	Superficie	%
Chiusura Verticale "B"				
Superficie finestrata "W"	6,00 m	1,80 m	10,80 m ²	50%
Chiusura Verticale "D"				
Porta in legno	1,00 m	2,10 m	2,10 m ²	10%

VENTILAZIONE	
Ricambi d'aria per ventilazione naturale	0,5 1/h
Sistema di ventilazione meccanica	assente

FONTI RINNOVABILI	
Fotovoltaico integrato in facciata	assente

SISTEMA DI RISCALDAMENTO ATTIVO		
Combustibile	Energia Elettrica	
Parametri di riscaldamento	Tem. Off	20°
	Periodo di accensione	01 Dicembre - 31 Marzo
	Schedules	Ufficio 9:00-19:00 Dal lunedì al venerdì escluso i festivi

CARATTERISTICHE DELL'INVOLUCRO				
		da esterno verso interno	W/m ² K	
Chiusura verticale	A	ESTERNO	Pannello O1: pannello alluminio Honeycomb 1 cm, camera d'aria ventilata 7cm, vetro 0,4cm, Pcm 3,5 cm vetro 0,4 cm, VIP 2,5cm	0,058
	B	ESTERNO	Intonaco 2cm, blocchi di laterizio 20cm, isolante in lana di vetro 10cm, laterizio forato 8cm, intonaco 2cm.	0,26
	C	INTERNO	Cartongesso in lastre 1,25cm, isolante in lana di vetro 7,5cm, cartongesso in lastre 1,25cm.	0,36
	D	INTERNO	Cartongesso in lastre 1,25cm, pannello in lana di vetro 7,5cm, cartongesso in lastre 1,25cm.	0,36
Chiusura orizzontale	E	TERRA	Tessuto non tessuto 0,5cm, isolante in lana di vetro 12cm, freno a vapore 0,16cm, soletta in cls armato 20cm, sottofondo in malta di cemento 3cm, massetto il cls ordinario 6cm, pavimentazione in gress 2cm.	0,23
	F	ESTERNO	Pavimentazione in Klinker 3cm, membrana impermeabilizzante 0,4cm, massetto il cls ordinario 6cm, isolante in lana di vetro 12cm, freno a vapore 0,16cm, solaio in laterocemento 26cm, intonaco 2cm.	0,22
Superficie finestrata	W	ESTERNO	Infisso alluminio taglio termico, doppio vetro con rivestimento basso emissivo ed argon (4-16-4)	1,35

CONFIGURAZIONE 2

FABBISOGNO ENERGETICO PER IL RISCALDAMENTO ED IL RAFFRESCAMENTO

	Est	Nord	Ovest	Sud
Q_{heat} [KW/h]	0,00	0,00	24,40	0,00
Q_{cool} [KW/h]	2437,99	2773,74	1766,07	2780,66

FABBISOGNO ENERGIA PRIMARIA

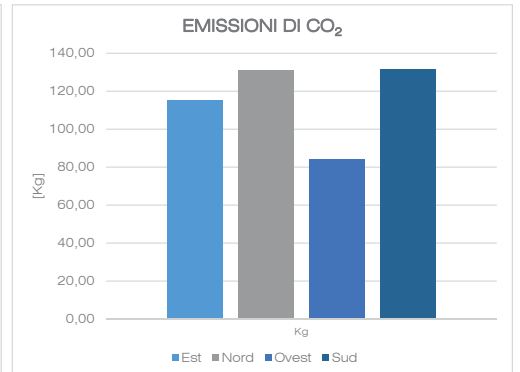
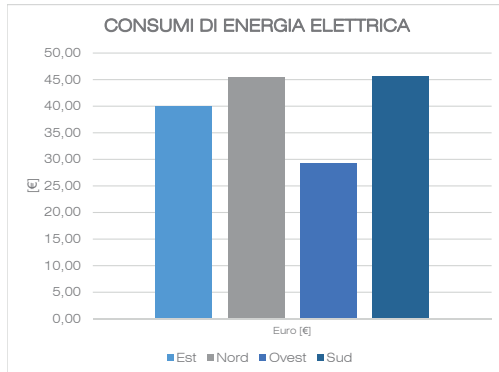
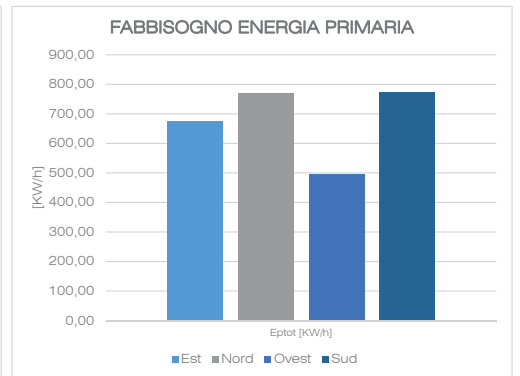
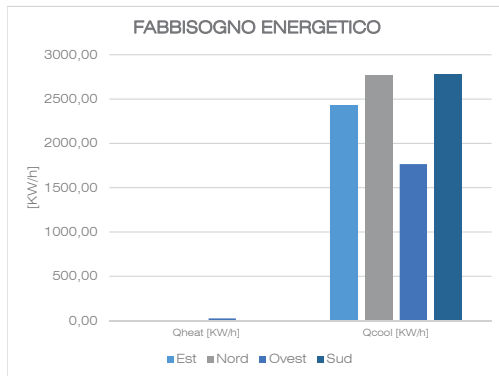
	Est	Nord	Ovest	Sud
E_{ptot} [KW/h]	677,22	770,48	496,38	772,41

CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA

	Est	Nord	Ovest	Sud
Euro [€]	39,96	45,46	29,22	45,57

EMISSIONI DI CO₂

	Est	Nord	Ovest	Sud
Kg	115,13	130,98	84,21	131,31



CONFIGURAZIONE 3

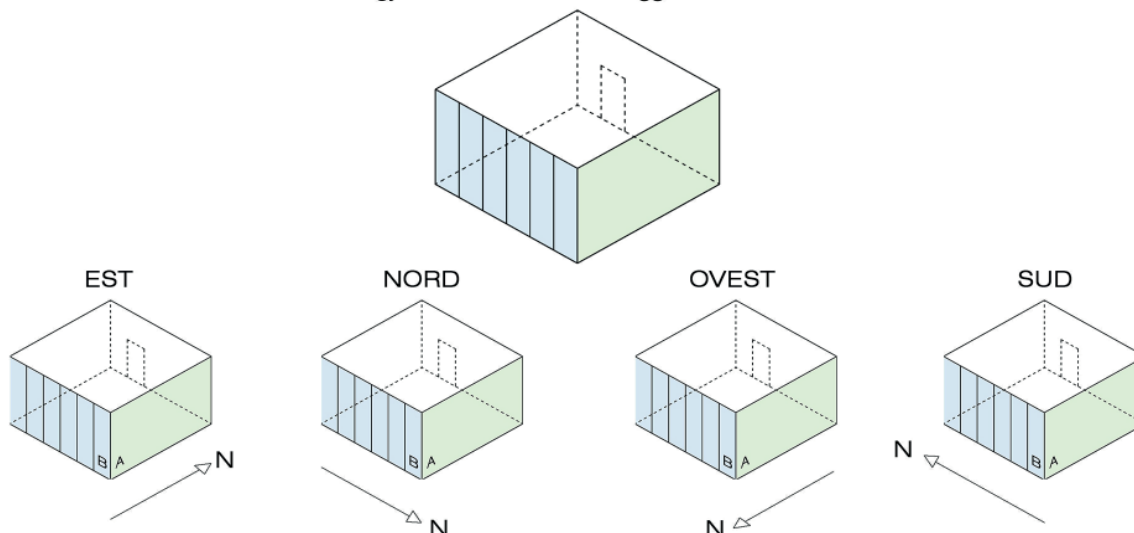
La configurazione è stata condotta per i 4 orientamenti nella località di Agrigento

LOCALIZZAZIONE

Latitudine	42,85	Zona climatica	D
Longitudine	13,56	Gradi giorno	1698
Altitudine	154 m s.l.m.		

SIMULAZIONI

Software	EnergyPlus	Oggetto di analisi	Test Room virtuale
----------	------------	--------------------	--------------------



INFORMAZIONI DIMENSIONALI DELLA TEST ROOM

Larghezza	Lunghezza	Altezza	Superficie	Volume
6,00 m	6,00 m	3,60 m	36,00 m ²	129,60 m ³

APERTURE DELLA TEST ROOM

Collocazione	Lunghezza	Altezza	Superficie	%
Chiusura Verticale "B"				
Superficie finestrata "W"	6,00 m	1,80 m	10,80 m ²	50%
Chiusura Verticale "D"				
Porta in legno	1,00 m	2,10 m	2,10 m ²	10%

VENTILAZIONE

Ricambi d'aria per ventilazione naturale	0,5 1/h
Sistema di ventilazione meccanica	Presente - Ibrido

FONTI RINNOVABILI

Fotovoltaico integrato in facciata	Presente
Potenza di picco	3240 W

SISTEMA DI RISCALDAMENTO ATTIVO

Combustibile	Energia Elettrica
Tem. Off	20°
Periodo di accensione	01 Dicembre - 31 Marzo
Parametri di riscaldamento	Ufficio
Schedules	9:00-19:00
	Dal lunedì al venerdì escluso i festivi

CARATTERISTICHE DELL'INVOLUCRO

		da esterno verso interno	W/m ² K	
Chiusura verticale	A	ESTERNO	Intonaco 2cm, blocchi di laterizio 20cm, isolante in lana di vetro 10cm, laterizio forato 8cm, intonaco 2cm.	0,26
	B	ESTERNO	Pannello S2: Fotovoltaico traslucido integrato 1cm, camera d'aria ventilata 7cm, vetro 0,4cm, Pcm 3cm, vetro 0,4cm, Aerogel 2,5cm, Vetro 0,4cm.	0,34
	C	INTERNO	Cartongesso in lastre 1,25cm, isolante in lana di vetro 7,5cm, cartongesso in lastre 1,25cm.	0,36
	D	INTERNO	Cartongesso in lastre 1,25cm, pannello in lana di vetro 7,5cm, cartongesso in lastre 1,25cm.	0,36
Chiusura orizzontale	E	TERRA	Tessuto non tessuto 0,5cm, isolante in lana di vetro 12cm, freno a vapore 0,16cm, soletta in cls armato 20cm, sottofondo in malta di cemento 3cm, massetto il cls ordinario 6cm, pavimentazione in gress 2cm.	0,23
	F	ESTERNO	Pavimentazione in Klinker 3cm, membrana impermeabilizzante 0,4cm, massetto il cls ordinario 6cm, isolante in lana di vetro 12cm, freno a vapore 0,16cm, solaio in laterocemento 26cm, intonaco 2cm.	0,22
Superficie finestrata	W	-	-	-

CONFIGURAZIONE 3

FABBISOGNO ENERGETICO PER IL RISCALDAMENTO ED IL RAFFRESCAMENTO

	Est	Nord	Ovest	Sud
Q_{heat} [KW/h]	0,00	0,00	0,00	0,00
Q_{cool} [KW/h]	1754,88	2120,11	2007,89	2277,89

FABBISOGNO ENERGIA PRIMARIA

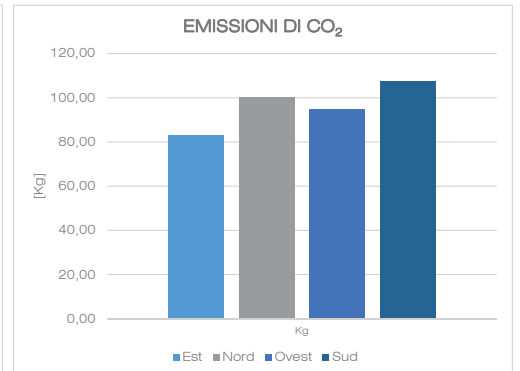
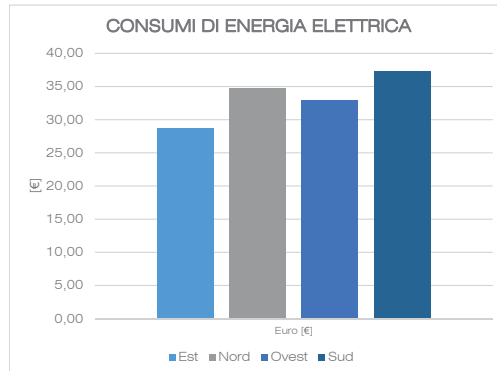
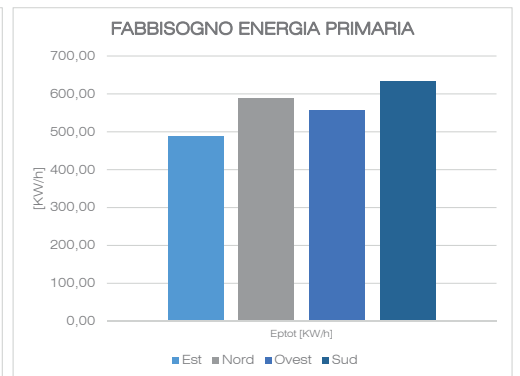
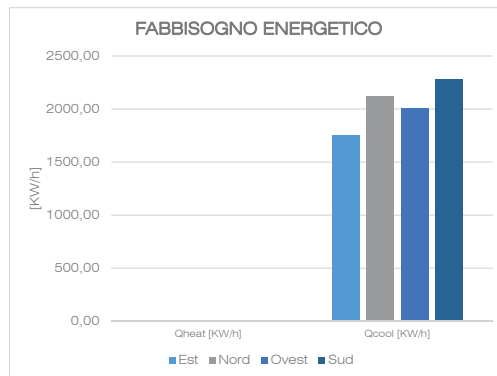
	Est	Nord	Ovest	Sud
E_{plot} [KW/h]	487,47	588,92	557,75	632,75

CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA

	Est	Nord	Ovest	Sud
Euro [€]	28,76	34,75	32,91	37,33

EMISSIONI DI CO₂

	Est	Nord	Ovest	Sud
Kg	82,87	100,12	94,82	107,57



CONFIGURAZIONE 4

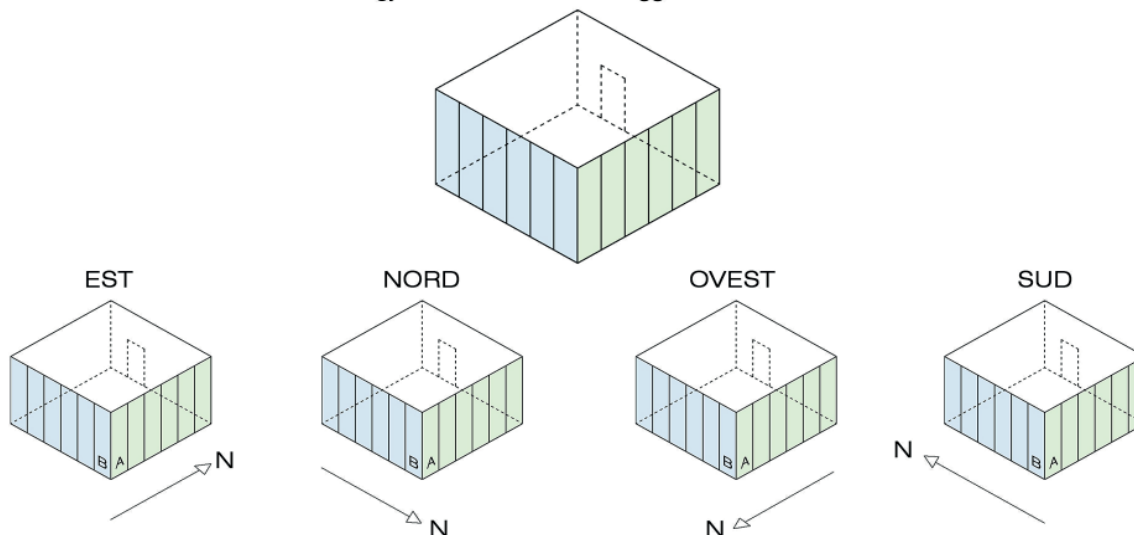
La configurazione è stata condotta per i 4 orientamenti nella località di Agrigento

LOCALIZZAZIONE

Latitudine	42,85	Zona climatica	D
Longitudine	13,56	Gradi giorno	1698
Altitudine	154 m s.l.m.		

SIMULAZIONI

Software	EnergyPlus	Oggetto di analisi	Test Room virtuale
----------	------------	--------------------	--------------------



INFORMAZIONI DIMENSIONALI DELLA TEST ROOM

Larghezza	Lunghezza	Altezza	Superficie	Volume
6,00 m	6,00 m	3,60 m	36,00 m ²	129,60 m ³

APERTURE DELLA TEST ROOM

Collocazione	Lunghezza	Altezza	Superficie	%
Chiusura Verticale "B" Superficie finestrata "W"	6,00 m	1,80 m	10,80 m ²	50%
Chiusura Verticale "D" Porta in legno	1,00 m	2,10 m	2,10 m ²	10%

VENTILAZIONE

Ricambi d'aria per ventilazione naturale	0,5 1/h
Sistema di ventilazione meccanica	Presente - Ibrido

FONTI RINNOVABILI

Fotovoltaico integrato in facciata	Presente
Potenza di picco	3240 W

SISTEMA DI RISCALDAMENTO ATTIVO

Combustibile	Energia Elettrica
Tem. Off	20°
Periodo di accensione	01 Dicembre - 31 Marzo
Parametri di riscaldamento	Ufficio 9:00-19:00 Dal lunedì al venerdì escluso i festivi
Schedules	

CARATTERISTICHE DELL'INVOLUCRO

		da esterno verso interno	W/m ² K	
Chiusura verticale	A	ESTERNO	Pannello O1: pannello alluminio Honeycomb 1 cm, camera d'aria ventilata 7cm, vetro 0,4cm, Pcm 3,5 cm vetro 0,4 cm, VIP 2,5cm	0,058
	B	ESTERNO	Pannello S2: Fotovoltaico traslucido integrato 1cm, camera d'aria ventilata 7cm, vetro 0,4cm, Pcm 3cm, vetro 0,4cm, Aerogel 2,5cm, Vetro 0,4cm.	0,34
	C	INTERNO	Cartongesso in lastre 1,25cm, isolante in lana di vetro 7,5cm, cartongesso in lastre 1,25cm.	0,36
	D	INTERNO	Cartongesso in lastre 1,25cm, pannello in lana di vetro 7,5cm, cartongesso in lastre 1,25cm.	0,36
Chiusura orizzontale	E	TERRA	Tessuto non tessuto 0,5cm, isolante in lana di vetro 12cm, freno a vapore 0,16cm, soletta in cls armato 20cm, sottofondo in malta di cemento 3cm, massetto il cls ordinario 6cm, pavimentazione in gress 2cm.	0,23
	F	ESTERNO	Pavimentazione in Klinker 3cm, membrana impermeabilizzante 0,4cm, massetto il cls ordinario 6cm, isolante in lana di vetro 12cm, freno a vapore 0,16cm, solaio in laterocemento 26cm, intonaco 2cm.	0,22
Superficie finestrata	W	-	-	-

CONFIGURAZIONE 4

FABBISOGNO ENERGETICO PER IL RISCALDAMENTO ED IL RAFFRESCAMENTO

	Est	Nord	Ovest	Sud
Q_{heat} [KW/h]	0,00	0,00	0,00	0,00
Q_{cool} [KW/h]	1294,78	1565,48	1461,14	1686,04

FABBISOGNO ENERGIA PRIMARIA

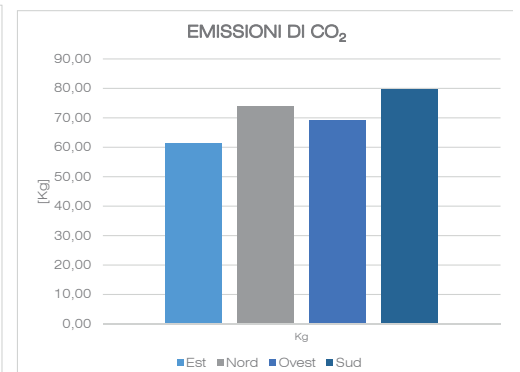
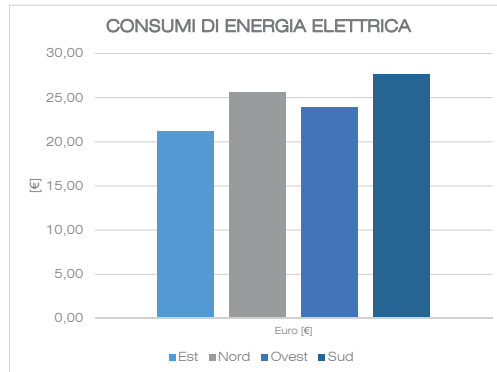
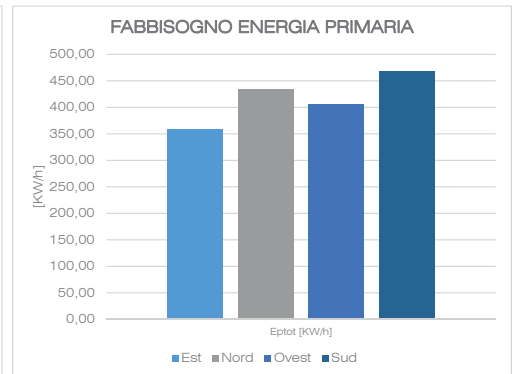
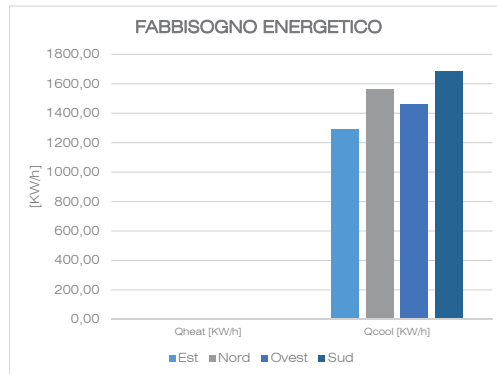
	Est	Nord	Ovest	Sud
E_{ptot} [KW/h]	359,66	434,86	405,87	468,34

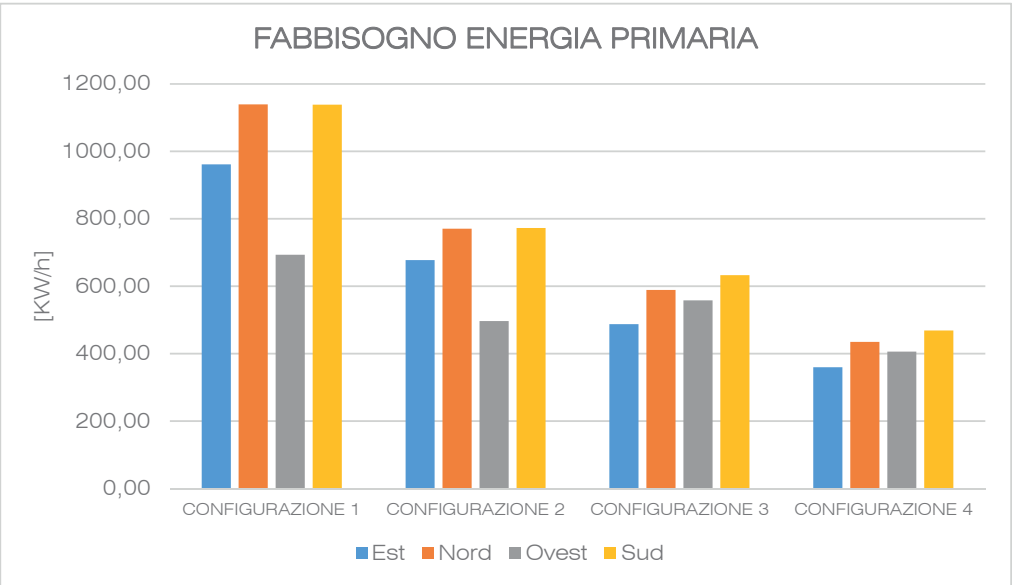
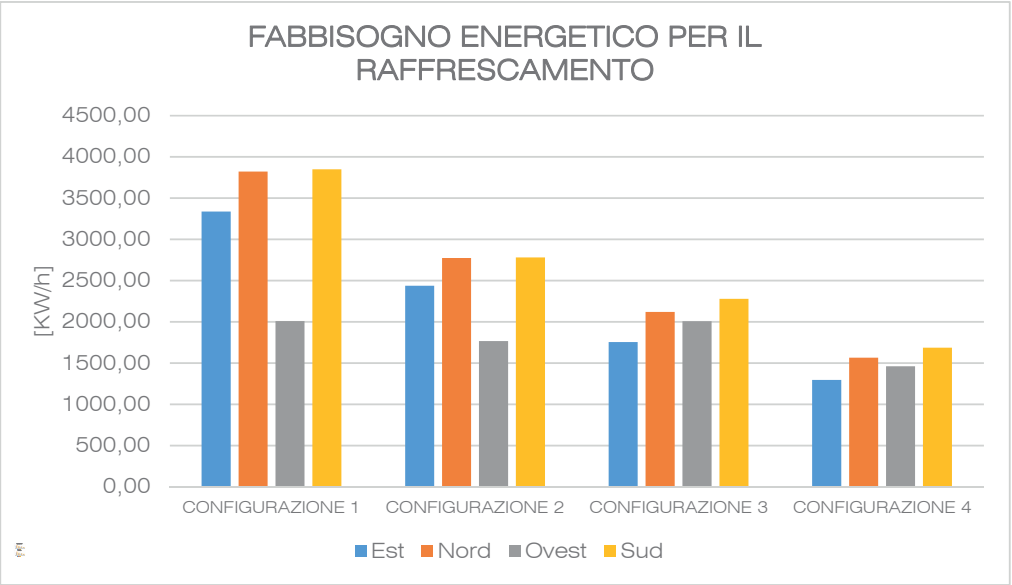
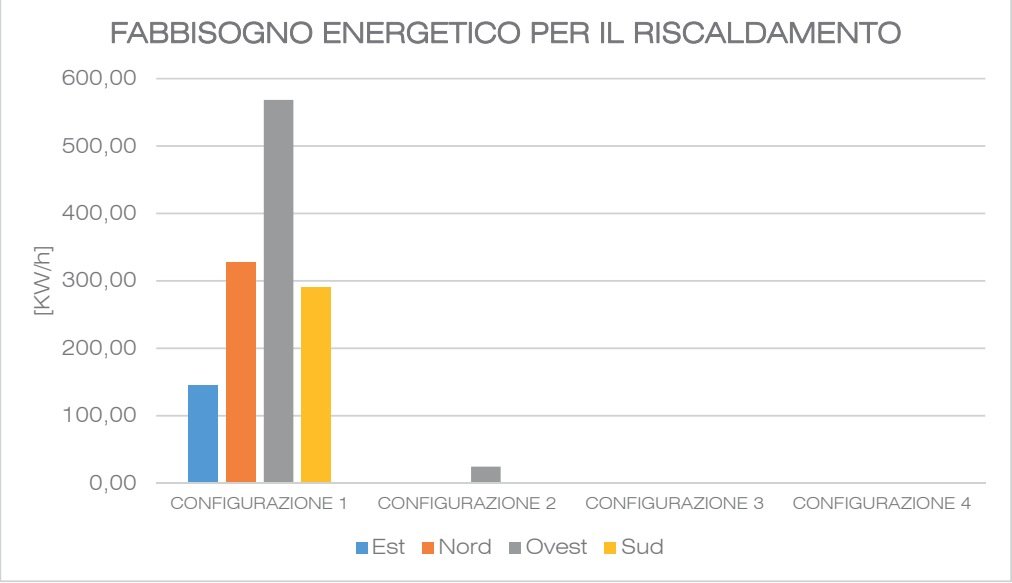
CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA

	Est	Nord	Ovest	Sud
Euro [€]	21,22	25,66	23,95	27,63

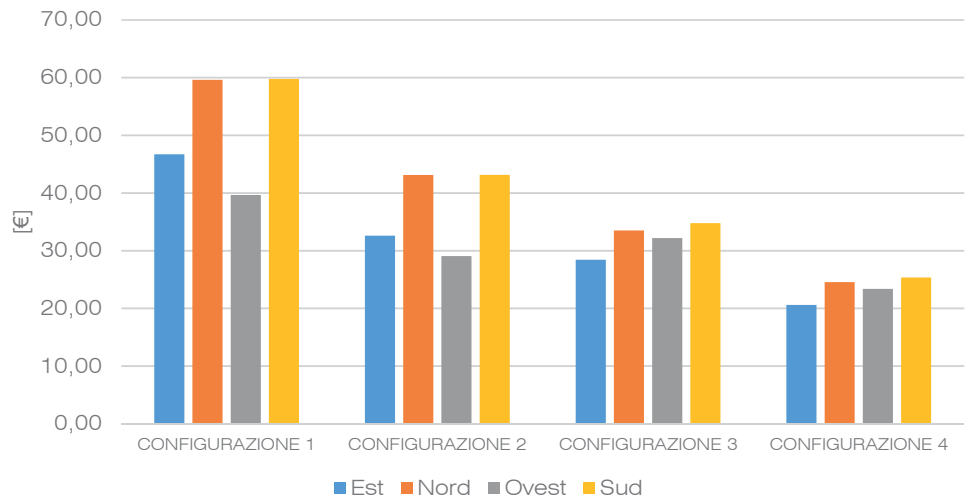
EMISSIONI DI CO₂

	Est	Nord	Ovest	Sud
Kg	61,14	73,93	69,00	79,62

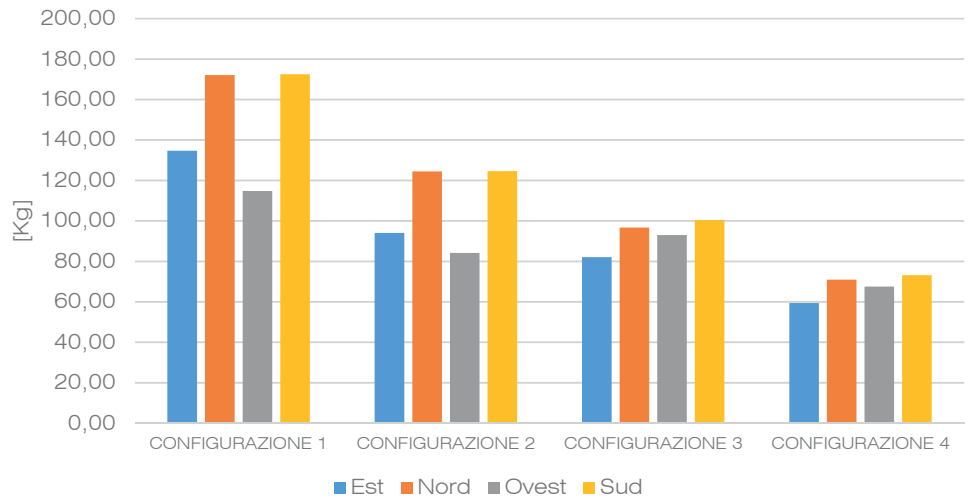




CONSUMI ENERGIA ELETTRICA



EMISSIONI DI CO2



Le simulazioni, condotte sulle quattro configurazioni di involucro verticale scelte, per analizzare le prestazioni del componente di facciata adattivo, nella area geografica di Agrigento, hanno dimostrato che:

- Il fabbisogno energetico della test room per il raffrescamento è nettamente superiore a quello per il riscaldamento, tanto è vero che, fatta eccezione per tutte le esposizioni delle configurazioni 1 e per l'esposizione ovest della configurazione 2, la richiesta di energia per il riscaldamento è nulla.
- La configurazione della testroom e le stratigrafie adottate, accentuano ulteriormente la richiesta di energia per il raffrescamento. La scelta della località climatica di Agrigento è necessaria per testare il presente prodotto di ricerca e valutarne i possibili contributi che esso è in grado di fornire in condizioni di svantaggio soprattutto per quanto concerne la prestazione estiva dell'involucro.
- Per quanto riguarda il fabbisogno per il riscaldamento, la configurazione 1 è l'unica a evidenziare valori significativi. L'esposizione est registra il valore minimo di 144,68 kW/h, mentre l'esposizione ovest indica il valore massimo di 568,28 kW/h. Nelle configurazioni 2, 3, e 4 l'applicazione dei pannelli O1 ed S2, singolarmente o in combinazione tra loro, annullano di fatto ogni richiesta di fabbisogno energetico per il riscaldamento.
- Nella configurazione 2 con esposizione Ovest, vi è una lieve richiesta di fabbisogno energetico per il riscaldamento pari a 24,40 kW/h, relativi ai mesi di dicembre e gennaio. L'applicazione del pannello O1, in combinazione con gli apporti solari derivanti dalla superficie finestrata presente nella parete B, ci consente di ottenere un risultato decisamente significativo.
- Per quanto riguarda il fabbisogno per il raffrescamento, la configurazione 4 con esposizione est registra il valore minimo assoluto di 1294,78 kW/h con una riduzione del 61% rispetto alla configurazione 1. Sostanziali riduzioni del fabbisogno di raffrescamento si verificano, allo stesso modo, dove l'esposizione è meno favorevole. Questo sta a significare che i pannelli O1 ed S2 contribuiscono in modo significativo alla riduzione del fabbisogno energetico per il raffrescamento. Nello specifico nella configurazione 4 a nord, ovest e sud, il fabbisogno viene ridotto rispettivamente del 59%, 27%, 56% rispetto alla configurazione 1.
- Nelle configurazioni 2,3,4 il PCM, contenuto all'interno dei pannelli O1 ed S2, contribuisce ad abbassare in modo piuttosto significativo il fabbisogno di energia per il raffrescamento poiché durante le ore notturne, quando si registrano temperature più basse, il flusso d'aria esterno, pompato all'interno dell'intercapedine, innesca il processo di solidificazione del materiale a cambiamento di fase, immagazzinando energia latente di raffrescamento da immettere direttamente nella test room.
- La produzione di energia proveniente dal fotovoltaico integrato sulla facciata del modulo S2, contribuisce a ridurre il fabbisogno per il raffrescamento ed il riscaldamento nelle configurazioni 3 e 4. L'inclinazione a 90° dei moduli fotovoltaici (verticali), influisce chiaramente sulla produzione di energia elettrica. Se nell'esposizione est, (pannello S2 rivolto a sud), l'inclinazione dei moduli non è quella ideale, nell'esposizione nord (pannello S2 rivolto ad est) e sud (pannello S2 rivolto ad ovest), la radiazione solare più bassa delle ore mattutine e di quelle serali, garantisce una produzione di energia comunque vantaggiosa con valori simili tra le tre esposizioni. Nello specifico:
 - 2201,20 KW/h esposizione Est,
 - 1968,60 KW/h esposizione nord,
 - 1204,90 KW/h esposizione ovest
 - 2048,40 KW/h esposizione sud.

Come era prevedibile, la produzione di energia con esposizione ovest (pannello S2 rivolto a nord) da valori sensibilmente inferiori rispetto alle altre tre esposizioni.

- Facendo un bilancio complessivo tra il fabbisogno energetico per il riscaldamento ed il raffrescamento, come per Milano e Ascoli Piceno, anche Agrigento, nella configurazione 4 con esposizione est, la quantità di energia primaria globalmente richiesta, per assicurare un'adeguata climatizzazione estiva ed invernale, è quella con il valore più basso (359,66 KW/h), registrando una riduzione del 63% rispetto alla

configurazione 1. In generale nella configurazione 4 si registrano i valori più bassi di fabbisogno di energia primaria, dimostrando come la combinazione del pannello O1 e S2 contribuisca significativamente alla riduzione dei consumi energetici e alla riduzione delle emissioni di CO₂ e confermando i risultati relativi alle simulazioni di Milano e Ascoli Piceno. In termini percentuali nelle altre esposizioni si rilevano una riduzione dei consumi energetici a nord del 61%, ad ovest del 39% e a sud del 58%.

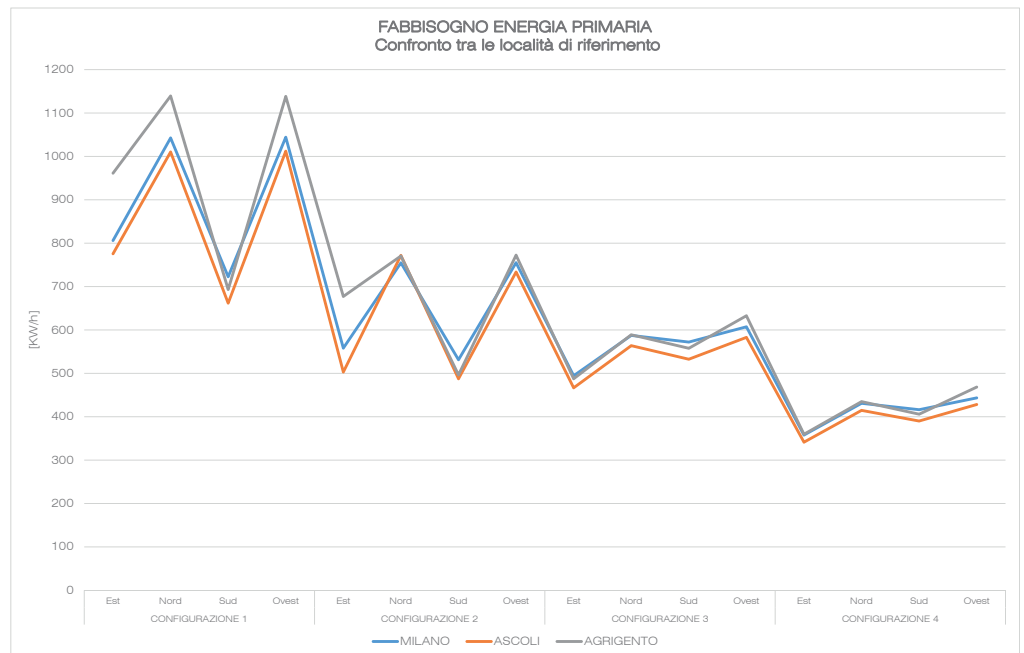


Figura 6. Grafico riepilogativo del fabbisogno di energia primaria: confronto tra le località di Milano Ascoli P. e Agrigento.

Andando ad analizzare le prestazioni della test room, confrontando i valori delle quattro configurazioni e nelle tre località scelte, possiamo concludere che:

- L'esposizione est, ovvero quella con la chiusura A (opaca) rivolta verso est, e la chiusura B (trasparente/semitrasparente) rivolta verso sud, garantisce i migliori risultati per ciò che concerne la prestazione invernale, infatti a prescindere dalle stratigrafie dell'involucro. La presenza di una partizione vetrata, tradizionale (configurazione 1 e 2) o dei pannelli semitrasparenti S2 (configurazione 3 e 4) contribuiscono a ridurre le dispersioni verso l'esterno grazie agli apporti solari passivi. Queste considerazioni sono valide per le località di Milano ed Ascoli Piceno, ma meno per Agrigento, poiché qui, le ottime prestazioni dei pannelli O1 e S2, in combinazione con gli apporti solari superiori rispetto alle altre due città di riferimento, rendono nullo il fabbisogno energetico per il riscaldamento, ma allo stesso tempo ci permettono di valutare il comportamento estivo dei pannelli in una località con una estrema richiesta di fabbisogno per il raffrescamento.
- Sempre in riferimento agli apporti solari che riducono il fabbisogno energetico per il riscaldamento, si può notare come la configurazione 2 con esposizione est, che prevede la presenza del pannello O1 nella chiusura A e una finestra tradizionale nella chiusura B, abbia valori simili alla configurazione 4 di Ascoli Piceno, e addirittura migliori della configurazione 4 di Milano. Questo può essere spiegato con il fatto che il pannello S2, semitrasparente, riduce gli apporti solari diretti, vantaggiosi per migliorare la prestazione invernale dell'involucro.
- Le simulazioni non tengono comunque conto dei benefici, in termini di prestazione termo-igrometrica, che si potrebbero avere, nei mesi invernali, in seguito all'aumento della temperatura dell'aria nell'intercapedine, prodotto dalla presenza del modulo

fotovoltaico integrato nel pannello S2. L'aria potrebbe, infatti, essere recuperata e immessa nel sistema, riducendo i carichi termici dei mesi invernali.

- L'esposizione ovest, ovvero quella con la chiusura A (opaca) rivolta verso ovest, e la chiusura B (trasparente/semitrasparente) rivolta verso nord, garantisce, in tutte e quattro le configurazioni, ottimi risultati per ciò che concerne la prestazione estiva. Infatti, la presenza di una partizione vetrata tradizionale (configurazione 1 e 2) o dei pannelli semitrasparenti S2 (configurazione 3 e 4), contribuisce a diminuire il fabbisogno di energia per il raffrescamento, grazie alla ridotta radiazione solare diretta che evita il surriscaldamento degli ambienti interni. Queste considerazioni sono valide per tutte e tre le località di riferimento.
- Si riescono a raggiungere ottime prestazioni per quanto riguarda la riduzione dell'energia primaria necessaria per il raffrescamento anche nelle configurazioni 3 e 4 con esposizione est. In questo caso, il pannello S2 semitrasparente, rivolto a sud, sfrutta la capacità del PCM di immagazzinare energia latente, grazie al flusso di aria fresca esterno che, durante le ore notturne, viene immesso attraverso l'intercapedine raffrescando gli ambienti interni, mentre durante le ore diurne, il fotovoltaico integrato in facciata agisce da schermatura solare, riducendo gli apporti solari diretti. Nelle località di Ascoli Piceno ed Agrigento, le configurazioni 3 e 4 con esposizione est raggiungono, in termini assoluti, risultati migliori della stesse configurazioni rivolte ad ovest.
- In generale per quanto riguarda il fabbisogno di energia primaria (riscaldamento e raffrescamento) per tutte e tre le località (figura 6), la configurazione 4, ovvero quella dove vengono combinati i pannelli O1 e S2, risulta essere la migliore soluzione adottabile sia in termini assoluti che in termini di riduzione percentuale. Seppur l'esposizione est resta quella con i minor consumi di energia elettrica, le esposizioni nord, ovest e sud hanno valori pressoché vicini e in ogni caso migliori delle altre tre configurazioni.

5.3 Conclusioni

Dallo studio preliminare avviato nella prima parte della presente ricerca, è emerso, come sin dall'antichità, il metallo sia stato uno dei materiali più utilizzati dall'uomo per la fabbricazione di utensili e armi da guerra.

L'uso del metallo in architettura risale al II secolo d.C. con la realizzazione della cornice in bronzo intorno all'apertura centrale della cupola del Pantheon. In generale i metalli in architettura, hanno avuto per secoli un ruolo prettamente decorativo negli edifici con importante valore simbolico.

Soltanto con la rivoluzione industriale avvenuta nella seconda metà del XIX secolo, l'ottimizzazione dei processi produttivi e di lavorazione del materiale ha permesso un impiego più diffuso nel campo dell'architettura. In particolar modo, agli inizi del '900, il processo di separazione tra la facciata e la struttura portante degli edifici, segna la definitiva introduzione dei metalli nel mondo dell'architettura moderna, attraverso la prefabbricazione di elementi strutturali e componenti di facciata.

Gli architetti di tutto il mondo hanno condotto ricerche e realizzato edifici sperimentando l'utilizzo di materiali metallici e verificandone le loro potenzialità.

In tal senso, l'architetto francese Jean Prouvé è stato un pioniere sull'utilizzo del metallo in architettura, in particolar modo sull'uso dell'alluminio per la realizzazione di facciate continue, introducendo concetti, tutto 'ora validi, come prefabbricazione, modularità e costruzione a secco, principi che hanno, tutti, ispirato il presente progetto di ricerca.

Per via delle sue caratteristiche di resistenza, stabilità, e leggerezza e grazie alla facilità di lavorazione e di riciclabilità, l'alluminio, nelle sue diverse forme, è il metallo che più si presta per la realizzazione di componenti di facciata sostenibili.

Lo sviluppo sostenibile è un tema determinante per gli equilibri climatici del nostro pianeta e per la salute dell'uomo, che vede l'architettura costruita e costruibile come

uno dei principali attori coinvolti nel processo di riduzione dei consumi energetici globali. Dobbiamo, infatti, considerare che il settore delle costruzioni è responsabile di circa il 35% delle emissioni di gas serra e che i consumi energetici costituiscono circa il 40% dei consumi di energia globali. Per questo motivo, le strategie e le politiche internazionali sono indirizzate verso una riduzione dei consumi energetici con il conseguente abbassamento delle emissioni di CO₂ nell'atmosfera, attraverso la ricerca nuovi modelli e sistemi costruttivi capaci di migliorare le prestazioni degli edifici.

In questo processo di rinnovamento tecnologico, dovuto dalla necessità di affrontare il tema della sostenibilità, si è compiuto un passaggio evolutivo nel quale l'involucro edilizio ha definito nuove relazioni tra indoor e outdoor. Da semplice elemento di frontiera tra spazio abitato e ambiente esterno, l'involucro edilizio si trasforma in un filtro avanzato, capace di adattarsi dinamicamente al variare delle condizioni climatiche esterne, interagendo e regolando autonomamente i flussi termici e assumendo anche un ruolo attivo nella produzione di energia necessaria a soddisfare il fabbisogno degli edifici. L'indagine dei requisiti tecnologici, insieme alle analisi delle caratteristiche prestazionali dei sistemi di facciata, sono stati passaggi imprescindibili, necessari per arrivare alla definizione di un modello di riferimento come base per lo sviluppo del componente di facciata adattivo, oggetto della presente ricerca. La classificazione geometrica delle facciate, l'identificazione delle diverse tipologie funzionali e dei differenti sistemi di fissaggio oltre allo studio dei cosiddetti materiali adattivi, ci ha permesso di estrarre i dati quantitativi ed essenziali per la redazione del progetto di ricerca. Nello specifico, è stato possibile selezionare quali componenti adottare e come combinarli tra loro, anche in relazione alle soluzioni tecnologiche e alle strategie di sviluppo aziendale che la Cantori s.r.l., partner fondamentale in questo progetto di ricerca, propone e intende adottare per promuovere l'efficienza energetica attraverso sistemi di facciate in alluminio.

I sistemi proposti per l'elaborazione del concept di progetto sono:

- Sistema tecnologico di facciata unitario, tipo Box-Window, per garantire una maggiore facilità di installazione, delle buone prestazioni acustiche e limitare la propagazione del fuoco in caso di incendio;
- Sistema di ventilazione ibrida, posta all'interno di un'intercapedine debolmente ventilata, la cui efficienza è garantita dall'altezza del modulo di facciata e dalla profondità dell'intercapedine. Quando il sistema a ventilazione naturale non è più sufficiente interviene in ausilio la ventilazione meccanica.
- Sistema in grado di controllare l'illuminamento dello spazio abitato attraverso l'utilizzo di materiali con diversi gradi di trasparenza.
- Sistema in grado di adattare la propria inerzia termica, in relazione alle condizioni climatiche esterne, attraverso l'uso di materiali innovativi a cambiamento di fase, permettendo inoltre, di mantenere il peso dell'intero modulo contenuto.
- Sistema di produzione di energia elettrica integrato in facciata (BIPV) per sostenere il fabbisogno energetico degli edifici.
- Sistema di automazione che consente al componente di facciata di adattarsi alle condizioni climatiche esterne assumendo configurazioni differenti in maniera indipendente dalle necessità dell'utente.

Queste considerazioni ci hanno permesso di sviluppare un nuovo componente di chiusura verticale, con sottomoduli di differenti funzioni combinabili e facilmente assemblabili tra loro, in grado di garantire una continuità geometrica della facciata. Un componente unitario, prefabbricato e standardizzato con massa frontale inferiore a 150kg/m². Flessibile e configurabile alle diverse necessità estetiche e prestazionali, il prodotto può essere adattato sia agli edifici di nuova costruzione sia a quelli che necessitano di riqualificazione edilizia, prevalentemente ad uso commerciale e terziario, ma installato anche in edifici residenziali.

Il componente di facciata proposto è costituito da moduli combinabili che possono essere suddivisi in tre macro-categorie:

- Moduli trasparenti in grado di filtrare selettivamente la radiazione solare, attraverso l'utilizzo di vetri intelligenti elettrocromici;

- Moduli semitrasparenti che permettono il passaggio di una luce diffusa, garantiscono ottimi livelli di isolamento e accumulo termico e, se necessario, consentono l'integrazione di sistemi per la produzione di energia elettrica.
- Moduli opachi che garantiscono eccellenti livelli di isolamento e accumulo termico, e, se necessario, consentono l'integrazione di sistemi per la produzione di energia elettrica.

Nella fase ideativa della tesi, riprendendo le considerazioni derivanti dall'analisi sui casi di studio e sui relativi materiali utilizzati, si è deciso di inserire i diversi strati funzionali all'interno di un unico telaio strutturale in alluminio estruso, per uno spessore massimo inferiore a 150 mm.

Per le tre diverse macro-categorie, trasparente, semitrasparente ed opaco, il sistema involucro è stato schematizzato in tre fasce funzionali, con spessori definiti in base alla normativa di riferimento e ai materiali presenti in commercio:

- Strato di finitura esterno, sp 10 mm;
- Camera d'aria debolmente ventilata, sp. 70 mm;
- Strato prestazionale interno, sp. 68 mm;

Il telaio costituito da un profilo in alluminio estruso della dimensione di 70 x 140 mm, con una resistenza al carico che consente un'altezza massima del modulo di 4500 mm, garantisce la possibilità di combinare strati funzionali di moduli differenti (trasparente, semitrasparente e opaco), attraverso un unico elemento di sostegno modulare e impilabile. Lo studio delle caratteristiche prestazionali, relativo alla definizione degli elementi che costituiscono le tre fasce funzionali, permette al componente di essere adattato facilmente, con piccoli accorgimenti, in relazione agli obiettivi da raggiungere in differenti contesti climatici, ottenendo ottime prestazioni in termini di:

- **TRASMITTANZA TERMICA**
 - o modulo opaco O1: 0,058 W/m²K
 - o modulo opaco O2: 0,061 W/m²K
 - o modulo semitrasparente S1: 0,347 W/m²K
 - o modulo semitrasparente S2: 0,345 W/m²K
 - o modulo trasparente T1: 0,446 W/m²K
- **ISOLAMENTO ACUSTICO.** L'intero sistema garantisce un indice di isolamento acustico della facciata superiore a 50 db:
 - o modulo opaco O1: $R_w = 55,3$ dB
 - o modulo opaco O2: $R_w = 57,5$ dB
 - o modulo semitrasparente S1: $R_w = 55,5$ dB
 - o modulo semitrasparente S2: $R_w = 57,7$ dB
 - o modulo trasparente T1: $R_w = 59,6$ dB
- **RESISTENZA MECCANICA.** Capacità di resistere alle sollecitazioni dei carichi accidentali e dinamici e buona resistenza alla propagazione del fuoco.
- **PERMEABILITA' ALL'ARIA E AL VAPORE.** Le soluzioni adottate per l'abbattimento dei ponti termici evitano la formazione di condense e muffe garantendo un'ottima tenuta all'aria.
- **MANUTENTIBILITA'.** La modularità del componente e la facilità di installazione consentono di poter intervenire agevolmente in caso di guasti, senza precludere l'efficienza dell'intero involucro.

La fase conclusiva della ricerca è stata quella di validare il prototipo attraverso l'analisi energetica effettuata con il software EnergyPlus su quattro configurazioni di involucro, in tre località climatiche diverse: Milano, Ascoli Piceno e Agrigento.

Le simulazioni relative alle prestazioni energetiche hanno permesso di valutare le caratteristiche del componente di facciata adattivo e la sua capacità di contribuire alla riduzione del fabbisogno energetico per il riscaldamento ed il raffrescamento, ipotizzando, come modello di calcolo, una test room virtuale. Da queste valutazioni è emerso che:

Nei mesi invernali, il fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento dell'involucro adattivo, nel quale le pareti disperdenti sono composte dai pannelli O1 e/o S2, (configurazioni 2,3,4) è sempre minore se paragonato ad un involucro in muratura di tipo tradizionale (configurazione 1). Nelle località di Milano ed Ascoli Piceno, le riduzioni

del fabbisogno energetico invernale arrivano fino al 60%, mentre per Agrigento, il sovradimensionamento prestazionale delle chiusure tradizionali, l'alta efficienza dei pannelli O1 e S2 e gli apporti solari più vantaggiosi, azzerano di fatto la richiesta di energia per il riscaldamento.

Nei mesi estivi, l'involucro di tipo adattivo garantisce ottime prestazioni in termini di riduzione del fabbisogno di energia per il raffrescamento. In questo caso, le simulazioni di calcolo condotte ad Agrigento, località scelta proprio per verificare il comportamento estivo dell'involucro in condizioni più svantaggiose, restituisce dei risultati sorprendenti, ottenendo come miglior risultato, (configurazione 4), una riduzione del 61% rispetto all'involucro in muratura di tipo tradizionale (configurazione 1).

Facendo un bilancio complessivo dell'involucro adattivo composto dai pannelli O1 e S2 ed analizzando i dati relativi al fabbisogno di energia primaria (riscaldamento e raffrescamento), in tutte e tre le località di riferimento si denota un'importante diminuzione delle emissioni di CO₂, che arriva a toccare il picco massimo percentuale di riduzione del 62% ad Agrigento nella configurazione 4 con esposizione est, oltre un'importante risparmio economico in termini di consumi di energia elettrica.

La presente ricerca scientifica si è concentrata sulle simulazioni del fabbisogno di energia primaria per il condizionamento degli ambienti, con lo scopo di valutare gli effettivi guadagni in termini di risparmio energetico che il componente O1 e S2 sono in grado di garantire rispetto all'adozione di un involucro edilizio di tipo tradizionale, le cui prestazioni sono conformi con i requisiti minimi stabiliti dalla legge di riferimento.

Sono rimandate a successiva verifica le simulazioni energetiche, da effettuare attraverso la test room virtuale, utilizzando i pannelli O2 e S1 nelle pareti disperdenti. In questa fase non si ritenuto interessante verificarne analiticamente le prestazioni poiché, considerando le stratigrafie analoghe a quelle già verificate, possiamo aspettarci dei risultati simili con le simulazioni già effettuate.

Sarà invece interessante analizzare il modello energetico della test room utilizzando, come componente di involucro, il pannello trasparente T1, per comprenderne il reale comportamento e verificarne la sua efficienza. Sistemi di chiusura trasparenti, non fanno parte, ad oggi, dei sistemi messi in produzione dell'azienda partner della presente ricerca, tuttavia si è ritenuto importante avviare un ulteriore argomento di indagine che stimoli la Cantori s.r.l. ad ampliare il proprio core business, offrendo una gamma prodotti completa per un involucro altamente efficiente.

Vengono inoltre rimandati a sviluppi futuri le analisi del comportamento fluidodinamico dell'intercapedine d'aria poiché queste verifiche potranno essere effettuate soltanto attraverso il monitoraggio in opera di un prototipo fisico.

Infine, soltanto durante la fase di ingegnerizzazione del prototipo, sarà possibile effettuare le dovute correzioni al progetto, con l'intento di migliorarne le caratteristiche praticando soluzioni tecniche necessarie per ottimizzare la futura fase di produzione industriale. La buona riuscita del processo di ingegnerizzazione è, per questo motivo, di fondamentale importanza in quanto condiziona la sostenibilità del progetto in termini tecnologici, formali e non per ultimo, di costi.

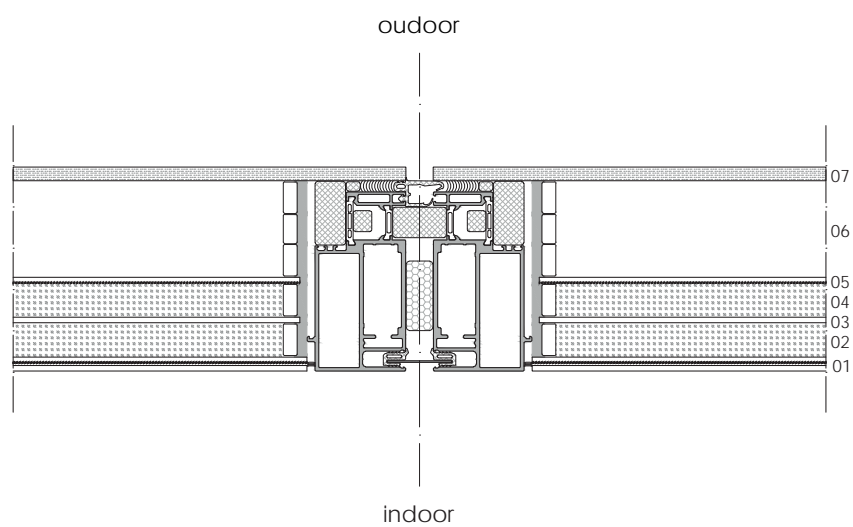
Appendici

- A** Dettagli costruttivi
- B** Analisi dei ponti termici e degli elementi finiti
- C** Sistema di assemblaggio
- D** Verifica delle prestazioni acustiche
- E.1** Possibili combinazioni tra i diversi moduli
- E.2** Possibili soluzioni di facciata
- E.3** Viste di dettaglio

A

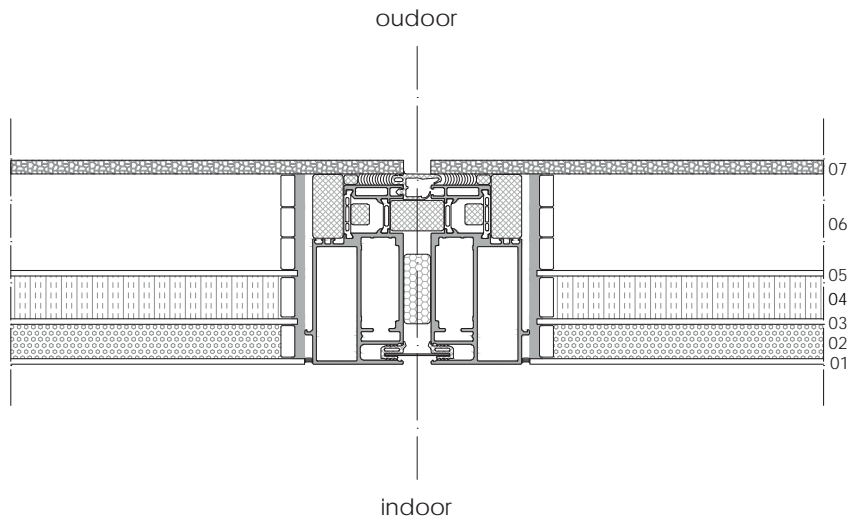
DETTAGLI COSTRUTTIVI

MODULO TRASPARENTE T1



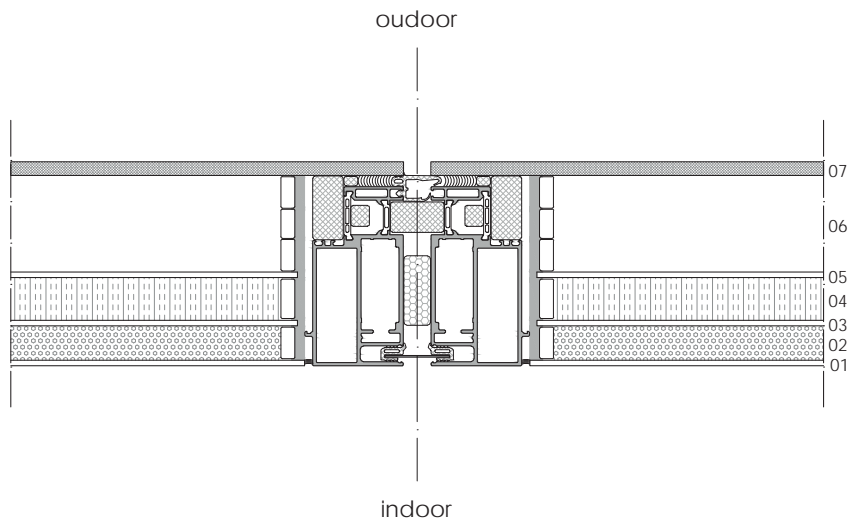
- 01 - Vetro stratificato con rivestimento basso emissivo - sp. 10 mm
- 02 - Intercapedine con gas Argon - sp. 25 mm
- 03 - Vetro - sp 4 mm
- 04 - Intercapedine con gas Argon - sp. 25 mm
- 05 - Vetro con rivestimento basso emissivo - sp. 4 mm
- 06 - Intercapedine d'aria - sp. 70 mm
- 07 - Vetro elettrocromico - sp 10 mm

MODULO SEMI-TRASPARENTE S1



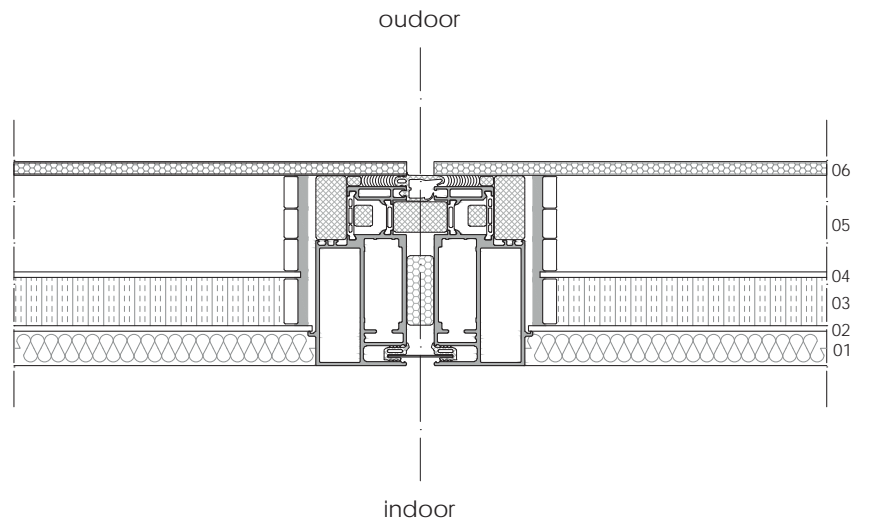
- 01 - Vetro - sp 4 mm
- 02 - Isolante Aerogel - sp. 25 mm
- 03 - Vetro - sp 4 mm
- 04 - PCM - sp. 30 + 1 mm
- 05 - Vetro - sp 4 mm
- 06 - Intercapedine d'aria - sp. 70 mm
- 07 - Pannello in schiuma di alluminio - sp 10 mm

MODULO SEMI-TRASPARENTE S2



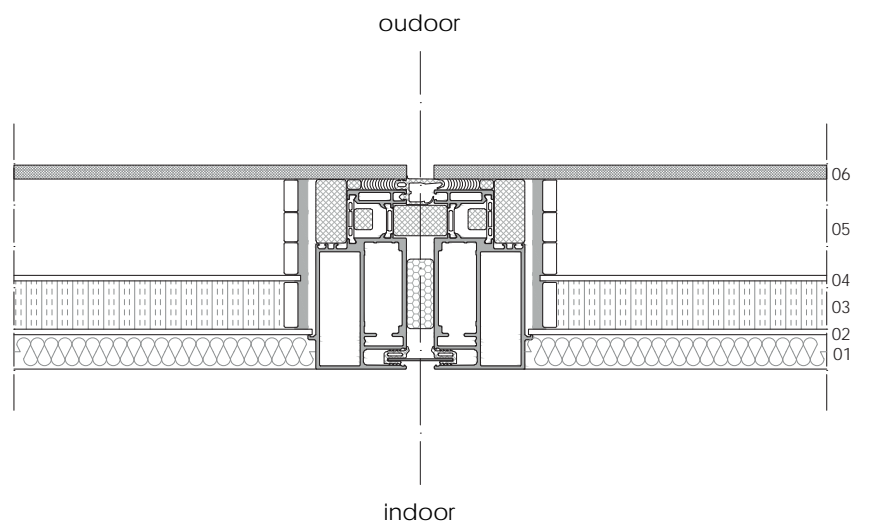
- 01 - Vetro - sp 4 mm
- 02 - Isolante Aerogel - sp. 25 mm
- 03 - Vetro - sp 4 mm
- 04 - PCM - sp. 30 + 1 mm
- 05 - Vetro - sp 4 mm
- 06 - Intercapedine d'aria - sp. 70 mm
- 07 - Pannello fotovoltaico traslucido integrato - sp 10 mm

MODULO OPACO 01



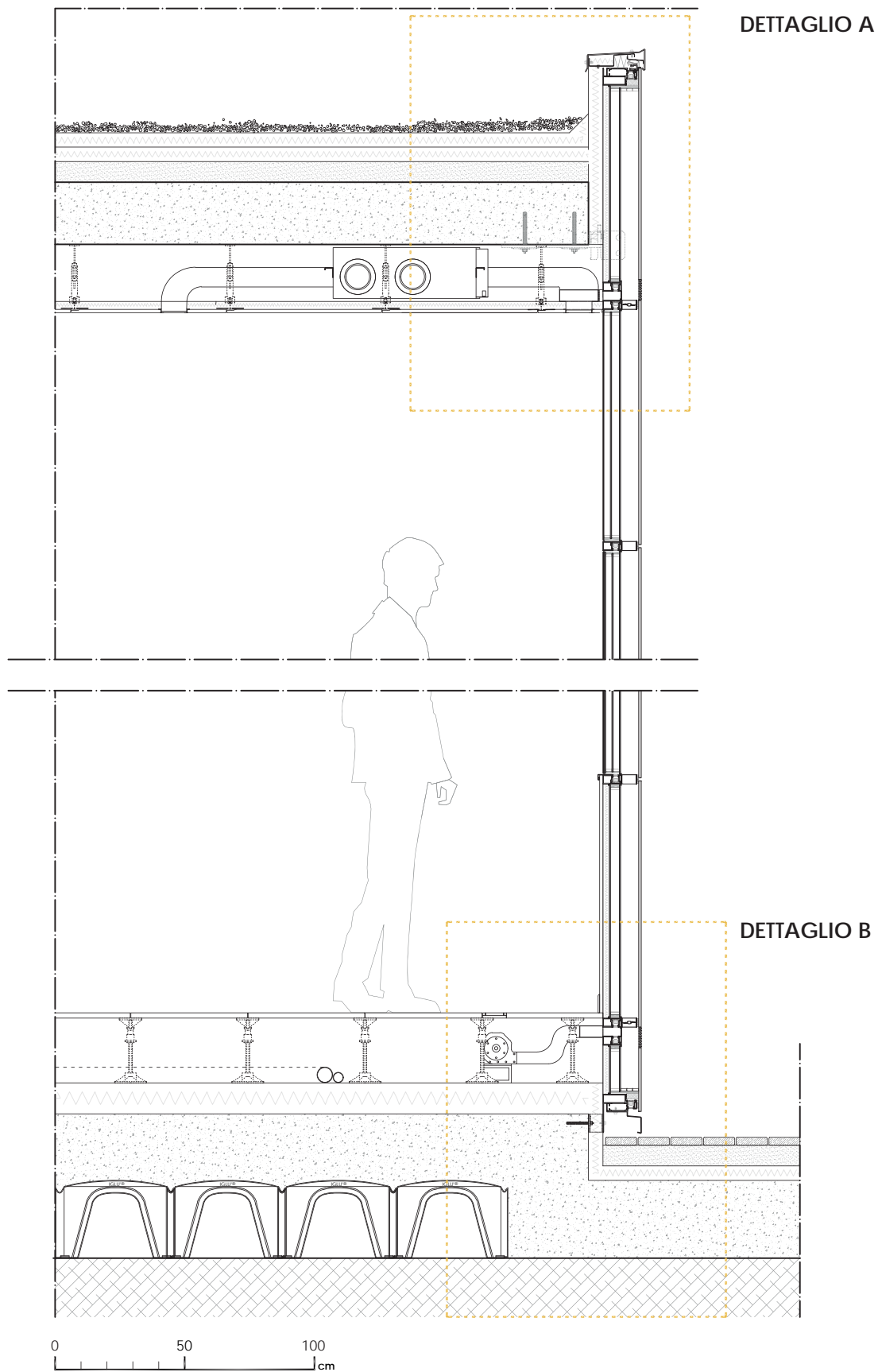
- 01 - Vacuum insulation panel - sp. 25 mm
- 02 - Vetro - sp 4 mm
- 03 - PCM - sp. 35 mm
- 04 - Vetro - sp 4 mm
- 05 - Intercapedine d'aria - sp. 70 mm
- 07 - Pannello in alluminio tipo LARCORE - sp 10 mm

MODULO OPACO 02

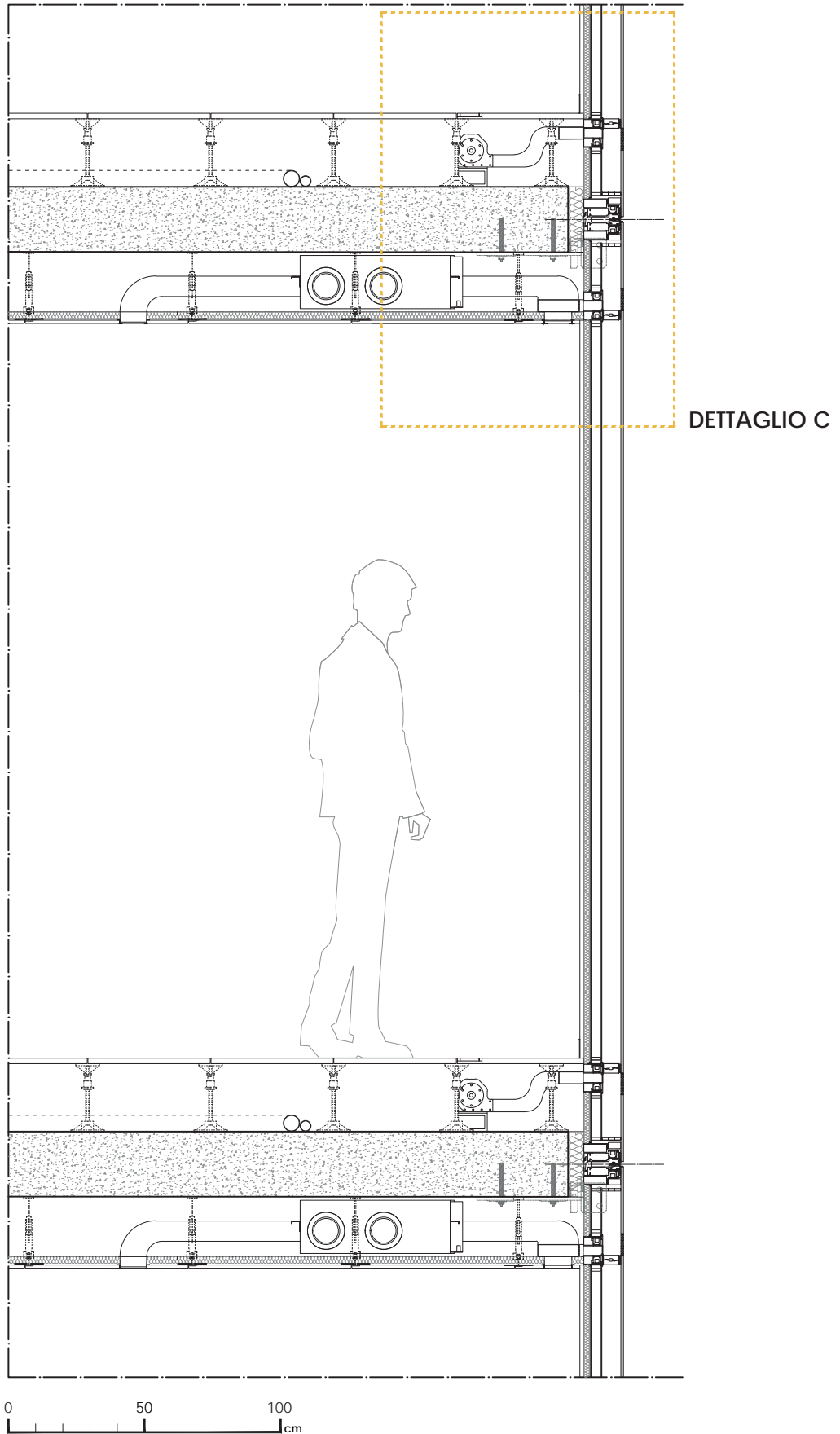


- 01 - Vacuum insulation panel - sp. 25 mm
- 02 - Vetro - sp 4 mm
- 03 - PCM - sp. 35 mm
- 04 - Vetro - sp 4 mm
- 05 - Intercapedine d'aria - sp. 70 mm
- 07 - Pannello fotovoltaico opaco integrato - sp 10 mm

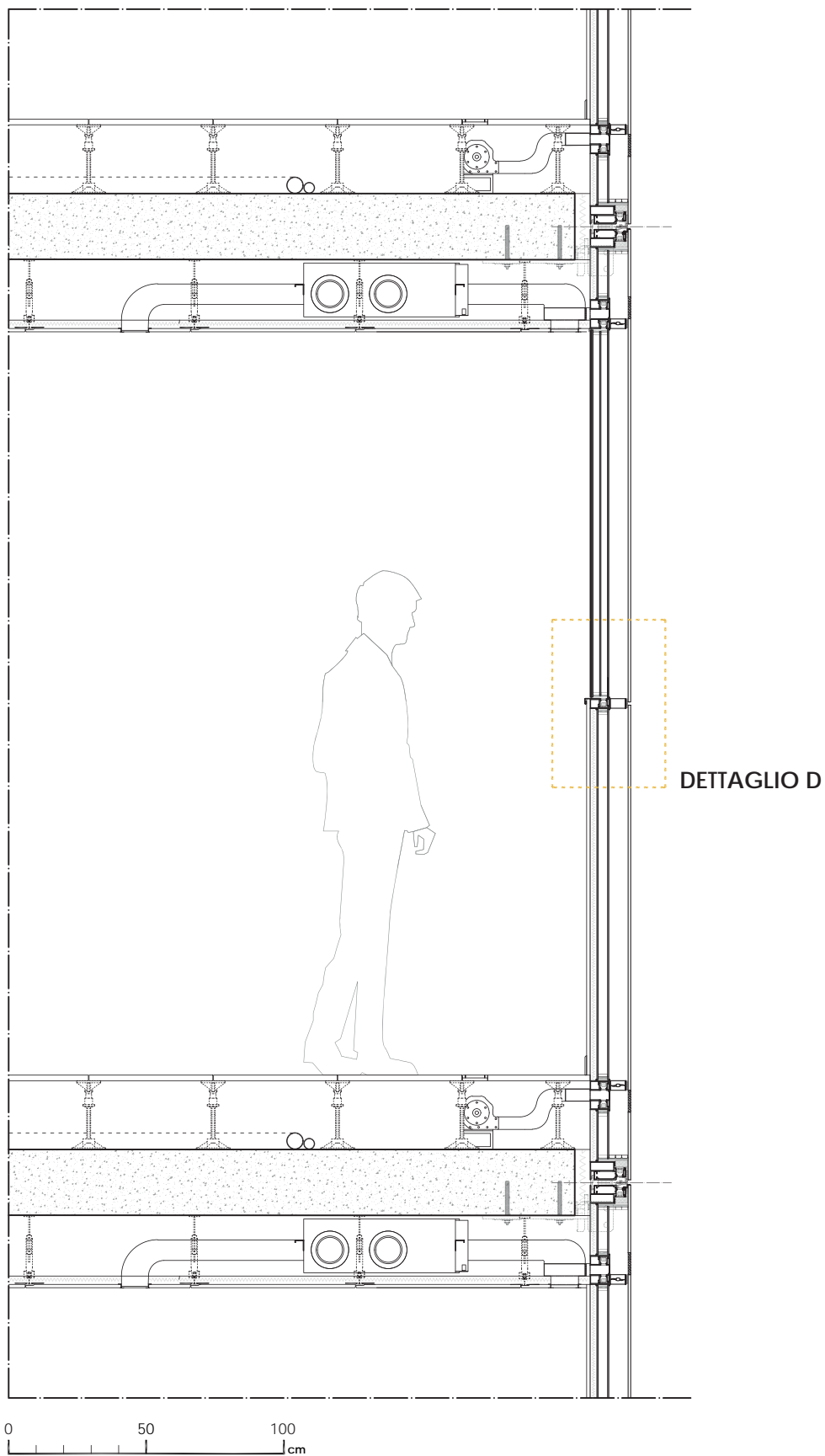
SEZIONE CIELO TERRA PANNELLO "01+T1+S2"



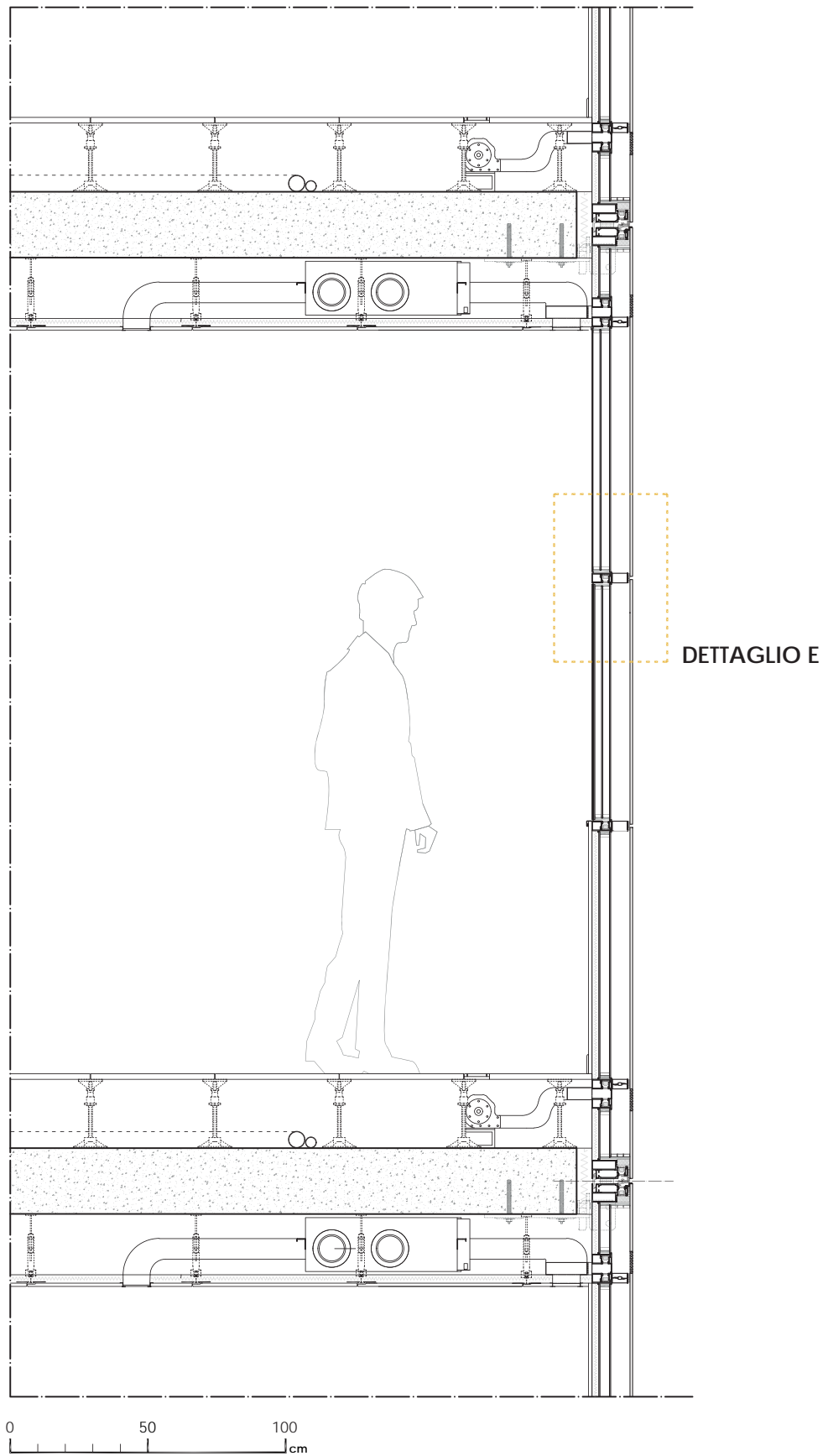
SEZIONE INTERPIANO PANNELLO "01"



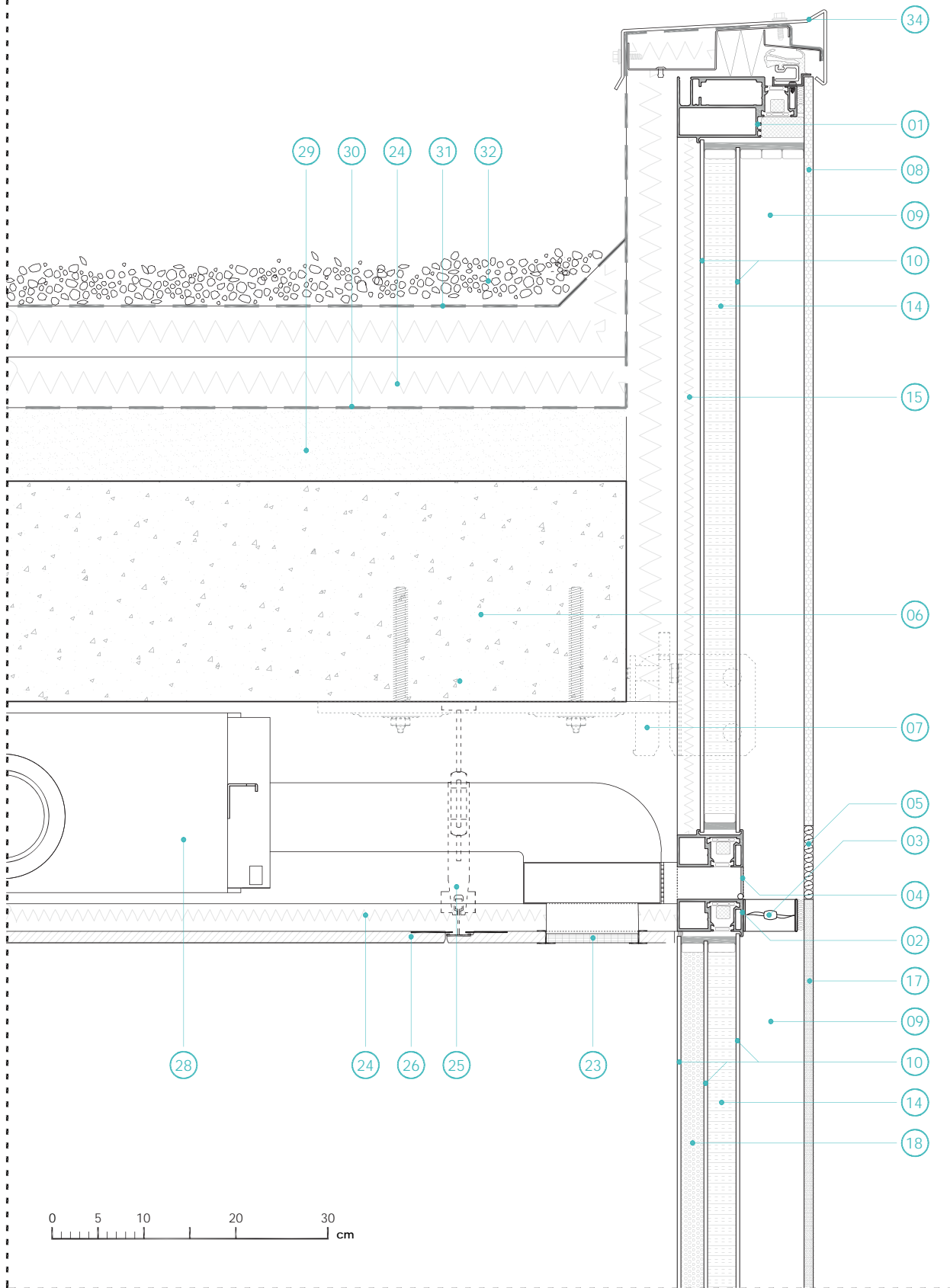
SEZIONE INTERPIANO PANNELLO "01+T1"

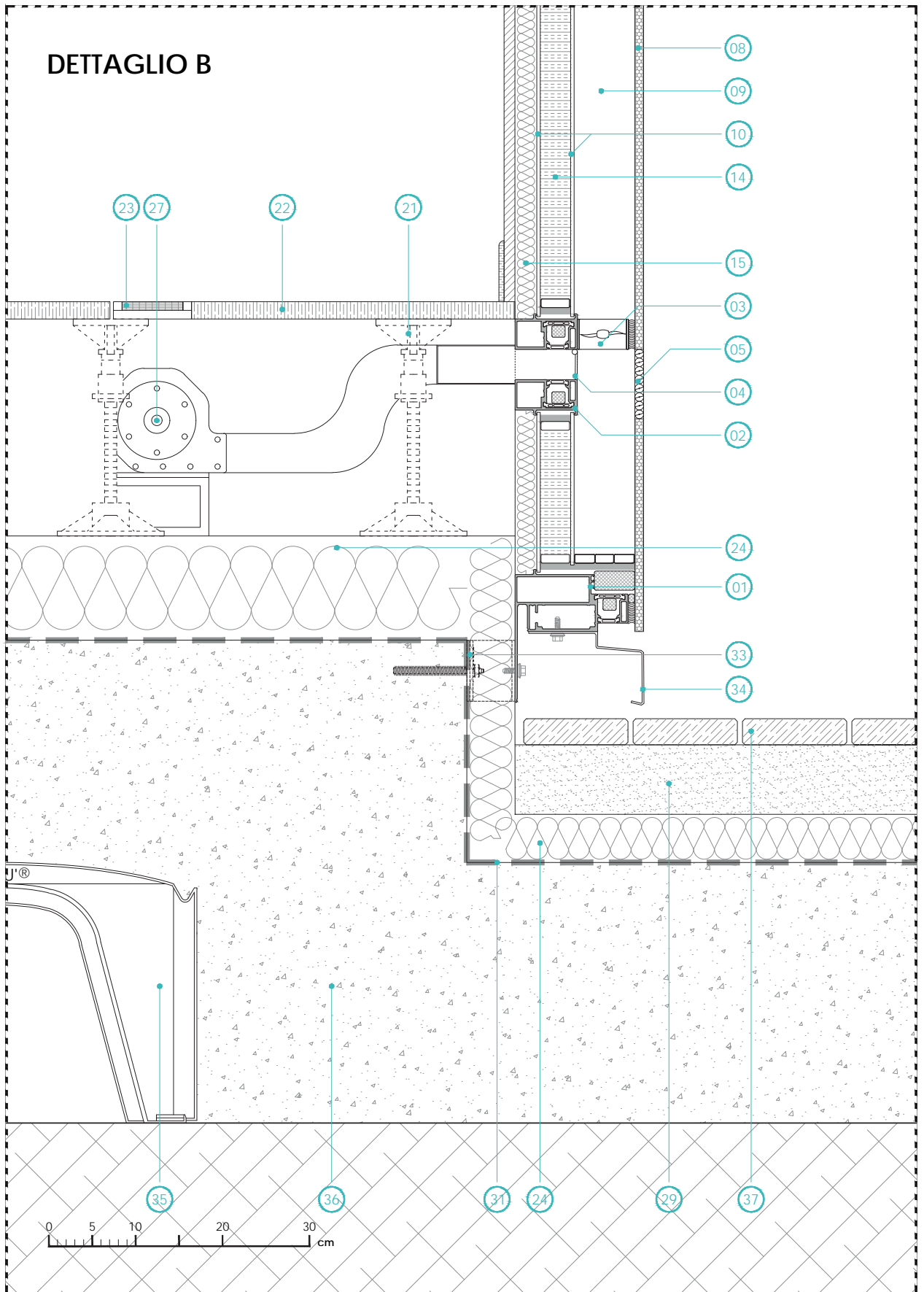


SEZIONE INTERPIANO PANNELLO "01+T1+S2"

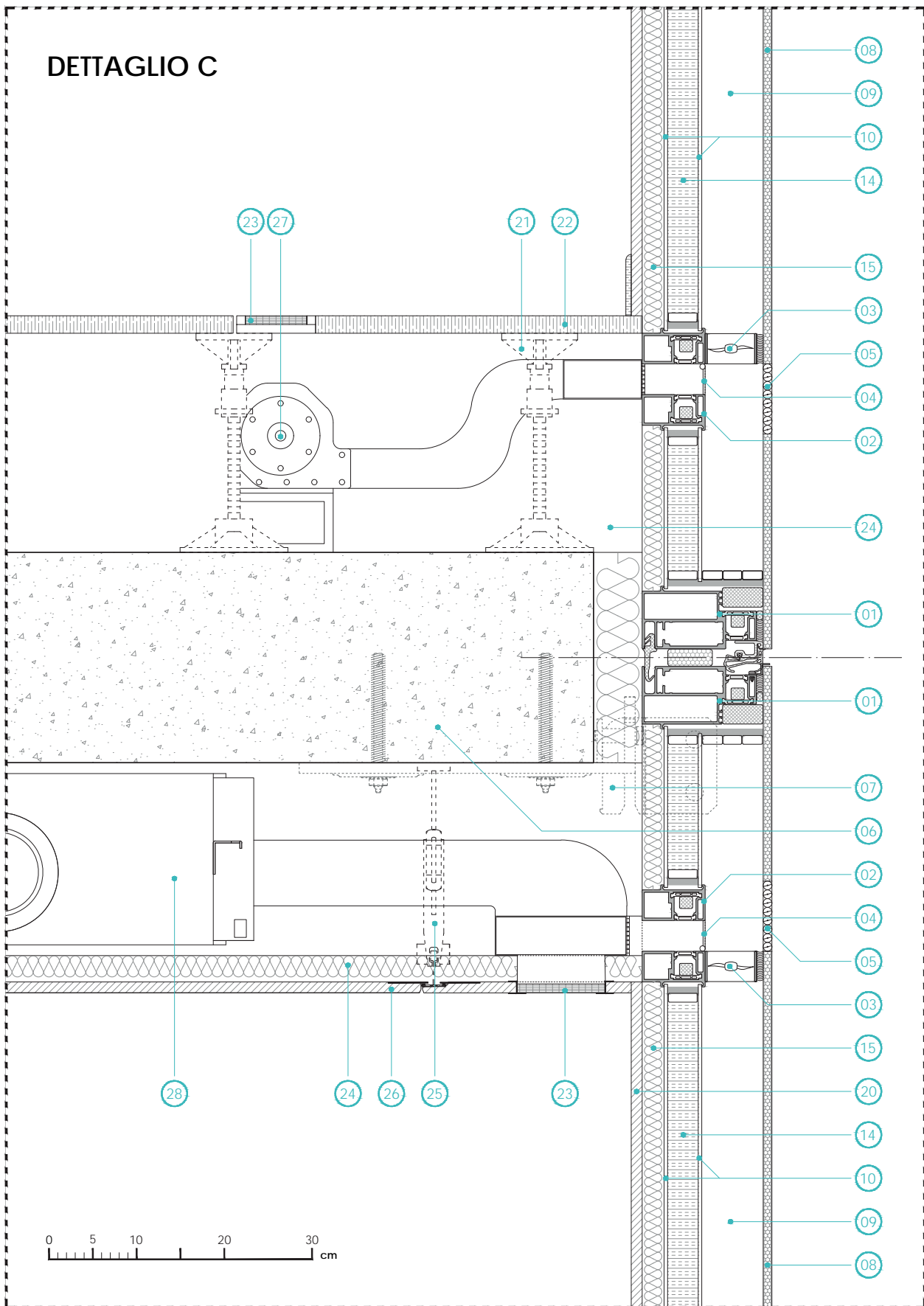


DETTAGLIO A

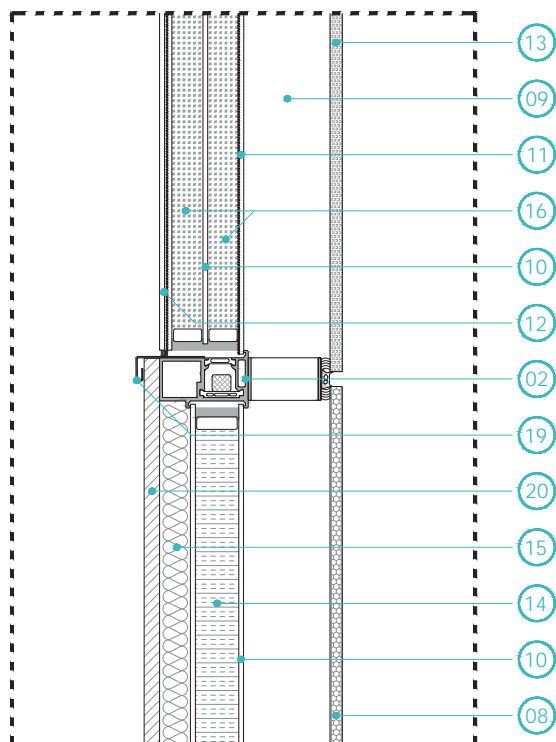




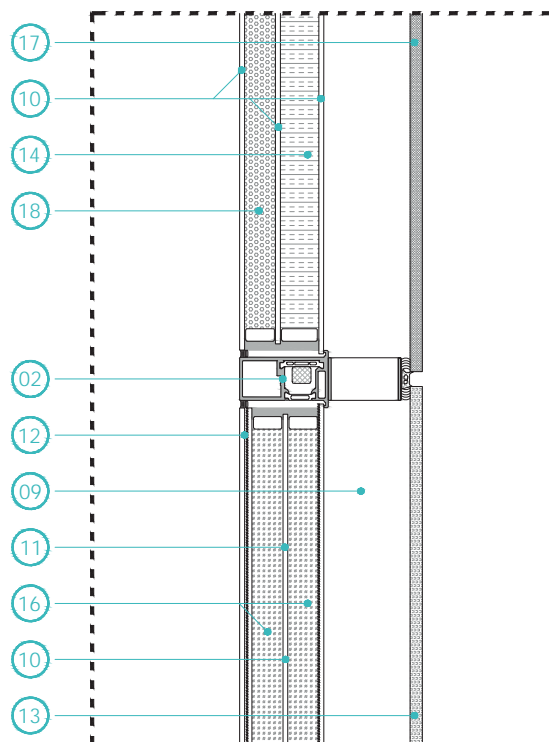
DETTAGLIO C



DETTAGLIO D



DETTAGLIO E



LEGENDA

- 01 - Profilo estruso in alluminio - mm 140 x 70
- 02 - Profilo estruso in alluminio - mm 72 x 40
- 03 - Ventilatore assiale
- 04 - Bocchetta apribile a controllo programmato
- 05 - Griglia di aerazione esterna a controllo programmato
- 06 - Solaio in cemento armato
- 07 - Piastra in acciaio per ancoraggio a solaio
- 08 - Pannello in alluminio tipo LARCORE - sp. 10 mm
- 09 - Intercapedine d'aria - sp. 70 mm
- 10 - Vetro - sp 4 mm
- 11 - Vetro con rivestimento basso emissivo - sp. 4 mm
- 13 - Vetro elettrocromico - sp 10 mm
- 14 - PCM accoppiato (sali idrato) - sp. tot 35 mm
- 15 - Vacuum insulation panel - sp. 25 mm
- 16 - Intercapedine con gas Argon - sp. 25 mm
- 17 - Pannello fotovoltaico traslucido integrato - sp 10 mm
- 18 - Isolante Aerogel - sp. 25 mm
- 19 - Profilo estruso in alluminio per battuta cartongesso
- 20 - Lastra di cartongesso per pareti interne - sp. 12.50 mm
- 21 - Supporto regolabile per pavimento flottante
- 22 - Piastrella in gres porcellanato - sp. 20 mm
- 23 - Griglia di ventilazione in lamiera di alluminio
- 24 - Isolante in EPS - sp. variabili mm 15-70
- 25 - Tirante metallico per contro-soffitto in cartongesso
- 26 - Pannello modulare per soffitto in lana minerale - sp. 12.5 mm
- 27 - Ventilatore tangenziale da canale
- 28 - Unità di ventilazione con recuperatore di calore
- 29 - Massetto di pendenza - sp. 80 mm
- 30 - Barriera a vapore traspirante in Polietilene - sp. 0.20 mm
- 31 - Membrana bitume polimero elastoplastomerica - sp 4 mm
- 32 - Strato di zavorramento in ghiaia tonda di fiume
- 33 - Piastra con profilo estruso a C in acciaio per ancoraggio a terra
- 34 - Lamiera in alluminio pressopiegata - sp. 0.1 mm
- 35 - Vespaio areato con casseri tipo IGLU in plastica riciclata
- 36 - Piastra di fondazione in cemento armato
- 37 - Pavimentazione esterna in porfido - sp. 3 cm



B ANALISI DEI PONTI TERMICI E DEGLI ELEMENTI FINITI

L'analisi dei ponti termici agli elementi finiti è stata condotta attraverso il software IRIS della suite ANIT per si basa su modelli di calcolo conformi alle norme vigenti per l'analisi delle prestazioni energetiche e igrotermiche dell'involucro edilizio ed è allineato alle richieste di legge definite a livello nazionale dal DM 26/6/2015.

Norme di calcolo di riferimento

Il software IRIS è basato sulle seguenti normative di calcolo:

- UNI EN ISO 10211 - ponti termici in edilizia - Flussi termici e temperature superficiali - Calcoli dettagliati,
- UNI EN ISO 14683 - Ponti termici in edilizia - Coefficiente di trasmissione termica lineica - Metodi semplificati e valori di riferimento,
- UNI EN ISO 13788 - prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia - Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e la condensazione interstiziale -
- Metodi di calcolo e UNI EN ISO 13370, prestazione termica degli edifici - Trasferimento di calore attraverso il terreno - Metodi di calcolo.

Dati climatici

I dati climatici sono quelli contenuti nel software relativi alle province di Italia, in accordo con la UNI 10349. Per le simulazioni è stata scelta la sola località di Milano, considerando in questo caso le differenze con le altre località di Ascoli Piceno e Agrigento poco rilevanti ai fini dei risultati finali.

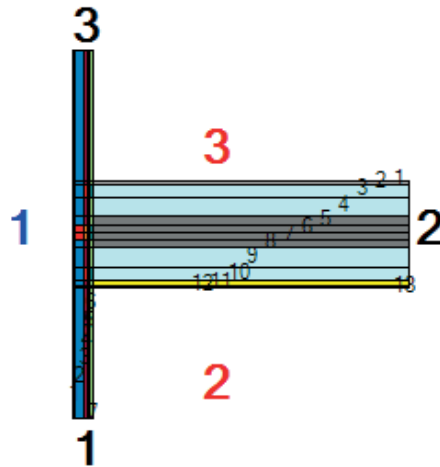
Archivi materiali

La banca dati è aperta: si possono aggiungere materiali edilizi e le caratteristiche possono essere modificate. Il software ospita una cospicua banca dati di materiali per l'edilizia di fonte normativa: UNI 10351, UNI 10355, UNI EN ISO 10456 e UNI/TR 11552. Per i materiali non presenti in archivio sono stati aggiunti inserendo le caratteristiche reperite dalle schede tecniche di ciascun materiale scelto.

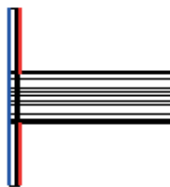
Di seguito le schede derivanti dall'analisi dei pannelli:

- O1
- O2
- S1
- S2

Ponte: O1 - OPACO

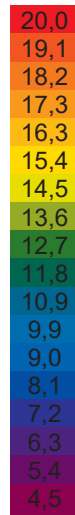
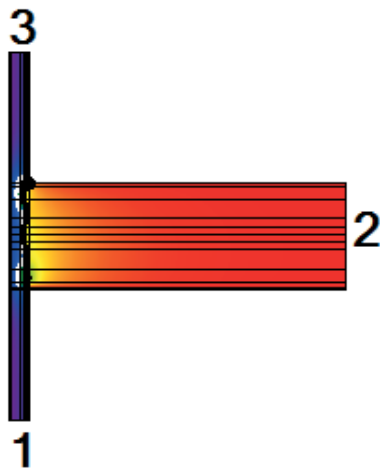


Condizioni al contorno

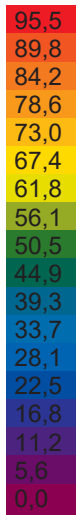
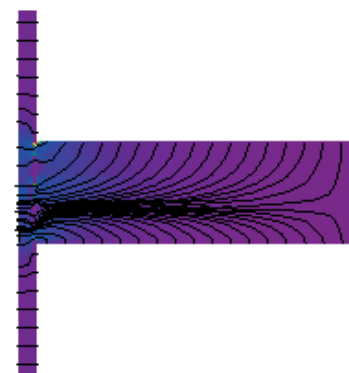


Esterno	Temperatura	4,5°C
	Umidità relativa	80%
Interno	Temperatura	20,0°C
	Umidità relativa	51%

Temperatura [°C]



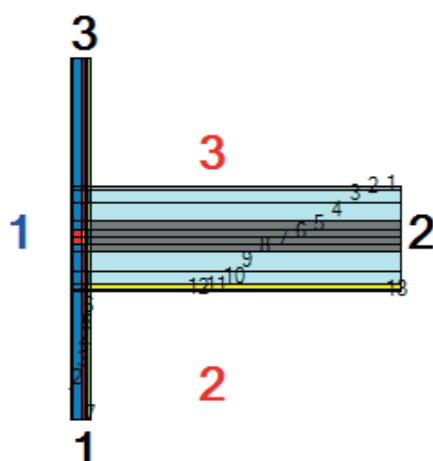
Flusso [W/m²]



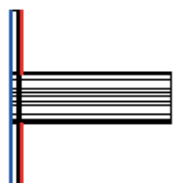
Verifica del rischio di condensazione superficiale e di formazione di muffe

Temperatura superficiale minima di progetto	16,0°C	
Temperatura superficiale minima per non avere condensa	9,6°C	Verificato
Temperatura superficiale minima per non avere formazione di muffe	12,9°C	Verificato

Ponte: O2 - OPACO

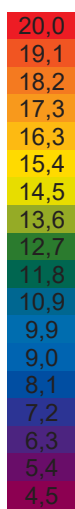
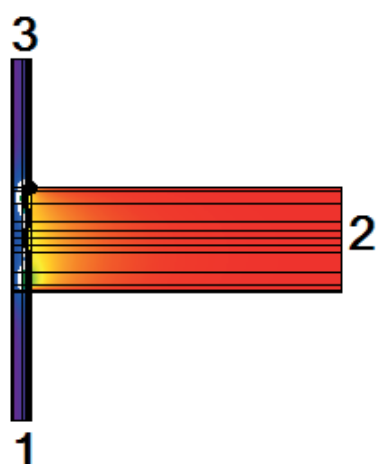


Condizioni al contorno

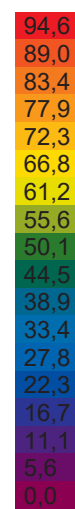
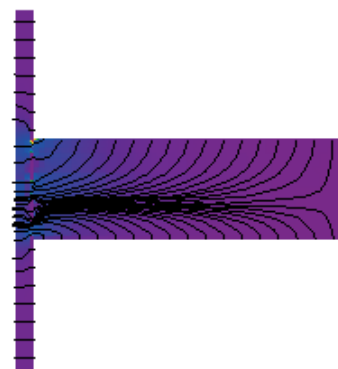


Esterno	Temperatura	4,5°C
	Umidità relativa	80%
Interno	Temperatura	20,0°C
	Umidità relativa	51%

Temperatura [°C]



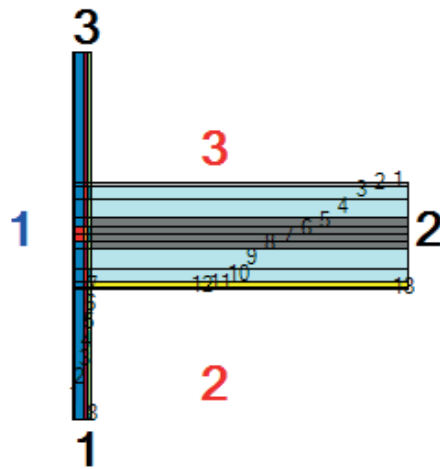
Flusso [W/m²]



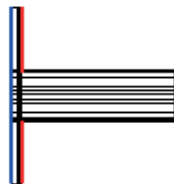
Verifica del rischio di condensazione superficiale e di formazione di muffe

Temperatura superficiale minima di progetto	16,1°C	
Temperatura superficiale minima per non avere condensa	9,6°C	Verificato
Temperatura superficiale minima per non avere formazione di muffe	12,9°C	Verificato

Ponte: S1 - SEMITRASPARENTE

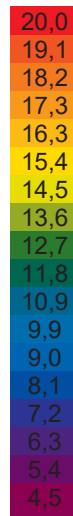
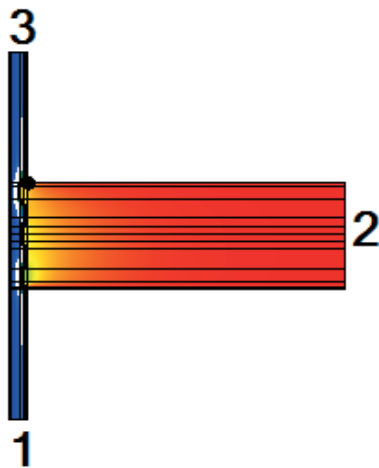


Condizioni al contorno

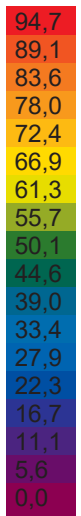
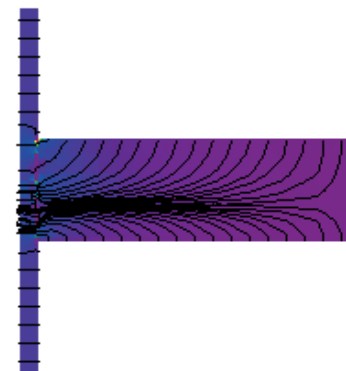


Esterno	Temperatura	4,5°C
	Umidità relativa	80%
Interno	Temperatura	20,0°C
	Umidità relativa	51%

Temperatura [°C]



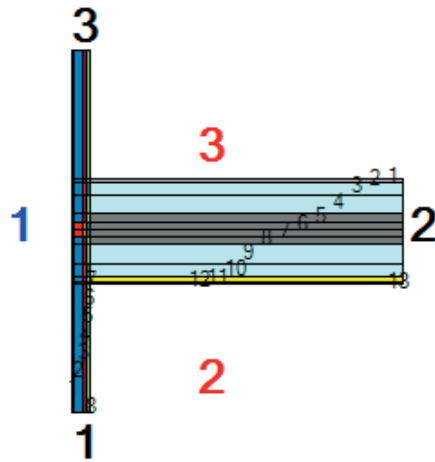
Flusso [W/m²]



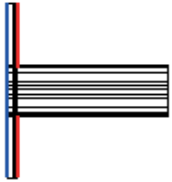
Verifica del rischio di condensazione superficiale e di formazione di muffe

Temperatura superficiale minima di progetto	16,5°C	
Temperatura superficiale minima per non avere condensa	9,6°C	Verificato
Temperatura superficiale minima per non avere formazione di muffe	12,9°C	Verificato

Ponte: S2 - SEMITRASPARENTE

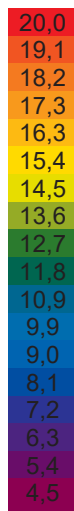
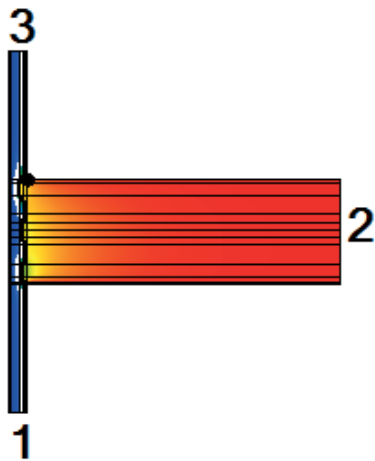


Condizioni al contorno

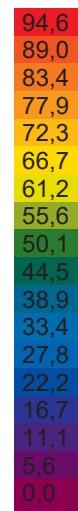
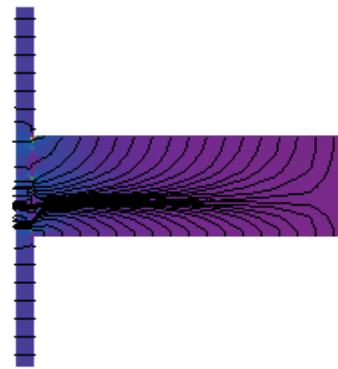


Esterno	Temperatura	4,5°C
	Umidità relativa	80%
Interno	Temperatura	20,0°C
	Umidità relativa	51%

Temperatura [°C]



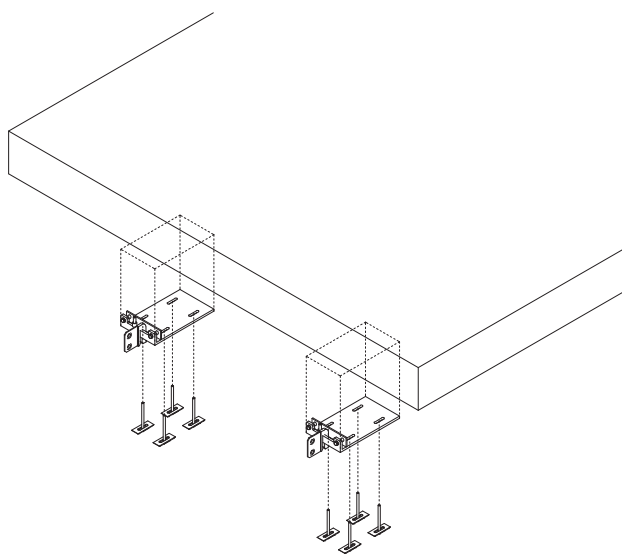
Flusso [W/m²]



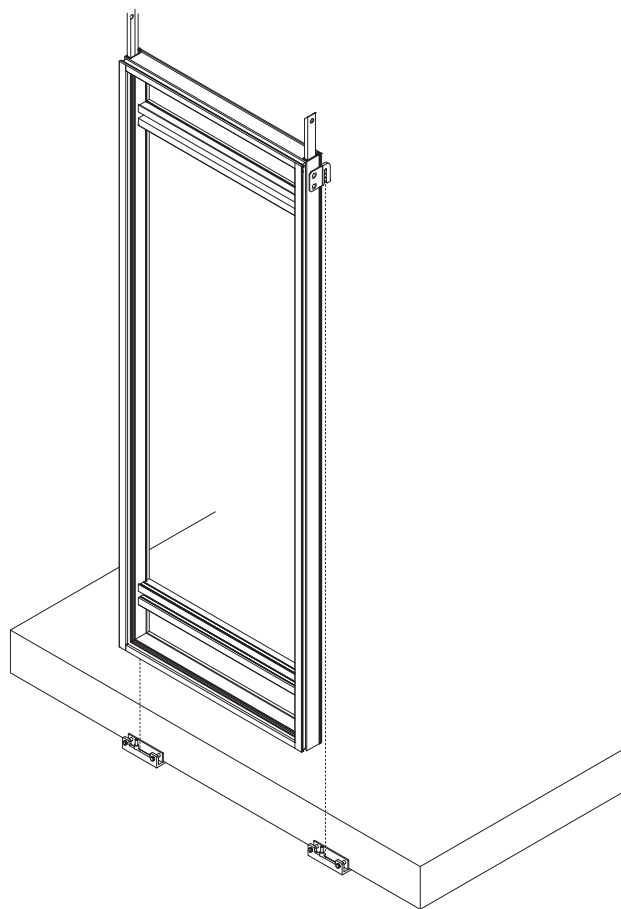
Verifica del rischio di condensazione superficiale e di formazione di muffe

Temperatura superficiale minima di progetto	16,5°C	
Temperatura superficiale minima per non avere condensa	9,6°C	Verificato
Temperatura superficiale minima per non avere formazione di muffe	12,9°C	Verificato

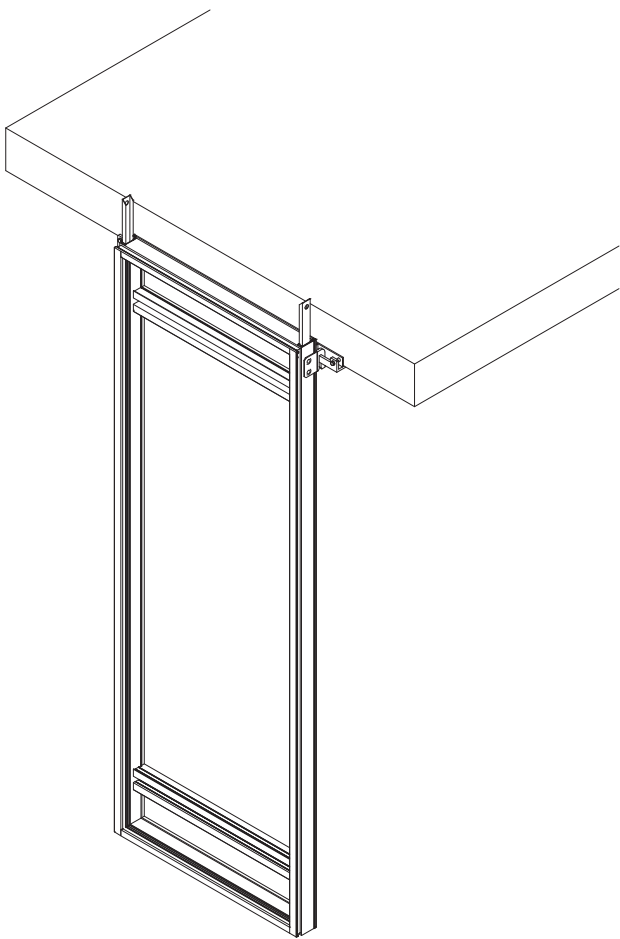
C SISTEMA DI ASSEMBLAGGIO



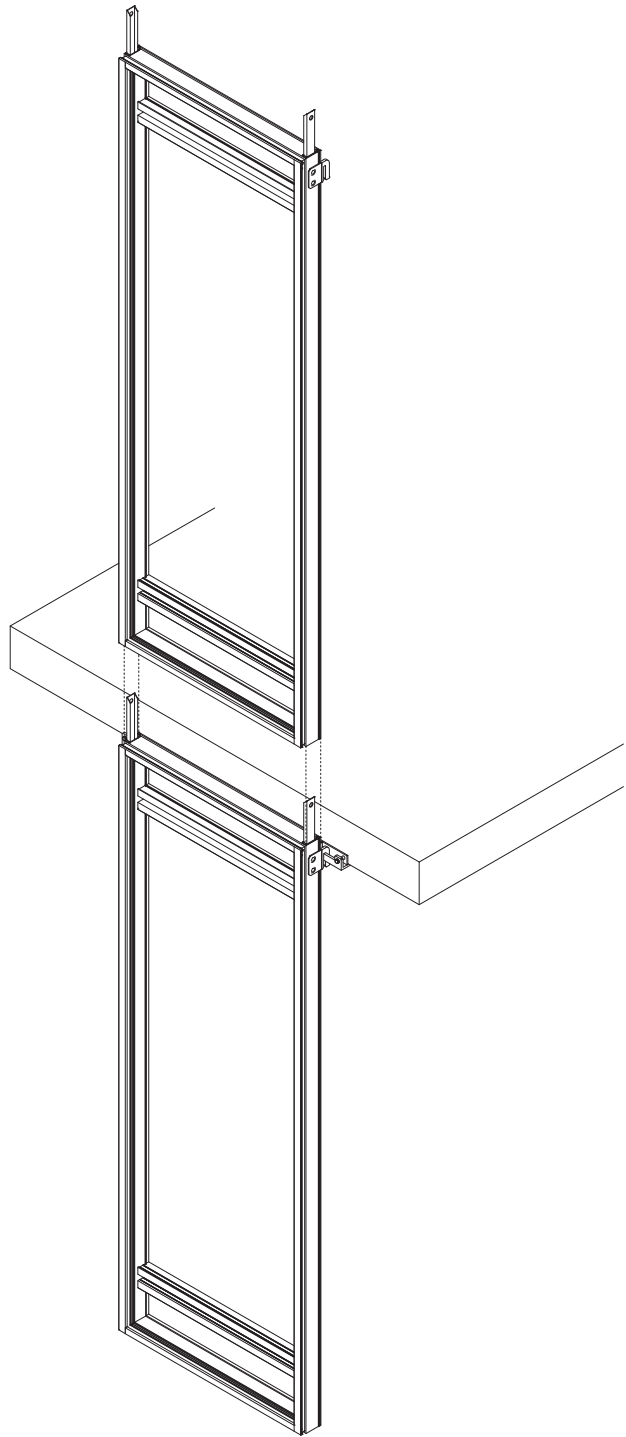
1 | PIASTRA DI ANCORAGGIO



2 | AGGANCIAMENTO PANNELLO



3 | PANNELLO AGGANCIATO



4 | AGGANCIO SUCCESSIVO

D VERIFICA DELLE PRESTAZIONI ACUSTICHE

L'analisi delle prestazioni acustiche è stata condotta attraverso il software ECHO della suite ANIT per si basa su modelli di calcolo conformi alle norme vigenti per la definizione dei requisiti acustici passivi e classificazione delle unità immobiliari e le caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati.

Norme di calcolo di riferimento

Il software ECHO è analizza i requisiti acustici passivi degli edifici

- DPCM 5-12-1997 - Requisiti acustici passivi degli edifici ,
- UNI 11367- La classe acustica delle unità immobiliari
- UNI 11532 -Le caratteristiche acustiche interne degli ambienti confinati.

I modelli di calcolo, eseguiti per indice di valutazione, si basano sulle norme:

- UNI EN ISO 12354:2017,
- UNI/TR 11175
- UNI 11367 e i calcoli vengono eseguiti per indice di valutazione.

Le caratteristiche acustiche interne sono analizzate basandosi sulle norme:

- UNI 11532-1:2018
- UNI 11532-2:2020

Il software permette di valutare:

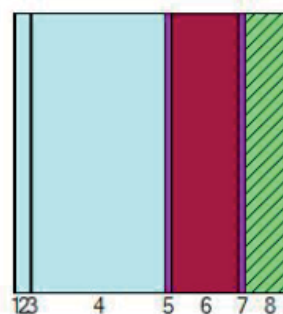
- Il potere fonoisolante apparente (R'_w) di pareti e solai
- L'isolamento acustico delle facciate ($D2_{n,T,w}$)
- Il livello di rumore di calpestio in un ambiente abitativo ($L'_{n,w}$)
- Il tempo di riverberazione (T) degli ambienti abitativi,
- La classe acustica delle unità immobiliari
- L'isolamento acustico normalizzato tra ambienti adiacenti ($D_{n,T,w}$)
- L'indice di trasmissione del parlato (STI – Speech Transmission Index)
- La chiarezza (C_{50})
- Inoltre consente di analizzare:
 - Il potere fonoisolante "di laboratorio" di una stratigrafia (R_w)
 - L'incremento di potere fonoisolante di strati di rivestimento interni ed esterni (Cappotti) (ΔR_w)
 - La riduzione di livello di calpestio determinata da un massetto galleggiante o a secco (ΔL_w)
 - Il livello di rumore di calpestio tra ambienti adiacenti (in orizzontale) ($L'_{n,w}$)
 - Il potere fonoisolante minimo dei serramenti (R_w) necessario per rispettare una prescrizione di isolamento di facciata
 - L'influenza dei materiali sigillanti dei serramenti sull'isolamento di facciata
 - Il potere fonoisolante medio di strutture composte da più elementi (R_{w_medio})
 - L'isolamento acustico tra due ambienti collegati tramite porte
 - Le trasmissioni sonore laterali tra ambienti attraverso corridoi o altri percorsi "aerei"

Di seguito le schede derivanti dall'analisi dei pannelli:

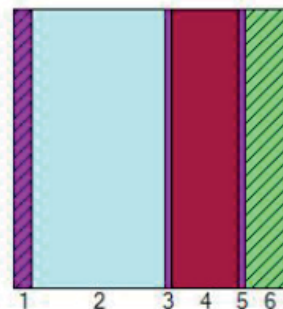
- O1
- O2
- S1
- S2
- T1

Struttura: O1 - OPACO

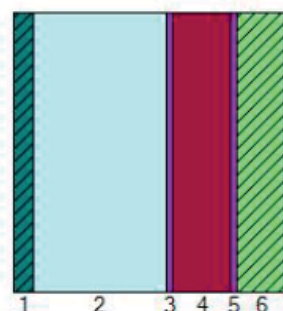
Tipo di elemento	Parete utente
Spessore totale	14,8 cm
Massa superficiale	63,5 kg/m ²
Rw	55,3 dB

**Struttura: O2 - OPACO**

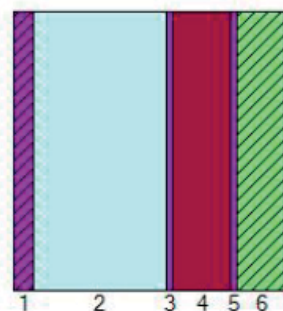
Tipo di elemento	Parete utente
Spessore totale	14,8 cm
Massa superficiale	82,1 kg/m ²
Rw	57,5 dB

**Struttura: S1 - SEMITRASPARENTE**

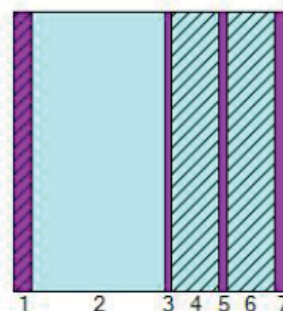
Tipo di elemento	Parete utente
Spessore totale	14,7 cm
Massa superficiale	64,6 kg/m ²
Rw	55,5 dB

**Struttura: S2 - SEMITRASPARENTE**

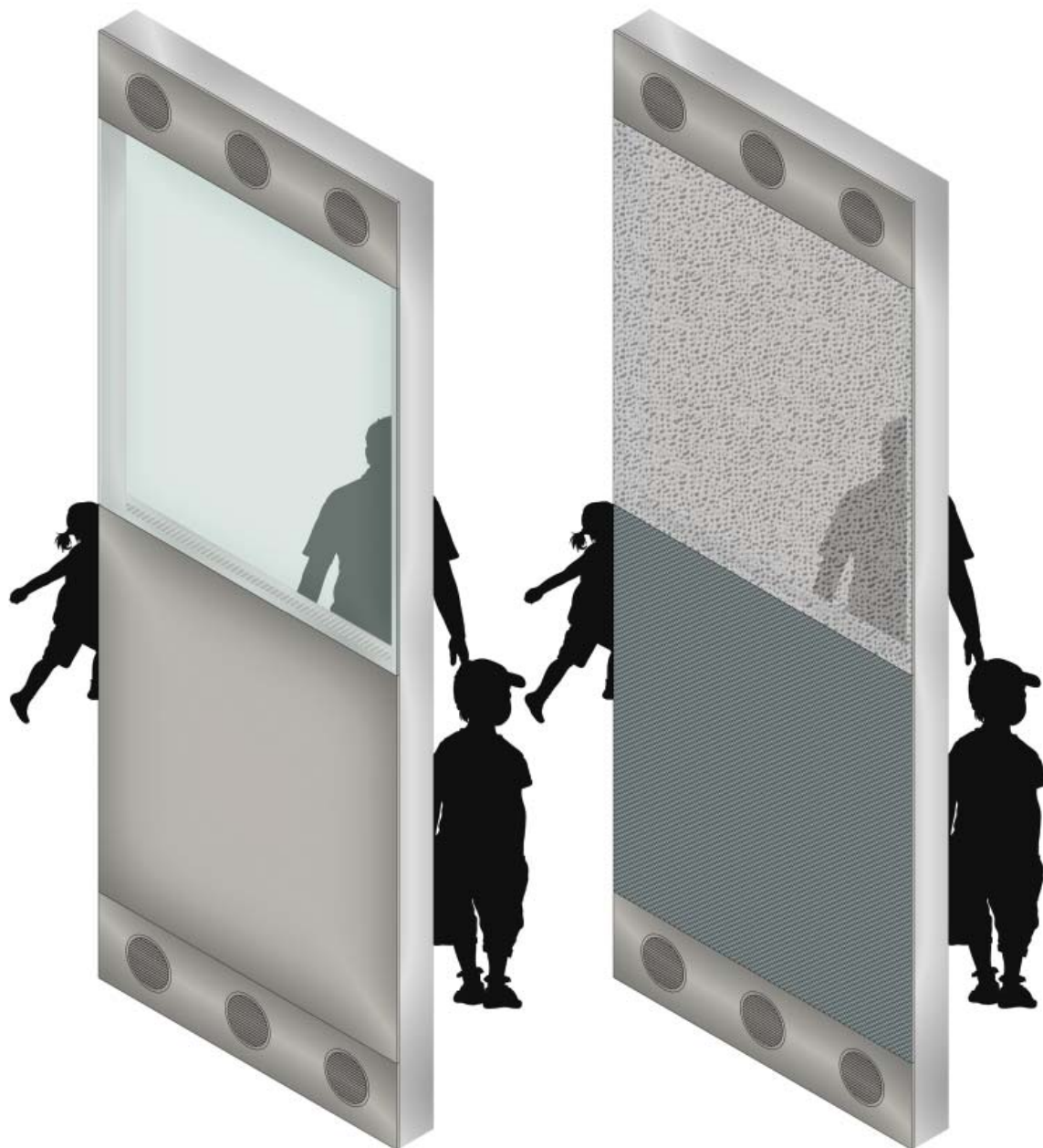
Tipo di elemento	Parete utente
Spessore totale	14,7 cm
Massa superficiale	83,6 kg/m ²
Rw	57,7 dB

**Struttura: T1 - TRASPARENTE**

Tipo di elemento	Parete utente
Spessore totale	14,8 cm
Massa superficiale	139,1 kg/m ²
Rw	59,6 dB



E.1 POSSIBILI COMBINAZIONI TRA I DIVERSI MODULI

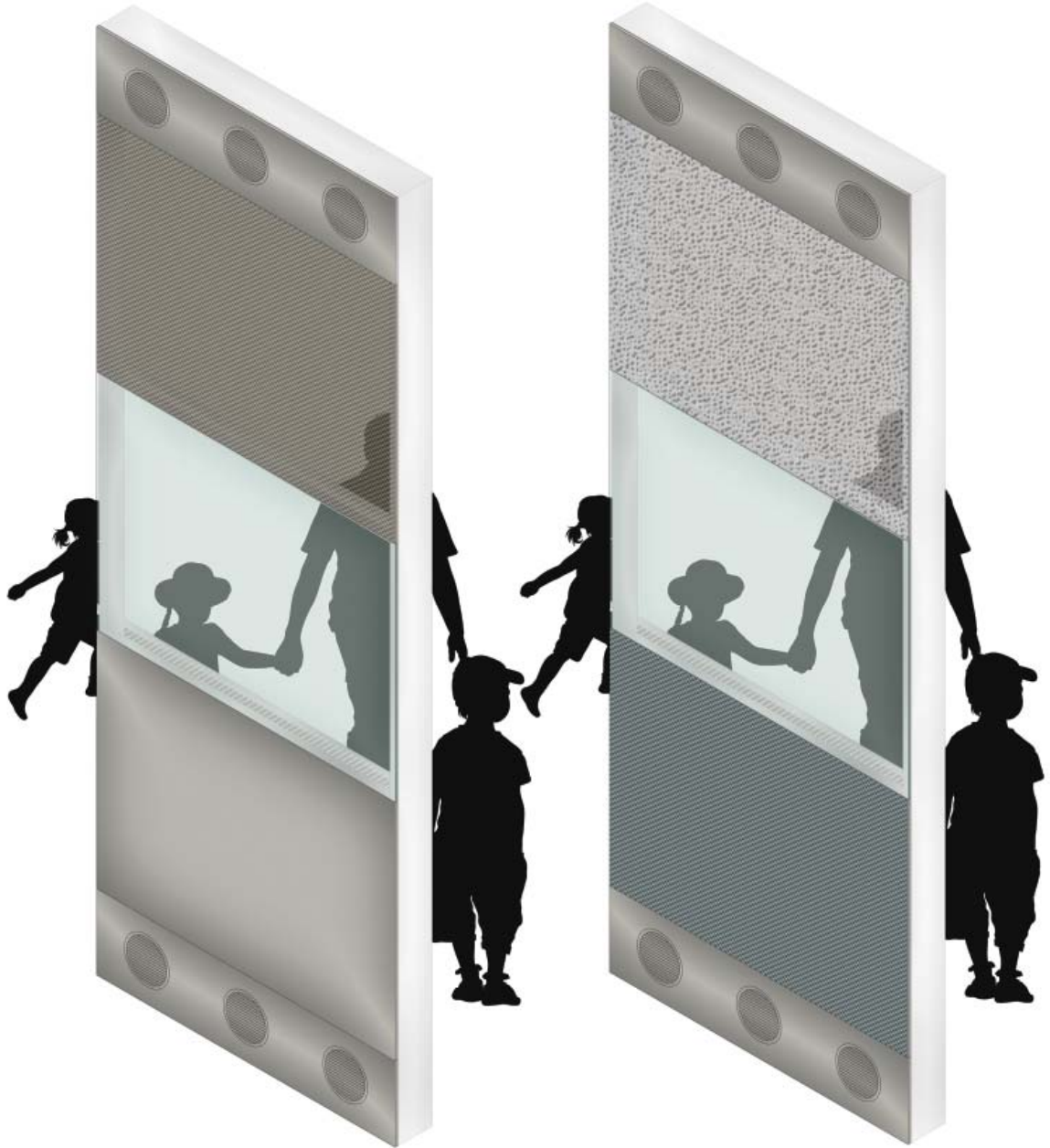


01+T1

02+S1



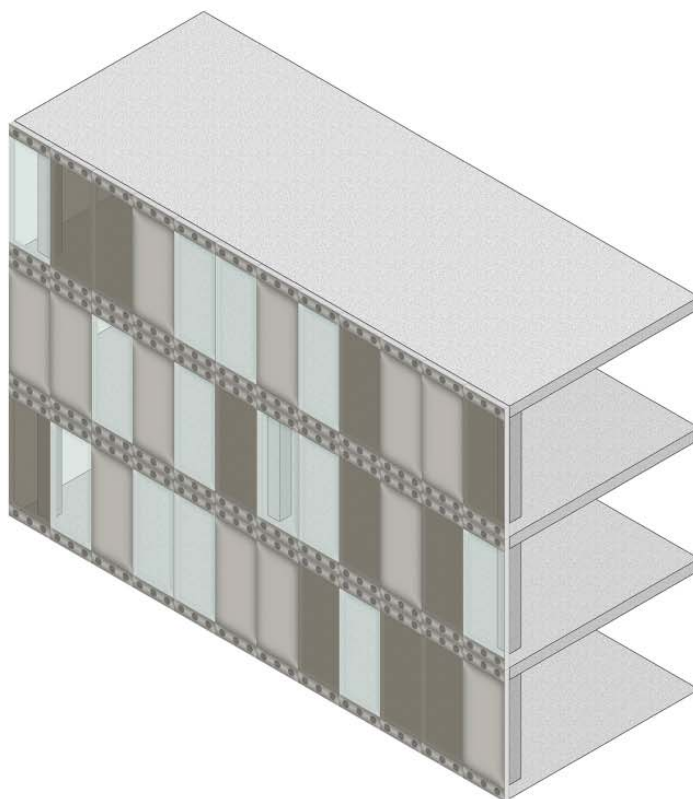
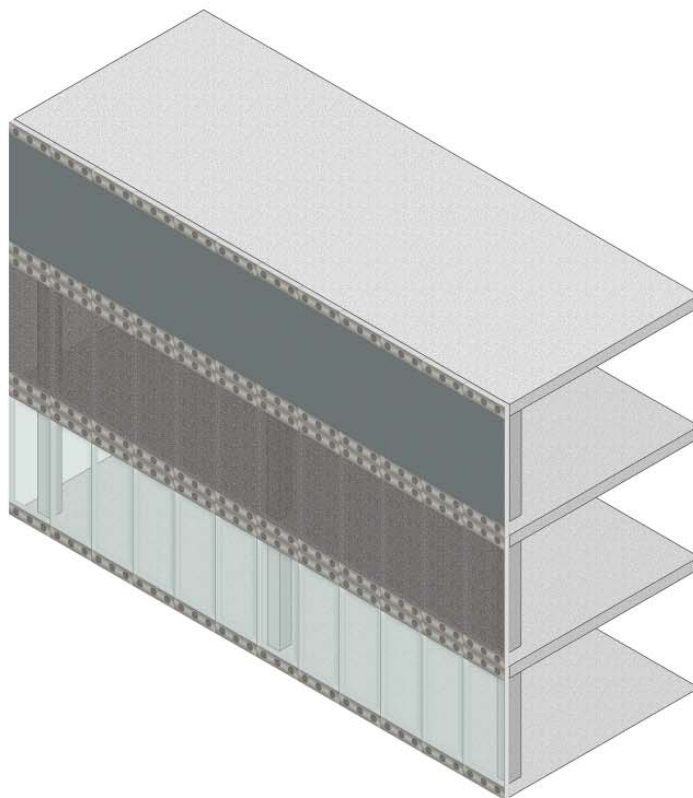
S2+T1

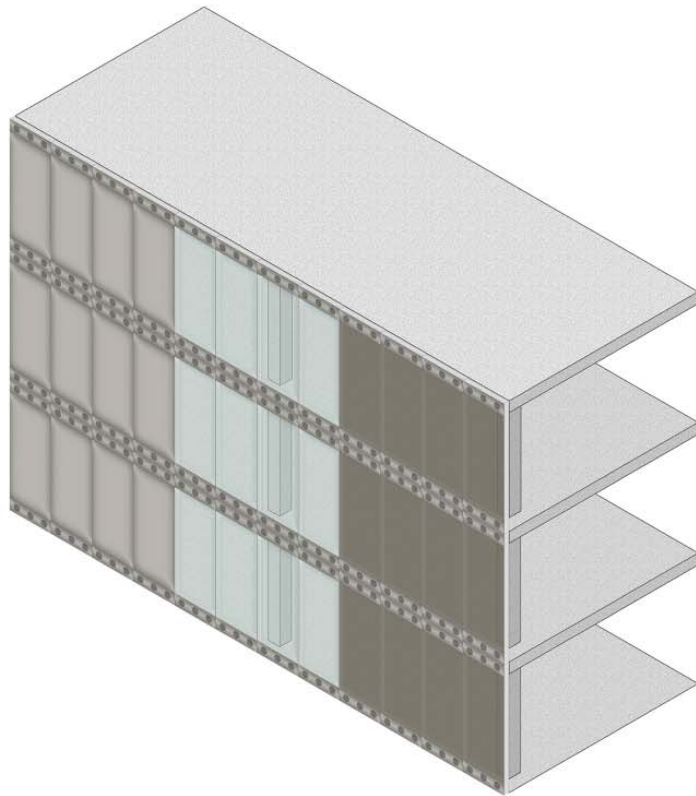
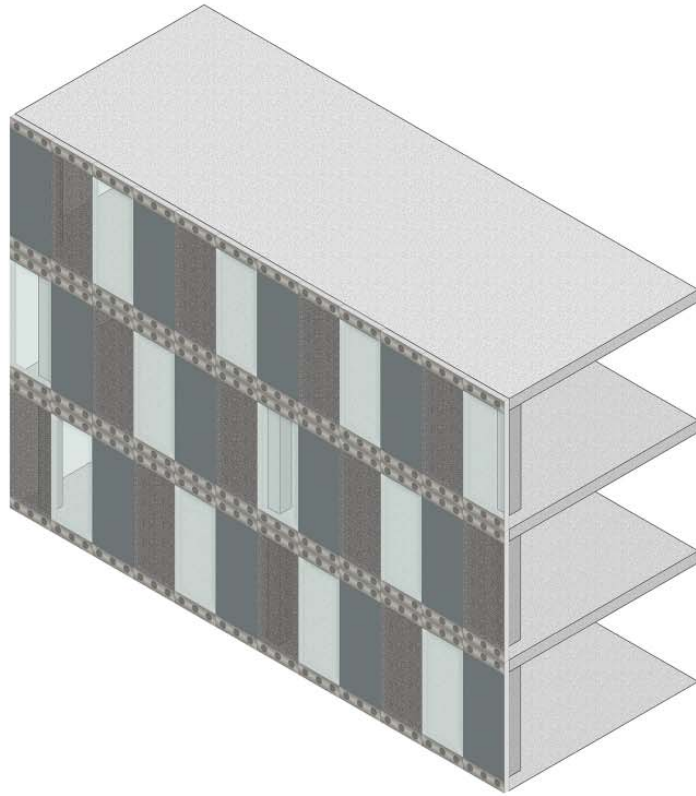


01+T1+S2

02+T1+S1

E.2 POSSIBILI SOLUZIONI DI FACCIATA

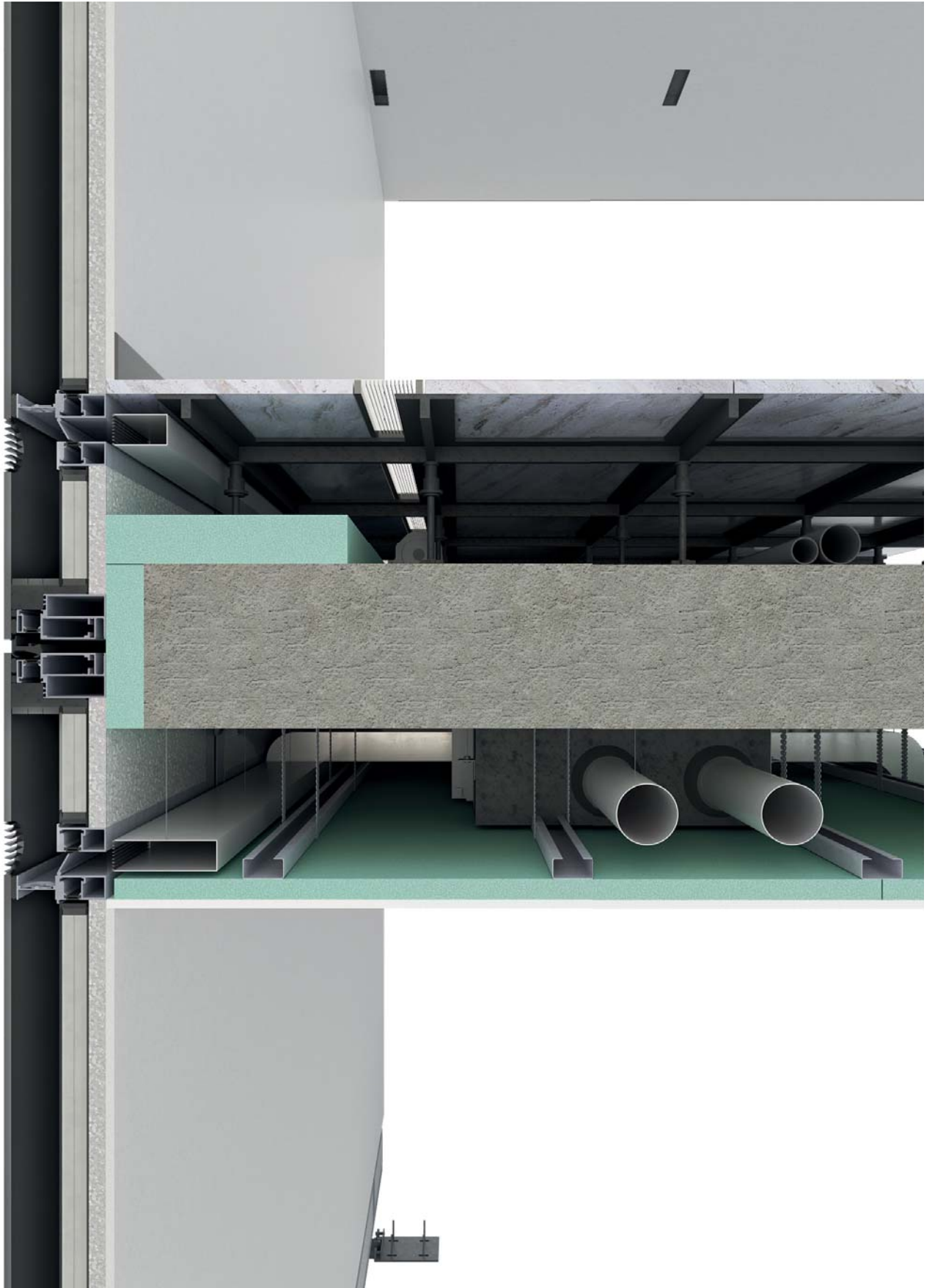


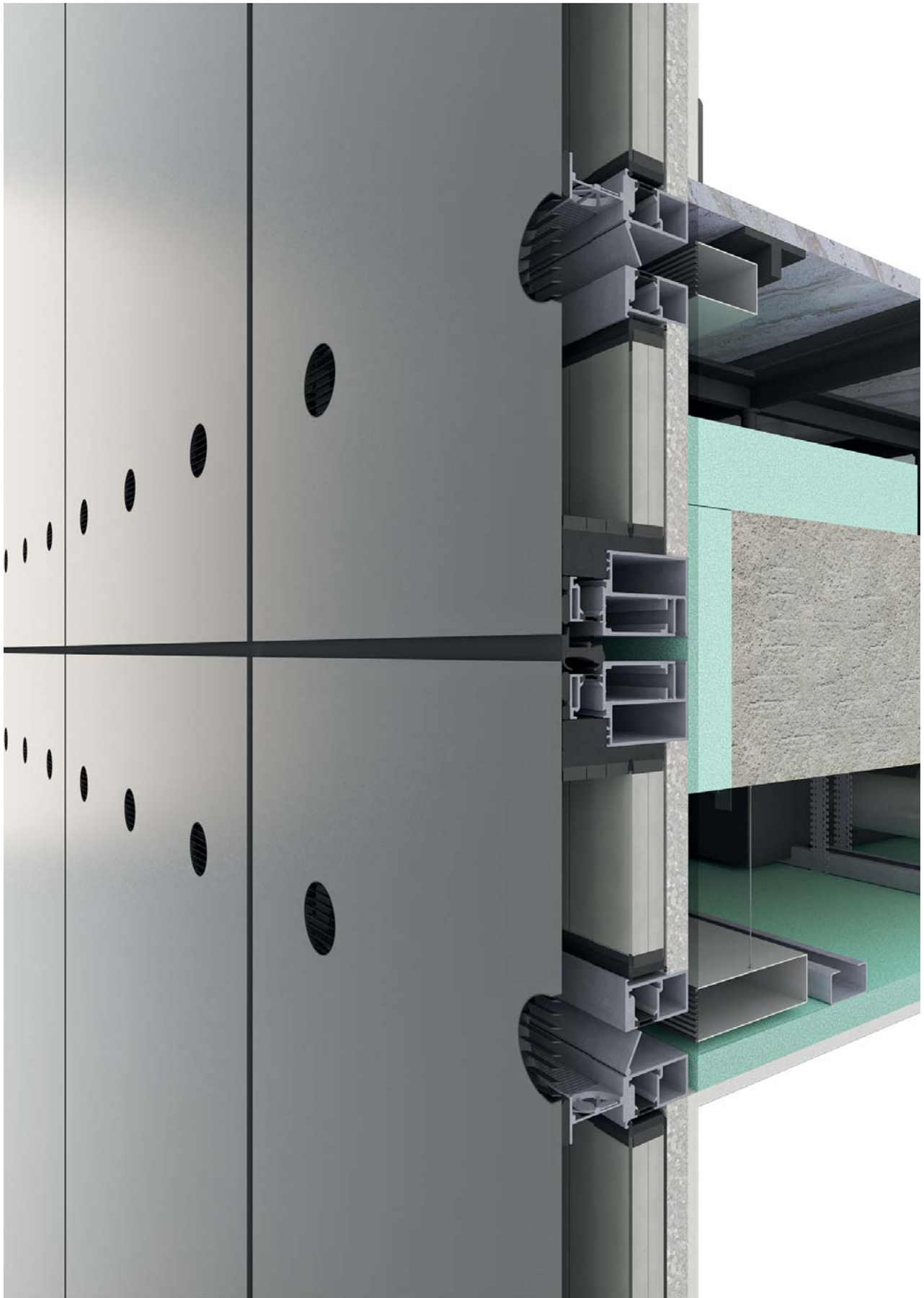


E.3

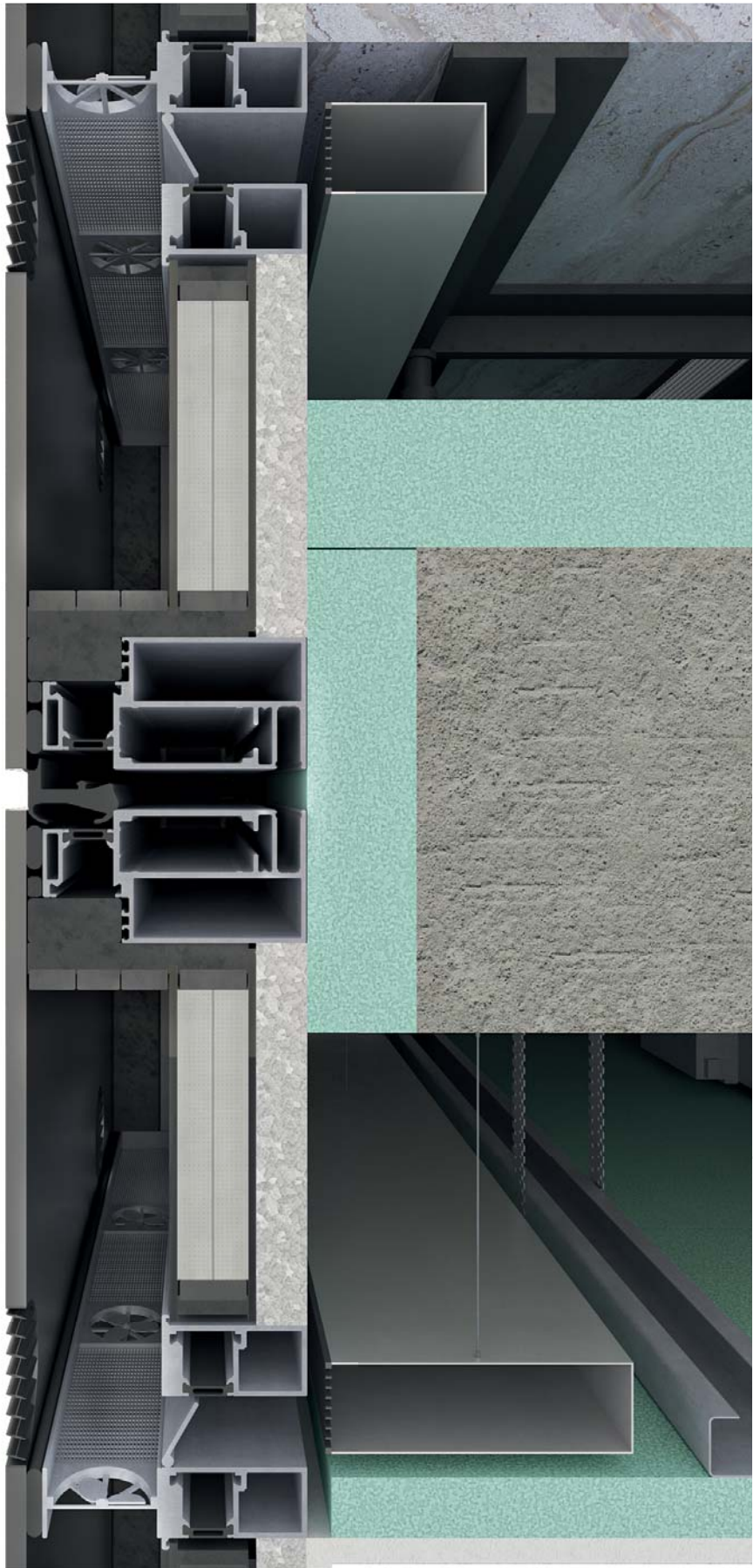
VISTE DI DETTAGLIO











Bibliografia

AA. VV., Manuale pratico di edilizia sostenibile, Esselibri, Napoli, 2008.

AA.VV., Liber Pontificalis, vol. I, pag 419, Ed. Duchesne, XVII secolo, Roma

ALCOA, Aluminum on the Skyline, Pittsburgh, 1953.

AL TOMONTE S., L'involucro architettonico come interfaccia dinamica. Strumenti e criteri per un'architettura sostenibile, prefazione di Giorgio Peguiron, Editrice Alinea, Firenze, 2004.

ANDREOTTI G., Genesi e generazione delle facciate a doppio involucro. analisi critica dei sistemi disponibili in riferimento allo stato attuale delle conoscenze, Dottorato Di Ricerca in Tecnologia XIV Ciclo, Università degli Studi di Firenze

ANTONINI E., Materiali Complessi, in Materia n. 58, 2008.

ARGIOLAS C., Tecnologie per l'involucro, C.U.E.C., Cagliari, 2001.

BAZZOCCHI F. (a cura di), Le facciate ventilate. Architettura, prestazioni e tecnologie, Alinea, Firenze, 2006

BENHAM R., The Architecture of the Well – Tempered Environment, Architectural Press, Londra, 1969.

BROWELL B., Materiali complessi nell'architettura, in Materia n. 58, 2008.

BROOKES A J., MEIJS M, Cladding of Buildings, Taylor & Francis, Oxon, 2008

CAMPIOLI A., Il contesto del progetto. Il costruire contemporaneo tra sperimentalismo high-tech e diffusione delle tecnologie industriali, FrancoAngeli, Milano, 1993.

CATURANO U., (a cura di), Le tecnologie dei materiali tra progetto e innovazione, Franco Angeli, Milano, 1996.

DAVIES M., A wall for all seasons, 1981.

DE DOMINICIS E., Questioni di pelle, Costruire, n°95, 1991.

DE PASCALIS S., Progettazione Bioclimatica, Dario Flaccovio Editore s.r.l, Palermo 2005.

DEL NORD R., FELLI P., TORRICELLI M.C., Materiali e Tecnologie dell'Architettura, Laterza, Bari, 2005.

DI SALVO S., Adaptive Materials Research for Architecture. Special topic volume with invited peer reviewed papers only., Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, 2018.

FERRARI M., Facciate continue: progettare la sicurezza, Frames, n°108, Febbraio-Marzo, 2004.

FILIPPI M., "L'involucro edilizio: passivo, attivo o ibrido?", da Progettare l'involucro edilizio: correlazioni tra il sistema edificio ed i sistemi impiantistici, Aicarr, 2001.

FRAMPTON K., Costruzioni Pesanti e leggere: riflessioni sul futuro della forma

architettonica, in lotus 99, 1999.

GANGEMI V. (a cura di), Emergenza ambiente: teorie e sperimentazioni della progettazione ambientale, Clean edizioni, Napoli, 2001.

GONZALO R., HABERMANN, K. J, Energy-efficient architecture. Basics for planning and construction, Birkhauser, Basel – Boston – Berlin, 2006.

HAUSLADEN G., DE SALDANHA M., LIEDL P., SAGER C., ClimateDesign: Solutions for Buildings that Can Do More with Less Technology, Hardcover, 2005.

HAUSLADEN G., DE SALDANHA M., LIEDL P., ClimateSkin: Building-skin Concepts that Can Do More with Less Energy, Hardcover, 2008.

HEGGER M., AUCH-SCHWELK V., Atlante dei materiali. Utet scienze tecniche – Milano, 2005

HEGGER M., FUCHS M., STARK T., ZEUMER M., Atlante della sostenibilità e della efficienza energetica degli edifici, UTET, 2008.

HERZOG T., KRIPPNER R., LANG W., Atlante delle facciate, Utet, Torino, 2005.

IMPERADORI M., Inerzia termica senza massa, Frames in 143, novembre -dicembre 2009.

KALTENBACH F., Translucent materials: glass, plastics, metals, Birkhäuser, Basilea 2004.

KNAACK U., KLEIN T., MARCEL BILOW M., AUER T. Façades. Principles of Construction, Birkhäuser Verlag AG, Berlin, 2007.

LOSCO G., Design e nuovi materiali, Rdesignpress, Roma, 2010.

LUIBLE A., GOSZTONYI S. (a cura di), Facade 2018 - adaptive!, TU Delft Open, Lucerne, 2018.

MANZINI E., Lo sviluppo di prodotti sostenibili, Maggioli, Rimini 1998.

MAZRIA E., Sistemi solari passivi, Franco Muzzio & C., Padova 1980.

MICHAEL STACEY ARCHITECTS, Aluminium and Durability, Nottingham, Cwningen Press, 2014.

MOURTZOUCHE M., Multi-functional Facade. Module for different climate conditions, Delft University of Technology, 2014.

NARDI G., Tecnologia dell'architettura e industrializzazione nell'edilizia, Franco Angeli, Milano, 1982.

OLGYAY V., Progettare con il clima: un approccio bioclimatico al regionalismo architettonico, Franco Muzzio Editore, Padova 1990.

PAGANIN G., Facciate leggere, Sistemi Editoriali, Napoli, 2009.

PERAGO A., "Progettare le chiusure verticali", Maggioli Editore – Santarcangelo di Romagna (RN), 2006.

ROMANO R., Smart Skin Envelope integrazione architettonica di tecnologie dinamiche e innovative per il risparmio energetico, Firenze University Pres, 2011.

ROSSI M., Prodotti e sistemi di involucro innovativi per il progetto di edifici energeticamente efficienti. Procedure, simulazioni termodinamiche e criteri progettuali per un'applicazione

nel Sud Europa”, Edizioni Simple – Macerata, 2009

TUCCI F., Involucro ben temperato. Efficienza energetica ed ecologica in architettura attraverso la pelle degli edifici, Alinea editrice, Firenze, 2006.

SANDAK A., SANDAK J., BRZEZICKI M., KUTNAR A., Bio-based Building Skin, Springer open, Hong Kong, 2019.

SINOPOLI N., TATANO V. (a cura di), Sulle tracce dell'innovazione tra tecnica e architettura, Franco Angeli srl, Milano, 2002.

SULZER P., Jean Prouvé, opere complete, Birkhäuser, Basilea, 1999-2008.

SZOKOLAY V. S., “Introduzione alla progettazione sostenibile”, Editore Hoepli – Milano, 2010.

TILLMANN K., Integral Façade Construction. Towards a new product architecture for curtain walls, abe.tudelft.nl, Delft, 2013.

VIVIANI N., Design di involucri ad alta efficienza energetica, Dottorato di ricerca in Architettura e Design, Ciclo XXIV, Università degli Studi di Camerino.

WATTS A., Modern construction envelopes, Springer, Wien, 2010.

WILQUIN H., Atlante dell'alluminio, Utet, Torino, 2003.

WIGGINTON M., HARRIS J., Intelligent Skin, Architecture Press, Oxford, 2002.

WEIDLINGER PETER, WEIDLINGER J., WEIDLINGER PAUL, Aluminum in Modern Architecture, Reynolds Metals Co. Louisville, KY, 1956.

ZAMBELLI P., L'involucro architettonico tra forma e tecnologia, Tesi di dottorato di ricerca in Tecnologia dell'Architettura e dell'Ambiente, Politecnico di Milano, 1994.

ZARDINI M., Pelle, muro, facciata, Lotus, n°82, 1984, pp. 39-45.

ZEMELLA G., FARAGUNA A., Evolutionary Optimisation of Façade Design. A New Approach for the Design of Building Envelopes, Springer, Londra 2014.

Direttive, leggi e norme di riferimento

Direttive europee

REGOLAMENTO DI ESECUZIONE (UE) 2020/2156 DELLA COMMISSIONE del 14 ottobre 2020 che specifica le modalità tecniche per l'attuazione efficace di un sistema comune facoltativo a livello di Unione per valutare la predisposizione degli edifici all'intelligenza (Testo rilevante ai fini del SEE)

REGOLAMENTO DELEGATO (UE) 2020/2155 DELLA COMMISSIONE del 14 ottobre 2020 che integra la direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio istituendo un sistema comune facoltativo dell'Unione europea per valutare la predisposizione degli edifici all'intelligenza (Testo rilevante ai fini del SEE)

RACCOMANDAZIONE (UE) 2019/1658 DELLA COMMISSIONE del 25 settembre 2019 relativa al recepimento degli obblighi di risparmio energetico a norma della direttiva sull'efficienza energetica.

RACCOMANDAZIONE (UE) 2019/1659 DELLA COMMISSIONE del 25 settembre 2019 sul contenuto della valutazione globale del potenziale dell'efficienza per il riscaldamento e il raffreddamento ai sensi dell'articolo 14 della direttiva 2012/27/UE

RACCOMANDAZIONE (UE) 2019/1660 DELLA COMMISSIONE del 25 settembre 2019 concernente l'attuazione delle nuove disposizioni in materia di contabilizzazione e fatturazione della direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica

RACCOMANDAZIONE (UE) 2019/1019 DELLA COMMISSIONE del 7 giugno 2019 sull'ammodernamento degli edifici

RACCOMANDAZIONE (UE) 2019/786 DELLA COMMISSIONE, dell'8 maggio 2019, sulla ristrutturazione degli edifici [notificata con il numero C(2019) 3352]

REGOLAMENTO (UE) 2018/1999 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO dell'11 dicembre 2018 sulla governance dell'Unione dell'energia e dell'azione per il clima che modifica le direttive (CE) n. 663/2009 e (CE) n. 715/2009 del Parlamento europeo e del Consiglio, le direttive 94/22/CE, 98/70/CE, 2009/31/CE, 2009/73/CE, 2010/31/UE, 2012/27/UE e 2013/30/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, le direttive del Consiglio 2009/119/CE e (UE) 2015/652 e che abroga il regolamento (UE) n. 525/2013 del Parlamento europeo e del Consiglio

DIRETTIVA (UE) 2018/2001 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO dell'11 dicembre 2018 sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili

DIRETTIVA (UE) 2018/2002 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO dell'11 dicembre 2018 che modifica la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica

DIRETTIVA (UE) 2018/844 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 30 maggio 2018 che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica

DIRETTIVA (UE) 2006/32/CE del 5 aprile 2006 concernente l'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici.

DIRETTIVA (UE) 2002/91/CE del 16 dicembre 2002 sul rendimento energetico in edilizia.

DIRETTIVA (UE) 2001/77/CE del 27 settembre 2001 sulla promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno dell'elettricità.

DIRETTIVA (UE) 93/76/CEE del 13 settembre 1993 intesa a limitare le emissioni di biossido di carbonio migliorando l'efficienza energetica (SAVE).

DIRETTIVA (UE) 89/106/CEE del 21 dicembre 1988 relativa al ravvicinamento delle disposizioni legislative, regolamentari e amministrative degli Stati Membri concernenti i prodotti da costruzione, l'edificio e i relativi impianti di riscaldamento, condizionamento e areazione.

Leggi nazionali

DECRETO LEGISLATIVO 10 GIUGNO 2020 n.48

Attuazione della direttiva (UE) 2018/844 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 30 maggio 2018, che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica

DECRETO INTERMINISTERIALE 26 GIUGNO 2015 - LINEE GUIDA
Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici”, ai sensi dell’articolo
articolo 6, comma 12, del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, con relativo allegato
1 e rispettive appendici A, B, C e D all’allegato 1 stesso.

DECRETO INTERMINISTERIALE 26 GIUGNO 2015 - REQUISITI MINIMI
Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione
delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici

DECRETO INTERMINISTERIALE 26 GIUGNO 2015 - RELAZIONE TECNICA DI PROGETTO
Schemi e modalità di riferimento per la compilazione della relazione tecnica di progetto
ai fini dell’applicazione delle prescrizioni e dei requisiti minimi di prestazione energetica
negli edifici

D. L. 4 GIUGNO 2013 N.63, COORDINATO CON LA LEGGE DI CONVERSIONE 3 AGOSTO
2013 N.90
Disposizioni urgenti per il recepimento della Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo
e del Consiglio del 19 maggio 2010.

DECRETO LEGISLATIVO 3 MARZO 2011 N. 28.
Attuazione della Direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell’uso dell’energia da fonti
rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e
2003/30/CE

DIRETTIVA 2010/31/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO DEL 19 MAGGIO
2010
Direttiva sulla prestazione energetica nell’edilizia

DECRETO LEGISLATIVO 29 MARZO 2010 N. 56.
Modifiche ed integrazioni al decreto 30 maggio 2008, n. 115, recante attuazione della
direttiva 2006/32/CE, concernente l’efficienza degli usi finali dell’energia e i servizi
energetici e recante abrogazioni della direttiva 93/76/CEE.

MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO. Decreto 26 marzo 2010
Modalità di erogazione delle risorse del Fondo previsto dall’articolo 4 del decreto-legge
25 marzo 2010, n. 40, per il sostegno della domanda finalizzata ad obiettivi di efficienza
energetica, ecocompatibilità e di miglioramento della sicurezza sul lavoro (decreto
attuativo del D.L. 25/3/10).

CONSIGLIO NAZIONALE DEL NOTARIATO. Studio n. 334-2009/C.
La certificazione energetica degli edifici dal 1° luglio 2009

MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO. Decreto 26/6/2009.
Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici

DECRETO DEL PRESIDENTE DELLA REPUBBLICA 2 APRILE 2009 N. 59
Regolamento di attuazione dell’art. 4, c. 1, lettere a) e b) del D. Lgs. 19 agosto 2005,
n. 192 concernente attuazione della Direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in
edilizia.

DECRETO LEGISLATIVO 30 MAGGIO 2008 N. 115.
Attuazione della direttiva 2006/32/CE relativa all’efficienza degli usi finali dell’energia e
i servizi energetici e abrogazione della direttiva 93/76/CEE.(testo coordinato con il D.Lgs.
56/10)

LOMBARDIA – DELIBERAZIONE GIUNTA REGIONALE 26 GIUGNO 2007 N. 8/5018.

Determinazioni inerenti la certificazione energetica degli edifici, in attuazione del D. Lgs. 192/2005 e degli artt. 9 e 25 l. r. 24/2006.

MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO Decreto 19 febbraio 2007.

Criteri e modalità per incentivare la produzione di energia elettrica mediante conversione fotovoltaica della fonte solare, in attuazione dell'articolo 7 del decreto legislativo 29 dicembre 2003 n. 387 ("decreto fotovoltaico").

DIRETTIVA 2006/32/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO DEL 5 APRILE 2006

Concernente l'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e recante abrogazione della direttiva 93/76/CEE del Consiglio.

DECRETO LEGISLATIVO 29 DICEMBRE 2006 N. 311.

Disposizioni correttive e integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005 n. 192 recante attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia.

DECRETO LEGISLATIVO 3 APRILE 2006 N. 152.

Norme in materia ambientale.

DECRETO LEGISLATIVO 19 agosto 2005, n.192

Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia.

MINISTERO DELLE ATTIVITA' PRODUTTIVE Decreto 20 luglio 2004.

Nuova individuazione degli obiettivi quantitativi per l'incremento dell'efficienza energetica negli usi finali di energia, ai sensi dell'art. 9, comma 1, del decreto legislativo 16 marzo 1999, n. 79.

Nuova individuazione degli obiettivi quantitativi nazionali di risparmio energetico e sviluppo delle fonti rinnovabili, di cui all'art. 16, comma 4, del decreto legislativo 23 maggio 2000, n. 164.

DECRETO LEGISLATIVO 29 DICEMBRE 2003 N. 387

Attuazione della direttiva 2001/77/CE relativa alla promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno dell'elettricità

DIRETTIVA 2002/91/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO DEL 16 DICEMBRE 2002

Sul rendimento energetico nell'edilizia.

DECRETO DEL PRESIDENTE DELLA REPUBBLICA 21 DICEMBRE 1999 N. 551

Regolamento recante modifiche al D.P.R. 26/8/1993 n. 412 in materia di progettazione, installazione, esercizio e manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia.

REGOLAMENTO (CEE) N. 1836/93 DEL CONSIGLIO DEL 29 GIUGNO 1993

Sull'adesione volontaria delle imprese del settore industriale a un sistema comunitario di ecogestione e audit.

DECRETO DEL PRESIDENTE DELLA REPUBBLICA 26 AGOSTO 1993 N. 412.

Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4 della legge 9 gennaio 1991 n. 10. (testo coordinato).

Allegato A. Tabella dei gradi giorno dei Comuni italiani raggruppati per Regione e Provincia.

LEGGE 9 GENNAIO 1991 N. 10

Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia.

Decreti del Presidente della Repubblica

DPR 303/1956

Norme UNI, ISO ed EN

Specifiche tecniche approvate da un organismo riconosciuto e appartenenti ad una o a più delle seguenti categorie:

UNI - Norme nazionali elaborate direttamente dalle Commissioni UNI (Ente Nazionale Italiano di Unificazione) o dagli Enti Federati.

ISO - Norme internazionali elaborate dall'ISO (International Organization for Standardization).

EN - Norme europee elaborate dal CEN (Comitè Européen de Normalisation) e obbligatoriamente recepite dai Paesi membri CEN.

Classi di esigenze e qualità

UNI 8289:1981

Edilizia. Esigenze dell'utenza finale. Classificazione.

UNI EN ISO 9000:2005

Sistemi di gestione per la qualità - Fondamenti e vocabolario.

Prestazioni energetiche degli edifici

UNI EN 832:2001

Prestazione termica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento - Edifici residenziali.

UNI/TS 11300-1:2008 Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1:

Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale.

UNI/TS 11300-2:2008

Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2:

Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria.

UNI EN ISO 13790:2008

Prestazione energetica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento.

UNI EN 15251:2008

Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica.

Benessere termico

UNI 10344:1993

Riscaldamento degli edifici. Calcolo del fabbisogno di energia.