

PREMIO FIRENZE UNIVERSITY PRESS
TESI DI DOTTORATO

- 23 -

COLLANA PREMIO TESI DI DOTTORATO
Commissione giudicatrice, anno 2010

Luigi Lotti, *Facoltà di Scienze Politiche* (Presidente della Commissione)

Fortunato Tito Arecchi, *Facoltà di Scienze MFN*

Vincenzo Collotti, *Facoltà di Lettere e Filosofia*

Paolo Felli, *Facoltà di Architettura*

Ada Fonzi, *Facoltà di Psicologia*

Pelio Fronzaroli, *Facoltà di Lettere e Filosofia*

Roberto Genesio, *Facoltà di Ingegneria*

Ferrando Mantovani, *Facoltà di Giurisprudenza*

Mario Pio Marzocchi, *Facoltà di Farmacia*

Salvo Mastellone, *Facoltà di Scienze della Formazione*

Adolfo Pazzagli, *Facoltà di Medicina e Chirurgia*

Giancarlo Pepeu, *Facoltà di Medicina e Chirurgia*

Franco Scaramuzzi, *Facoltà di Agraria*

Piero Tani, *Facoltà di Economia*

Fiorenzo Cesare Ugolini, *Facoltà di Agraria*

Rosa Romano

Smart Skin Envelope

Integrazione architettonica di tecnologie dinamiche e innovative
per il risparmio energetico

Firenze University Press
2011

Smart Skin Envelope : Integrazione architettonica di tecnologie dinamiche e innovative per il risparmio energetico / Rosa Romano. – Firenze : Firenze University Press, 2011.

(Premio FUP. Tesi di dottorato ; 23)

<http://digital.casalini.it/9788866550495>

ISBN 978-88-6655-047-1 (print)

ISBN 978-88-6655-049-5 (online)

In copertina:

Morphosis, Cooper Union, New York, 2008. Dettaglio della facciata sulla hall di ingresso.

© 2011 Firenze University Press
Università degli Studi di Firenze
Firenze University Press
Borgo Albizi, 28
50122 Firenze, Italy
<http://www.fupress.com/>

Printed in Italy

Indice

Presentazione , di Marco Sala	XI
Introduzione	
I. Collocazione scientifica della ricerca	XIII
I.a. Aree scientifico-disciplinari interessate dalla ricerca	XIII
I.b. Settori scientifico-disciplinari interessati dalla ricerca	XIII
II. Base di partenza scientifica nazionale o internazionale	XV
II.a. Stato dell'arte: quadro di riferimento e campo d'indagine	XV
II.b. Delimitazione del problema scientifico	XVI
III. Obiettivi generali e specifici della ricerca	XVIII
IV. Metodologia e strumenti	XIX
V. Attività di ricerca	XXI
V.a. Fase istruttoria	XXI
V.b. Fase di analisi	XXI
V.c. Fase propositiva	XXV
V.d. Verifiche	XXVI
VI. Possibili sviluppi futuri della ricerca in post dot, possibili enti finanziatori ulteriori	XXVII
Capitolo 1	
Sostenibilità ambientale e involucro edilizio	1
1.1. Normativa internazionale	8
1.2. Normativa italiana	13
1.3. Il mercato dell'involucro edilizio in Italia. Situazione attuale e prospettive di crescita	18
Conclusioni	20
Capitolo 2	
Involucro architettonico dinamico	23
2.1. Evoluzione delle prestazioni dell'involucro architettonico	23
2.2. Involucro come sistema attivo	30
2.2.1. Termodinamico	31
2.2.2. Involucro come "pelle" e "membrana"	43
2.2.3. L'architettura fra trasparenza e virtualità: l'edificio "mediatico"	50
Conclusioni	53

Capitolo 3

Facciate doppia pelle trasparente	57
3.1. Sistemi di facciata a doppia pelle	63
3.2. Classificazione	65
3.3. Struttura, connessioni e tecniche di montaggio	75
3.4. La ventilazione naturale	82
3.5. Sistemi meccanici di ventilazione dell'intercapedine	85
3.6. Isolamento termico	89
3.6.1. Normativa tecnica di riferimento	96
3.7. Isolamento acustico	102
3.8. Illuminazione naturale	106
3.9. Protezione dal fuoco	108
3.9.1. Normativa tecnica di riferimento	112
Conclusioni	112

Capitolo 4

Superfici trasparenti innovative	117
4.1. La ricerca e l'evoluzione dei componenti vetrati	121
4.1.1. Isolamento termico	124
4.1.2. Isolamento acustico	130
4.1.3. Sicurezza	132
4.1.4. Le finiture superficiali	133
4.2. Materiali trasparenti innovativi	134
4.2.1. Attivi: Fotovoltaici, Elettrocromoci, fotocromatici	134
4.2.2. Passivi: Prismatici, olografici, a selettività angolare	142
4.2.3. Altamente prestazionali: TIM, Aereogel, PCM	145
Conclusioni	153

Capitolo 5

Concept di un nuovo componente dinamico	157
5.1. Premesse metodologiche	157
5.2. Caratteristiche tecnologiche	163
5.3. La pelle interna	166
5.3.1. Elementi della sottostruttura portante	166
5.3.2. Serramenti apribili a battente	167
5.3.3. Tamponamento in alluminio coibentato	169
5.3.4. Tamponamento in vetro	171
5.4. L'intercapedine	172
5.4.1. Accessori	172
5.4.2. Serramenti scorrevoli	174
5.4.3. Il sistema di schermatura	176
5.5. La pelle esterna	177
5.5.1. Elementi della sottostruttura portante	177
5.5.2. L'impianto fotovoltaico	177

5.6. Requisiti prestazionali	181
5.6.1. Sicurezza strutturale	182
5.6.2. Benessere	184
5.6.3. Durabilità	186
5.6.4. Aspetto e fruibilità	187
5.6.5. Montaggio e manutenzione	188
Conclusioni	191
Capitolo 6	
Analisi delle prestazioni energetiche	195
6.1. Definizione del metodo di analisi sperimentale	195
6.2. Definizione del modello di test room virtuale. Caratteristiche termo igrometriche dei sistemi di tamponamento opaco e definizioni delle condizioni di esercizio	197
6.2.1. Analisi termo igrometrica delle chiusure opache verticali della test room virtuale	198
6.2.2. Analisi termo igrometrica del solaio di copertura della test room virtuale	199
6.2.3. Analisi termo igrometrica del solaio controterra della test room virtuale	200
6.3. Procedure e strumenti adottati	201
6.4. Analisi climatica	202
6.4.1 Dati climatici di MILANO	203
6.4.2 Dati climatici di FIRENZE	204
6.4.3 Dati climatici di PALERMO	205
6.5. Analisi termo-igrometrica	206
6.6. Simulazioni termodinamiche e calcolo del fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento ed il raffrescamento secondo il modello predeterminato	218
6.6.1. Monetizzazione del fabbisogno energetico per il riscaldamento ed il raffrescamento e calcolo della relativa CO ₂	219
6.6.2. Schede di analisi del fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento ed il raffrescamento	225
6.6.3. Valutazione dei risultati e individuazione delle criticità	250
6.7. Analisi del comfort visivo, con valutazione dell'illuminamento sul piano di lavoro secondo il modello predeterminato	254
6.7.1. Valutazione dei risultati e individuazione delle criticità	256
Conclusioni	259
Capitolo 7	
Conclusioni	271
Bibliografia	277

Ai miei genitori

Un caro ringraziamento va a chi in questi anni mi ha supportato e sopportato: i miei genitori; Milli, Melania, Silvia, Lorenzo e tutti i ricercatori del centro ABITA

Presentazione

La ricerca 'Smart Skin Envelope. Integrazione architettonica di tecnologie dinamiche e innovative per il risparmio energetico', sviluppata nell'ambito del Dottorato in Tecnologia dell'Architettura dell'Università di Firenze, indaga e analizza il concetto di dinamicità e interattività dell'involucro in chiave energetica mediante un'approfondita fase istruttoria e successivamente attraverso la progettazione e la verifica di un componente integrato di facciata.

La tesi affronta l'analisi delle incredibili potenzialità offerte dall'integrazione dei 'materiali intelligenti' applicati a soluzioni d'involucro, con particolare riferimento alle innovazioni dei sistemi a doppia pelle in vetro per climi mediterranei, di cui vengono forniti riferimenti normativi e nuovi sistemi di calcolo.

La ricerca si riallaccia al filone di studi internazionali sul tema degli involucri di facciata evoluti e degli edifici intelligenti, proponendo una metodologia di indagine che ha permesso di sviluppare l'iter scientifico da una fase teorica ad una fase applicativa, attraverso la stesura e realizzazione di un nuovo componente tecnologico di facciata capace di contenere il consumo energetico degli edifici, nuovi ed esistenti, e di limitare, conseguentemente, l'impatto ambientale degli stessi durante tutto il loro ciclo di vita, rispondendo in tal senso, anche a quanto sancito dalla della Direttiva Europea 2002/91 EPBD.

Le metodologie adottate, applicate nella fase di indagine, sono state efficacemente finalizzate al raggiungimento del risultato ed hanno permesso di valutare la complessità dei sistemi dinamici in relazione alla complessità delle loro caratteristiche di funzionamento, in termini di: automazione; possibilità di integrare tecnologie per la produzione di energia da fonti rinnovabili; utilizzo di materiali innovativi; prestazioni qualitative rispetto all'immagine generale dell'edificio; declinabilità del sistema; peculiarità in merito al risparmio energetico e alla riduzione dell'impatto ambientale.

La tesi di dottorato si distingue, infatti, per la capacità di affiancare al momento di analisi teorico sperimentale una fase propositiva e realizzativa dei risultati raggiunti attraverso la messa a punto di un prototipo altamente innovativo che ha permesso di valutare gli aspetti legati al design, alle problematiche di carattere tecnologico ed alle prestazioni raggiungibili in termini energetici dai componenti di facciata complessi. La tesi è esemplare per la volontà di affrontare le problematiche legate alla ricerca sperimentale in campo industriale, riuscendo a concretizzare il trasferimento tecnologico dal settore scientifico disciplinare di competenza al settore produttivo coinvolto per la stesura del prototipo, creando una sinergia positiva tra i vari soggetti coinvolti nella fase di elaborazione della ricerca scientifica, sinergia che si è concretizzata nella sperimentazione e prototipazione di un componente di facciata innovativo.

I risultati della ricerca, legati alla necessità di costruire un modello di valutazione che permettesse di misurare le prestazioni raggiunte dal componente di facciata innovativo, sono interessanti e analizzate con senso critico e permettono di individuare tematiche che potranno essere oggetto di approfondimenti scientifici successivi.

La tesi costituisce, quindi, un valido strumento metodologico di comprensione e valutazione dei sistemi ventilati a secco con particolare riferimento alle potenzialità legate ai meccanismi di controllo hardware, che consentono alla 'pelle' di trasformarsi in uno strato attivo e dinamico, in grado di reagire ed auto-regolarsi in modo 'intelligente' in base ai cambiamenti climatici.

I materiali 'smart' e 'nanomodificati' sono oggi di grande attualità ed interesse internazionale. Nonostante questo, la tesi offre un'interpretazione inedita della letteratura tecnologica esistente fino alla realizzazione di un prototipo in grado di essere utilizzato come componente seriale per involucri evoluti, mirati al contenimento dei consumi, senza comprometterne la valenza estetico - formale.

Marco Sala
Direttore del Centro Interuniversitario ABITA

Introduzione

I. Collocazione scientifica della ricerca

I.a Aree scientifico-disciplinari interessate dalla ricerca

La volontà di sviluppare una ricerca sui Sistemi di Facciata 'Intelligente' nasce dall'intenzione di analizzare la recente evoluzione registrata nel settore della progettazione e della produzione di elementi di facciata costituiti da layer dinamici, in funzione dell'esigenza di individuare i parametri tecnologici, funzionali, qualitativi e prestazionali che guidano le scelte degli attori del processo e li spingono a sviluppare soluzioni e proposte finalizzate a trasformare l'involucro dell'edificio da elemento statico ad elemento dinamico, capace di interagire, attraverso l'interoperabilità dei suoi componenti, con gli input dell'ambiente interno ed esterno, rispetto al quale l'involucro è collocato come sistema di confine e delimitazione.

La ricerca si colloca nell'area scientifico disciplinare DELL'INGEGNERIA CIVILE E ARCHITETTURA, individuata come settore di ricerca relativo non solo agli studi dell'oggetto architettonico, ma anche dei processi e dei metodi, sia materiali che immateriali, che conducono alla realizzazione dell'edificio, inteso come insieme di componenti e sistemi. L'indirizzo scientifico dell'area disciplinare induce a pensare al momento della ricerca come indispensabilmente legato ai concetti di: invenzione, esplorazione, intenzione, creazione; suggerendo un approccio al tema che porti alla formulazione di una proposta innovativa come sintesi delle valutazioni e delle indagini che saranno sviluppate durante il periodo di elaborazione della ricerca stessa.

I.b Settori scientifico-disciplinari interessati dalla ricerca

I settori scientifico disciplinari interessati dalla Ricerca sono:

- ICAR/12 TECNOLOGIA DELL'ARCHITETTURA

Inteso come settore scientifico disciplinare che si occupa di approfondire le tematiche legate a teorie, strumenti e metodi rivolti ad un'architettura sperimentale alle diverse scale, fondata sull'evoluzione degli usi insediativi, della concezione costruttiva e ambientale, nonché delle tecniche di trasformazione e manutenzione dell'ambiente costruito.

In particolare la ricerca affronta, nel settore dei componenti di facciata "evoluti", l'approfondimento relativo allo studio dei sistemi di movimento e variabilità del sistema di chiusura, lo studio di materiali innovativi, l'analisi di tecnologie di progetto già avviate, l'indagine dell'innovazione di processo e della produzione edilizia, le dinamiche esigenti, gli aspetti prestazionali ed i controlli di qualità necessari sia per valutare lo stato dell'arte, sia per proporre nuove soluzioni di integrazione architettonica di componenti "energeticamente" intelligenti.

Sono oggetto di studio, della ricerca i componenti di facciata innovativi e speri-

mentali, rispetto ai quali risulta indispensabile valutare nel corso del periodo di analisi e sviluppo dell'indagine scientifica, gli aspetti tecnologici legati alla progettazione, realizzazione e diagnostica, allo scopo di individuare i processi connessi alla produzione edilizia, che portano alla realizzazione di componenti che esprimono compatibilità tra finalità progettuali, prescrizioni normative, controlli di qualità e prestazioni, garanzie di sicurezza e di manutenzione.

- ING-IND/11 FISICA TECNICA AMBIENTALE

Inteso come settore scientifico disciplinare che si occupa di approfondire gli aspetti fondamentali ed applicativi della termo-fluido-dinamica, della trasmissione del calore, dell'energetica, dell'illuminazione e dell'acustica applicata sia negli ambiti dell'ingegneria industriale, civile ed ambientale sia negli ambiti della pianificazione territoriale, dell'architettura e del disegno industriale.

In particolare la ricerca si propone di analizzare le prestazioni fisico ambientali dei componenti di facciata "dinamici" in relazione alle problematiche legate alla termo fluido dinamica ambientale e dell'illuminotecnica. Le soluzioni proposte saranno valutate in relazione alla loro capacità di garantire il comfort indoor degli ambienti confinanti (comfort termico, qualità dell'aria, comfort visivo, comfort acustico); approfondendo la conoscenza delle metodologie necessarie a sviluppare una corretta analisi ambientale dei componenti (tecniche di rilevamento ed elaborazione dei dati ambientali). Valutando come i componenti siano relazionati a tecnologie passive e sistemi impiantistici per il soddisfacimento dei requisiti ambientali (climatizzazione, illuminazione ed acustica).

La ricerca si propone di affrontare i temi delle Tecnologie costruttive e dell'Innovazione di prodotto focalizzando l'attenzione sulle tematiche legate al settore tecnologico "Ambiente-Energia e Costruzione". Attualmente, infatti, i temi correlati alla sostenibilità ambientale ed al risparmio energetico, sono diventati settori di ricerca prioritaria e trasversale a tutte le aree disciplinari, così come indicato dagli enti di ricerca internazionale (CIB, PEBBU, ecc.) e come stabilito dalle normative in materia di risparmio energetico emanate dalla Commissione Europea e dal Parlamento Italiano.

L'introduzione dell'applicazione della Direttiva europea 2002/91 sul risparmio energetico, l'aumento dei costi energetici registrato negli ultimi anni, le elevate emissioni di CO₂, ha indotto sia la ricerca scientifica che industriale ad elaborare nuovi prodotti capaci di contenere il consumo energetico degli edifici e di limitare, conseguentemente, l'impatto ambientale degli stessi durante tutto il loro ciclo di vita.

La ricerca tecnologica nel settore dei componenti dinamici e dei materiali innovativi si sta sviluppando, in relazione alla necessità di avvicinarsi ed interagire in modo sinergico con altre aree disciplinari (ingegneria dei materiali, ingegneria energetica, chimica, fisica ambientale ecc) al fine di proporre soluzioni innovative capaci di rispondere alle esigenze di mercato, sempre più orientate verso prodotti che garantiscano molteplici prestazioni con una riduzione dei tempi e dei costi di produzione e realizzazione.

La terza rivoluzione industriale ha indotto, infatti, anche il settore tecnologico ad elaborare modelli di prodotto interoperabili e modificabili, che permettano una variazione della configurazione dei componenti rispetto a quella dell'oggetto, in modo da garantire sistemi adattabili alle esigenze dell'utenza globale.

La figura del progettista tecnologo deve in questo senso essere in grado di ricondurre alla fase progettuale il momento di ricerca, sviluppandolo e controllandolo conseguentemente nelle fasi di stesura e realizzazione del progetto (pianificazione e controllo), sia esso un edificio o un componente architettonico, garantendo in questo modo l'innovazione del processo e del manufatto prodotto.

II. Base di partenza scientifica nazionale o internazionale

II.a Stato dell'arte: quadro di riferimento e campo d'indagine

Il quadro di riferimento della ricerca in esame è l'analisi dell'evoluzione delle prestazioni dell'involucro architettonico da passivo ad attivo, indagando i processi tecnologici d'innovazione che hanno permesso di sviluppare il passaggio etimologico e prestazionale dal concetto di chiusura a quello di facciata ed infine a quello di involucro dinamico e intelligente.

La ricerca finalizzata all'impostazione della tesi di Dottorato, vuole inserirsi, infatti, nel variegato campo delle ricerche condotte nell'ultimo decennio sulle prestazioni energetiche dell'involucro architettonico, inteso come la globalità delle parti che definiscono un ambiente interno (caratterizzato da condizioni "climatico/ambientali" stabili) rispetto ad un ambiente esterno (variabile per natura).

Il sistema involucro è stato oggetto, negli ultimi anni, di molteplici ricerche di base ed applicate che hanno contribuito alla sua evoluzione, attraverso la sperimentazione di nuovi componenti e materiali caratterizzati da elevate prestazioni e performance. La sempre maggiore attenzione al problema della riduzione dei consumi energetici e del benessere ambientale ha generato una moltiplicazione degli elementi tecnici e funzionali che costituiscono l'involucro, che si trasforma da chiusura statica in stratificazione dinamica, in cui ciascuno strato contribuisce a soddisfare differenti aspetti di tipo climatico, acustico, energetico, ecc...¹

L'involucro si è lentamente evoluto da elemento barriera prevalentemente protettiva in complesso sistema-filtro selettivo e polivalente, in grado da una parte di ottimizzare le interazioni tra ambiente interno e macro-ambiente esterno (e viceversa) al mutare delle diverse condizioni climatico-ambientali nel corso della giornata, nel corso dell'anno, finanche nel corso della vita dell'organismo edilizio e/o dell'uomo che lo abita; dall'altro lato di rispondere sempre più spesso in senso "intelligente" agli stessi mutamenti psicologici, sociologici e culturali del modo di vivere i rapporti con tali fattori micro e macro ambientali da parte dei fruitori dell'architettura "involucrata".

Forma e funzione dell'involucro hanno registrato nel tempo un'evoluzione sostanziale sia nell'uso dei materiali (si è passati da involucri prevalentemente massivi, realizzati in materiale lapideo a involucri sempre più "leggeri, realizzati con superfici trasparenti) sia nelle prestazioni dei suoi componenti. Dal concetto di involucro come elemento energeticamente passivo, di separazione tra ambiente interno ed esterno, si passa al concetto di involucro come elemento dinamico e interattivo del complesso sistema energetico che regola il funzionamento dell'edificio e ne caratterizza l'immagine.

L'evoluzione tecnologica delle prestazioni energetiche dell'involucro architettonico è registrabile e percepibile attraverso la smaterializzazione delle superfici che lo costituiscono e l'automazione dei suoi elementi compositivi. Gli elementi opachi massivi di chiusura verticale e orizzontale vengono bucati da superfici trasparenti di dimensioni sempre maggiori, che in tempi recenti sostituiscono e costituiscono l'intero elemento di delimitazione architettonica.

L'uso sempre più frequente di superfici trasparenti per la realizzazione degli edifici

¹ Claudi de Saint Mihiel A., *Interattività degli involucri edilizi trasparenti e prestazioni di benessere ambientale*, in *La produzione industriale eco-orientata*, a cura di Antonio Passaro, Atti del Convegno Abitare Verde 2007, Luciano Editore, Napoli, 2007

si sviluppa a partire dalla fine del XIX secolo, in corrispondenza della rivoluzione industriale, e comporta lo sviluppo e la ricerca di nuovi materiali capaci di garantire prestazioni energetiche analoghe ai materiali tradizionali con cui per secoli sono stati realizzati gli edifici.

L'involucro si svincola dalla struttura portante dell'edificio e diviene elemento di chiusura chiamato a regolare prevalentemente i flussi energetici legati al passaggio di calore, alla trasmissione della luce per un'adeguata illuminazione degli ambienti interni ed alla protezione della radiazione solare nei mesi con le temperature più elevate. Le soluzioni tecnologiche e la scelta dei materiali si orientano verso quei sistemi tecnologici che riescono a governare tali scambi termici e luminosi, garantendo al contempo i requisiti estetici dettati dai nuovi linguaggi architettonici.

Parte dell'innovazione tecnologica legata alle prestazioni energetiche dell'involucro contemporaneo è dovuta alla realizzazione e adozione di nuovi materiali trasparenti suddivisi per caratteristiche in: passivi (pannelli prismatici, LCP, profili FISH, profili OKASOLAR, ecc), attivi (vetri cromogenici, vetri elettrocromici, vetri olografici, ecc) e ad alte prestazioni (aerogel, TIM, EFTE, PTFE).

In molti edifici contemporanei l'involucro è realizzato con sistemi di facciata che permettono di accumulare l'energia solare incidente e di trasformarla in calore per implementare il fabbisogno energetico invernale dell'edificio, in altri l'involucro diviene un vero e proprio elemento attivo di produzione di energia, grazie all'integrazione di sistemi tecnologici legati alle fonti energetiche rinnovabili (fotovoltaico e solare termico). Le chiusure verticali opache e trasparenti sono sviluppate come componenti tecnologiche complesse capaci di interagire con le condizioni ambientali a contorno, in grado di ridurre il fabbisogno energetico dell'edificio.

II.b Delimitazione del problema scientifico

La ricerca indaga e approfondisce le tematiche legate al concetto di dinamicità ed interattività dell'involucro in chiave energetica attraverso la conoscenza delle tematiche scientifiche legate all'evoluzione dei procedimenti costruttivi ed all'utilizzo di tecnologie e materiali avanzati per le chiusure o partizioni di facciata e dei sistemi informatici per la gestione delle prestazioni degli edifici, che hanno contribuito a portare un profondo cambiamento nella concezione del progetto e della sua realizzazione, producendo manufatti che interagiscono con l'ambiente e che si conformano variabilmente rispetto ad esso.

La ricerca, in particolare, analizza le potenzialità dell'involucro intelligente, riprendendo in tal senso la definizione data da R. Banham² di componente tecnologico avanzato, capace di gestire e regolare i flussi di energia materiali ed immateriali in ingresso ed in uscita dall'ambiente confinato, attraverso la regolazione di dispositivi fissi o ad assetto variabile (frangisole, apertura/chiusura di finestre, bocchette di ventilazione, ecc), o con controllo e regolazione manuale o automatica in relazione al tipo di utenza ed alla complessità dell'edificio.

L'involucro architettonico intelligente, adattivo e interattivo, è definito come un sistema di componenti progettate e realizzate per adattarsi come un vero e proprio essere vivente al variare delle condizioni ambientali esterne.

Nel campo dell'edilizia, infatti, lo sviluppo della ricerca scientifica, con il conseg-

2 Banham R., *The Architecture of the Well - Tempered Environment*, Architectural Press, Londra, 1969

uente utilizzo di tecnologie innovative, ha permesso di realizzare involucri trasparenti a prestazioni variabili – con SMART windows o altre soluzioni – che rispondono in modo innovativo ad esigenze di tipo qualitativo ambientale.

Gli involucri delle architetture contemporanee diventano schermo mediatico e integrano le più recenti tecnologie informatiche senza tralasciare gli aspetti sostenibili della progettazione, conformando architetture attente all'uso delle risorse energetiche ed ambientali. Coerentemente, il rapporto tecnologia-progetto architettonico amplia i propri orizzonti e si arricchisce di spunti, offrendo al progetto stesso le potenzialità tecnologiche come elementi direttamente rapportabili alla creatività, all'organizzazione, alla forma, al linguaggio, alle prestazioni.³

L'involucro, come "pelle" svolge il ruolo determinante di sistema dinamico di filtro ambientale, capace 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, ed in genere di assolvere una serie di prestazioni chiave che ne fanno l'elemento cardine di un processo globale di interazione eco - efficiente con i fattori ambientali naturali.⁴

Peter Hall⁵, si chiede cosa potrebbe accadere se un organismo architettonico potesse rispondere in tempo reale al movimento delle persone, al clima, alle sollecitazioni di molteplici utenti, alle installazioni di diversi artisti? La tecnologia ha messo a disposizione i mezzi per permettere ad un edificio di comunicare all'esterno, stiamo assistendo in questi ultimi anni alla ricerca di una forma di interattività tra questo ambiente esterno e l'edificio stesso, proprio come se questo possedesse una pelle vivente, capace di recepire informazioni e di riprodurle una volta elaborate.

La pelle come superficie di interfaccia tra due ambienti manifesta per Alessandro Claudi de Saint Mihiel⁶ il livello di contaminazione in atto: la "superficie limite" favorisce processi di osmosi, di interazione e di comunicazione fra gli ambienti in essa interfacciati.

La delimitazione dello spazio diventa commutazione e la separazione, un tempo rigida, grazie alle nuove tecnologie soft ed hard, diviene possibilità di transito di una continua attività di scambio.

L'architettura si muove alla ricerca di pelli strutturali che incorporino già le ossa o di strutture che avvolgano il volume di un edificio, proprio come un involucro (si possono citare in tal senso le esperienze progettuali di Toyo Ito, Herzog & de Muron, Jan Nouvel, ecc).

Oggi che gli architetti hanno la possibilità di realizzare superfici complesse, le modalità attraverso cui il corpo umano modifica gli stati bidimensionali dei tessuti degli indumenti, attraverso il movimento diventano elemento di ricerca per l'involucro degli organismi architettonici.⁷ La pelle degli edifici, come sottolinea lo stesso Toyo Ito, deve funzionare come un sensore altamente ricettivo per intercettare i flussi di elettroni e di energia in esso passanti. L'architettura epidermide deve essere morbida e flessibile come la nostra pelle e capace di scambiare informazioni con il mondo esterno.

3 Losasso M., Introduzione, in M. Losasso (a cura di), *Progetto e Innovazione. Nuovi scenari per la costruzione e la sostenibilità del Progetto architettonico*, Clean, Napoli, 2005

4 Colafranceschi D., 1996, *Sull'involucro in architettura Herzog, Nouvel, Perrault, Piano, Prix, Suzuki, Venturi, Winesci*, Librerie Dedalo, Roma, 1996

5 Hall P., *Living Skins: Architecture as Interface*, 2006 Adobe System Incorporated

6 Hall P., *Living Skins: Architecture as Interface*, 2006 Adobe System Incorporated

7 Giberti M., *Pelle come involucro. Pelle come interfaccia*, Materia 55, Involucri, settembre 2007

Risultano interessanti in tal senso le ricerche condotte dal MIT di Boston sui diversi gradi di adattività dell'Intelligent Building in relazione ai diversi tipi di regolazione informatica delle componenti architettoniche che lo costituiscono (regolazione basata su impulsi esterni, regolazione basata su di un modello reimpostato, edificio sensibile ai cambiamenti ambientali) o i recenti studi che stanno indagando nuovi gradi di umanizzazione dell'architettura in relazione alla possibilità di creare artificialmente architetture organiche (le iper-architetture allogeniche di Marcos Novak, la Casa Embriologica di Greg Lynn) o di formulare ipotesi avveniristiche di interazione tra uomo e macchina (il Rise-Rise Skyper di Sulan Katalan e William J. Mac Donald, pensato come un edificio realizzato con membrane di interscambio termico e film fotovoltaici, regolato da un sistema informatico centrale che ne permette il controllo energetico). Negli Stati Uniti d'America si stanno compiendo studi e sperimentazioni sugli Smart Walls, ovvero superfici murarie intelligenti, che possono caratterizzare le facciate degli edifici fornendo una serie di "servizi aggiuntivi" alla comunicazione mediatica di informazione, legati alla regolazione delle prestazioni energetiche dell'intero edificio.

Dall'analisi preliminare condotta sul tema dell'involucro intelligente emergono le seguenti problematiche:

- La complessità di questi sistemi tecnologici rende molto difficile la valutazione corretta del loro comportamento energetico, data dalla somma delle diverse prestazioni dei componenti di cui sono costituiti e dipendente dalle condizioni climatiche dell'area geografica in cui sono realizzati;

- La sperimentazione di sistemi di involucro dinamico e intelligente è attualmente legata a casi indipendenti di realizzazione architettonica, attraverso un modello di sperimentazione diretta delle tecnologie, con i conseguenti rischi per l'utenza e la committenza;

- Emerge la necessità di analizzare il comportamento energetico dei casi realizzati, in funzione delle aree geografiche e delle condizioni climatiche in cui si trovano ad operare, al fine di stabilire delle regole affinché i sistemi tecnologici d'involucro non siano semplicemente esportati da una località all'altra, in funzione delle loro caratteristiche estetico - architettoniche, ma adattate in relazione all'area geografica di riferimento valutandone le prestazioni energetiche.

- La qualità prestazionale del sistema involucro dinamico/intelligente dovrebbe essere assicurata dal rispetto dell'apparato normativo che, tuttavia, nel caso particolare delle soluzioni a doppio involucro, risulta ancora piuttosto lacunoso se non addirittura del tutto inesistente. In mancanza di un corpo normativo specifico, nella fase della progettazione si tende pertanto a fare riferimento ad altre normative, come quelle sui componenti finestrati o sulle facciate continue, oppure a linee guida per la progettazione che sono state messe a punto da alcuni paesi stranieri.

- Non esistono ancora studi che permettano di equiparare la complessità dei sistemi dinamici in relazione alla comparazione della complessità delle loro caratteristiche di funzionamento in termini di declinabilità del sistema, possibilità di integrare tecnologie per la produzione di energia da fonti rinnovabili, utilizzo di materiali innovativi, prestazioni qualitative rispetto all'immagine generale dell'edificio, automazione, peculiarità in merito al risparmio energetico ed alla riduzione dell'impatto ambientale.

III. Obiettivi generali e specifici della ricerca

Il programma di ricerca indaga il settore dei Dynamic e degli Smart Envelopes, ponendosi come obiettivo prioritario quello di individuarne e definirne le prestazioni energetiche, sia attraverso l'analisi dello stato dell'arte che attraverso lo sviluppo di un componente di facciata dinamica, in relazione alla variabilità delle sue prestazioni.

Il progetto di ricerca è, quindi, stato finalizzato a:

- Ricondurre ad una chiara classificazione tipologica i sistemi di involucro intelligente in rapporto alle caratteristiche costruttive ed ai principi di funzionamento propri di ogni sistema, al fine di presentare un quadro preciso dell'argomento trattato dal punto di vista della terminologia tecnica;

- Definire le caratteristiche dei sistemi di controllo e dei materiali che permettono di rendere un involucro dinamico e intelligente, attraverso la possibilità di avere configurazioni variabili rispetto ad uno stato di partenza definito;

- Individuare i criteri progettuali e gli strumenti operativi che guidano la stesura e la realizzazione di involucri innovativi e consentono di effettuare scelte mirate in relazione agli interventi previsti, al fine di ottenere i livelli qualitativi stabiliti;

- Avviare un'attività di sperimentazione nel settore dei sistemi di involucro intelligente, sviluppati come elementi tecnologici di facciata capaci di incrementare l'efficienza energetica degli edifici (pubblici e privati) e garantire, attraverso l'integrazione tecnologica nel componente, l'uso di fonti energetiche rinnovabili (fotovoltaico e solare termico);

- Sostenere l'innovazione dei processi produttivi, attraverso il trasferimento tecnologico dal settore scientifico a quello industriale, al fine di incrementarne le innovazioni di prodotto e la competitività;

- Esercitare nei confronti del mondo industriale e dei servizi progettuali un incisivo ruolo di stimolo all'innovazione di prodotto e di processo nel settore delle tecnologie di involucro finalizzate al risparmio energetico, favorendo la nascita di nuove iniziative imprenditoriali in comparti innovativi mediante la realizzazione di prototipi pre-industriali.

L'obiettivo generale è stato quello di produrre conoscenza necessaria per favorire l'attivazione dei processi legati all'innovazione di prodotto individuando nuovi requisiti prestazionali legati all'efficienza energetica che spingano gli attori del processo a proporre nuove soluzioni di facciata coerenti con le istanze etiche e normative in materia di contenimento dei consumi energetici.

L'obiettivo specifico è stato quello di realizzare un componente innovativo di facciata doppia pelle, appositamente sviluppato per aree geografiche con clima temperato, capace di contenere i consumi energetici per riscaldamento e raffrescamento, attraverso l'adozione di soluzioni tecnologiche dinamiche che ne garantiscano la variabilità delle prestazioni termo-igrometriche durante tutto l'arco dell'anno, riducendo l'impatto ambientale dell'edificio in cui è integrato.

IV. Metodologia e strumenti

La ricerca è stata sviluppata adottando un modello metodologico di tipo induttivo, sistematico e scalare che ci ha condotto a strutturare il lavoro d'indagine per momenti consequenziali di approfondimento: passando dalla definizione del macrotema, definito dalle tematiche legate all'involucro edilizio dinamico ed energeticamente efficiente, a quelle relative all'individuazione delle caratteristiche dei sistemi di facciata doppia pelle

e dei materiali trasparenti innovativi, per giungere infine allo sviluppo del concept di facciata di un componente innovativo, rispetto al quale sono state condotte le analisi energetiche attraverso il confronto con sistemi di chiusura verticale analoghi.

Ogni fase di lavoro è stata caratterizzata dalla definizione di una metodologia di ricerca precisa accompagnata dall'individuazione degli strumenti adeguati per l'approfondimento del momento cognitivo, in particolare il lavoro di indagine scientifica è stato strutturato come segue:

1. Analisi del quadro di riferimento normativo sull'efficienza energetica degli edifici, con particolare attenzione all'efficienza dell'involucro e dei sistemi di facciata doppia pelle.

Strumenti operativi: raccolta dei dati e delle informazioni relative alla normativa tecnica di riferimento a livello europeo.

2. Analisi del quadro di riferimento relativo allo stato dell'arte nell'ambito dei sistemi di involucro dinamici ed intelligenti.

Strumenti operativi: raccolta dei dati e delle informazioni inerenti le principali linee ricerca e alle esperienze maturate nel settore dei sistemi di facciata innovativi, analisi e valutazione della letteratura tecnica esistente, dei manuali tecnici, raccolta di informazioni dai siti web specializzati nel settore d'interesse.

3. Analisi delle caratteristiche tecnologiche e prestazionali dei sistemi di facciata doppia pelle trasparente con l'obiettivo di definire gli elementi che incidono sul comportamento termo-dinamico in climi temperati della fascia mediterranea.

Strumenti operativi: indagine bibliografica, contatto diretto con i produttori ed i progettisti dei sistemi di facciata, uso di software di simulazione per il calcolo delle prestazioni termo-igrometriche, costruzione di tavole sinottiche per la comparazione dei risultati

4. Ideazione ed elaborazione di schede di casi studio specifici, relative alla descrizione di sistemi di facciata trasparente dinamici ed innovativi dal punto di vista energetico.

Strumenti operativi: elaborazione di schede di analisi e creazione di un repertorio di casi studio, ricerca bibliografica e silografica, contatto diretto con i produttori ed i progettisti

5. Sviluppo del concept di un componente di facciata innovativo

Strumenti operativi: redazione di un modello meta progettuale e valutazione esigenziale prestazionale del componente sviluppato; contatto diretto con il settore industriale di riferimento per la definizione del progetto e del prototipo e la verifica delle soluzioni tecnologiche sperimentate; utilizzo di software di rappresentazione grafica e di simulazione energetica a regime statico.

6. Analisi delle prestazioni termoigrometriche del componente di facciata innovativo e valutazione della sua

Strumenti operativi: modello di analisi definito per valutare il comportamento in regime termico dinamico del componente di facciata; definizione delle schede relative alla raccolta dei risultati; software di simulazione termoigrometrica; software di simulazione energetica in regime termico dinamico (TRnsys); software di simulazione del fattore di luce diurna medio in un ambiente confinato (Relux)

V. Attività di ricerca

V.a Fase istruttoria

Nella fase istruttoria è stato analizzato lo stato dell'arte attraverso l'acquisizione diretta e indiretta delle informazioni relative agli involucri dinamici e intelligenti realizzati e/o prodotti dalle aziende di settore, valutando le modalità che guidano la progettazione e l'esecuzione degli stessi componenti ed esaminando i processi di analisi delle prestazioni energetiche al fine di individuare i requisiti prestazionali a cui essi devono necessariamente rispondere. È stato, inoltre, indispensabile condurre una ricerca bibliografica che permettesse di individuare la letteratura scientifica esistente sull'argomento con l'obiettivo di comprendere come esso fosse stato sviluppato e quali potessero essere le personalità a cui poter far riferimento all'interno della comunità scientifica nazionale ed internazionale. L'analisi dello stato di fatto è stata sviluppata attraverso la conoscenza diretta, dove possibile, dei manufatti architettonici realizzati come involucri dinamici, in modo da registrare le innovazioni tecnologiche del componente e di valutarne la sua reale rispondenza alle richieste dell'utenza.

Nella fase istruttoria è stato indispensabile contattare le aziende di settore, legate alla produzione dei componenti di facciata ed ai sistemi di involucro architettonico, al fine di comprendere quali sono gli strumenti di progettazione e produzione di componenti di facciata complessi e i sistemi di gestione e controllo dell'edificio, e come il processo di produzione, che in questo caso coinvolge più attori, viene gestito all'interno dell'azienda.

In relazione alla necessità di sviluppare, conseguentemente, delle valutazioni sulle prestazioni energetiche dell'involucro dinamico, in questo momento preliminare di ricerca, si è cercato di stabilire quali sono gli strumenti di analisi e valutazione attualmente esistenti sul mercato, al fine di individuare dei software di simulazione adeguati per misurare le prestazioni energetiche dell'involucro. In questo momento d'indagine è stato indispensabile contattare i centri di ricerca che hanno sviluppato indagini scientifiche sulle prestazioni energetiche dell'involucro. Il reperimento di informazioni e documenti è avvenuto anche attraverso la partecipazione a seminari o convegni dedicati all'argomento, al fine di identificare in tempo reale le novità e i contributi rilevabili all'interno del settore scientifico d'indagine.

V.b Fase di analisi (diretta ed indiretta)

Il programma di ricerca proposto si è posto l'obiettivo di analizzare lo stato dell'arte del settore degli involucri dinamici in architettura, individuandone:

- Le potenzialità in relazione alla capacità di ridurre i consumi energetici dell'edificio e di aumentare il comfort (termico, luminoso, acustico, igrometrico) dello spazio confinato
- Le innovazioni in relazione alla possibilità di variare configurazione geometrica e prestazione termo-igrometrica in funzione delle condizioni climatiche esterne.
- L'evoluzione tecnologica legata all'uso di materiali fortemente innovativi e dalle elevate prestazioni energetiche, capaci di regolare i flussi di energia passante attraverso l'involucro, ma anche di produrre energia se correttamente integrati nello stesso.
- Le fasi di progettazione e realizzazione, prestando particolare attenzione all'analisi del ciclo di vita dei componenti e all'impatto ambientale del sistema dalla fase di realizzazione a quella di dismissione.

PIANO DI LAVORO INERENTE LA RICERCA DI DOTTORATO (STRUTTURA TRATTA DA "RIBA, Plan of work".				
FASE	OBIETTIVO	AZIONI E STRUMENTI	INTERLOCUTORI ESTERNI	RISULTATI
FASE PRELIMINARE: DEFINIZIONE DEL TEMA E DEL PROGRAMMA DI RICERCA				
Definizione del tema	Individuare il modello scientifico generale e ipotizzare il contributo scientifico da adottare	Indagine bibliografica preliminare. Formulazione di un pre-stato dell'arte	-	Bozza di programma
Verifica del tema	Trovare riscontri inerenti la validità del tema scelto al di fuori dell'area scientifica individuata	Interazione con esperti e referenti del settore interdisciplinare interessato	Tutor. Operatori esperti del settore	Programma generale
Stesura del programma	Individuare Obiettivi, Metodi, Fattibilità e risultati	Bibliografia ragionata di settore. Prima simulazione di strumenti metodologici e prefigurazione risultati attesi. Bozza indice della ricerca	Ricercatori del settore. Operatori esperti del settore	Bozza di programma operativo. Piano di lavoro. Bozza indice ricerca
Verifica del programma	Validazione del programma	Confronto con ricerche simili per metodologie e/o campo di indagine. Confronto con esperti. Approvazione tutor	Tutor. Ricercatori del settore. Referenti esterni contattati	Programma operativo. Piano di lavoro. Indice ricerca
FASE ISTRUTTORIA: COSTRUZIONE BASE BIBLIOGRAFICA E RETE DEGLI INTERLOCUTORI				
Costruzione base bibliografica	Creazione della conoscenza di base dell'ambito di ricerca	Ricerca bibliografica. Individuazione mappa bibliografica e chiavi di ricerca. Individuazione fonti primarie e secondarie. Creazione archivio ragionato di catalogazione bibliografica		Archivio bibliografico. Schede di lettura analitiche. Bibliografia ragionata
Costruzione rete interlocutori	Creazione della conoscenza di base dell'ambito di ricerca	Ricerca aziende, casi studio e operatori. Organizzazione rapporti telematici e programma visite sul campo	Responsabili dei settori ricerca e sviluppo delle aziende contattate. Studi di architettura e progettisti delle opere scelte come casi studio in fase preliminare	Repertorio e indirizzario dei soggetti contattati

FASE ANALITICA: RICERCA FINALIZZATA ALLA CLASSIFICAZIONE TIPOLOGICA DI SISTEMI DI FACCIATA DINAMICI E INNOVATIVI				
Valutazione comparata dei modelli di involucro dinamico e intelligente	Definizione delle caratteristiche in termini di efficienza energetica delle nuove tipologie di involucro dinamico ed intelligente sviluppate dal settore scientifico ed industriale di riferimento	Individuazione delle caratteristiche delle tipologie di involucro analizzate e definizione delle fasi legate all'evoluzione etimologica del concetto di chiusura verticale a quello di pelle osmotica	Tutor. Ricercatori e professionisti operanti nel settore disciplinare di riferimento	Documento descrittivo dello stato dell'arte e definizione delle nuove tipologie d'involucro energeticamente efficiente
Valutazione comparata delle caratteristiche dei sistemi di facciata doppia pelle trasparente	Analisi delle caratteristiche geometrico - conformative, tipologiche, termo igrometriche delle tipologie di involucro trasparente analizzate	Individuazione delle caratteristiche tecnologiche e prestazionali delle tipologie di facciata doppia pelle trasparente. Utilizzo di software di valutazione e definizione di tavolo sinottiche di comparazione	Tutor. Ricercatori e professionisti operanti nel settore disciplinare di riferimento	Documento descrittivo dello stato dell'arte contenente tavole sinottiche relative alle classificazioni operate alle caratteristiche rilevate in termini di prestazioni termo-igrometriche
Valutazione comparata delle caratteristiche dei sistemi di tamponamento trasparente innovativi	Esame delle caratteristiche dei materiali trasparenti innovativi e definizione delle loro prestazioni in termini di isolamento termico e fattore di assorbimento solare	Individuazione delle caratteristiche tecnologiche e prestazionali delle tipologie di materiali trasparenti innovativi. Utilizzo di software di valutazione e definizione di tavole sinottiche di comparazione	Tutor. Ricercatori e professionisti operanti nel settore disciplinare di riferimento	Documento descrittivo dello stato dell'arte contenente tavole sinottiche relative alle classificazioni operate in relazione alle caratteristiche rilevate in termini di prestazioni termo-igrometriche
Analisi di casi studio all' ESTERO ed in ITALIA	Fornire un quadro dell'evoluzione dei sistemi di involucro di facciata doppia pelle con riferimento alle caratteristiche tecnologiche che permettono di incrementarne le prestazioni termo igrometriche ed il contributo all'efficienza energetica degli edifici. individuando riferimenti progettuali, normativi, analitici.	Creazione scheda preliminare di analisi dei casi studio. Analisi documentazione generale. Schedatura e analisi di casi studio specifici	Tutor. Responsabili dei settori ricerca e sviluppo delle aziende contattate. Studi di architettura e progettisti delle opere scelte come casi studio in fase preliminare.	Scheda tipo per casi studio Repertorio schede

FASE PROPOSITIVA: SVILUPPO DEL CONCEPT PER UN COMPONENTE DI FACCIATA INNOVATIVO E VERIFICA DELLE SUE PRESTAZIONI				
Sviluppo del concept di facciata innovativo	Stesura del progetto e realizzazione di un prototipo di un componente di facciata dinamico, innovativo ed energeticamente efficiente	Redazione di un modello meta progettuale e valutazione esigenziale prestazionale del; verifica delle soluzioni tecnologiche sperimentate; utilizzo di software di rappresentazione grafica e di simulazione energetica a in regime statico.	Tutor Responsabili dei settori ricerca e sviluppo delle aziende contattate	Progetto definitivo del componente di facciata dinamico. Documento di valutazione e sviluppo di Indicazioni progettuali del caso studio. Realizzazione del prototipo
Individuazione di un modello di valutazione per la definizione delle prestazioni del componente innovativo	Analizzare le prestazioni termometriche ed in termini di contenimento dei consumi energetici del componente di facciata proposto	Costruzione di un modello di analisi; definizione delle schede relative alla raccolta dei risultati; software di simulazione delle caratteristiche termometriche dei componenti di involucro; software di simulazione energetica in regime termico dinamico (TRnsys); software di simulazione del fattore di luce diurna medio in un ambiente confinato (Relux)	Tutor Ricercatori operanti nel settore disciplinare di riferimento	Quadro sintetico comparativo dei risultati raggiunti e prima definizione delle variabili necessarie ad ottimizzare i sistemi di facciata analizzati.
Conclusioni	Fornire il bilancio dei risultati raggiunti	Redazione definitiva dell'introduzione, analisi, sintesi e valutazione dei risultati	Tutor	Documento descrittivo dei risultati raggiunti

Tab. I.1: La definizione del piano di lavoro rispetto alla struttura del Plan of Work del Riba è stata suggerita dalle indicazioni sulle Strumentazioni metodologiche e disciplinari che devono accompagnare una ricerca scientifica desunte dal testo di Giovanni Neri Seneri, *La formazione del ricercatore. Il contributo di un'esperienza*, Alinea 1997

- Le dinamiche legate alla produzione e messa sul mercato dei componenti di involucro, analizzando l'impatto dell'innovazione nel processo di marketing del sistema tecnologico (comparazione dei costi di produzione con i costi di assemblaggio e manutenzione.)

La fase di analisi è stata condotta attraverso dei momenti di valutazione diretta e indiretta; cercando in prima istanza di delineare le tematiche che legano il concetto di sostenibilità ambientale ed efficienza energetica dell'edificio all'involucro edilizio e definendo il quadro di ricerca e normativo che a livello internazionale e nazionale ha contribuito a incrementare e promuovere l'innovazione tecnologica del settore industriale di riferimento.

Lo stato dell'arte è stato valutato attraverso il reperimento diretto e indiretto dei dati relativi al comportamento energetico dei sistemi di facciata doppia pelle trasparente e dei materiali trasparenti innovativi. Questo momento di indagine analitica ha portato alla stesura di una raccolta di Best Practices di sistemi di involucro intelligenti; raccolta,

destinata ai professionisti del settore, ai progettisti ed alle aziende, costituita da schede analitiche nelle quali sono state evidenziate le innovazioni di processo legate a:

- Le soluzioni di configurazione del sistema;
- I sistemi di controllo e regolazione degli strati che costituiscono l'involucro;
- Le prestazioni energetiche, in termini di trasmittanza termica e controllo della radiazione solare incidente.

V.c Fase propositiva

Questo momento di indagine scientifica è stato caratterizzato dalla definizione di un concept di facciata intelligente che potesse diventare, attraverso la realizzazione a scala reale di un prototipo e l'applicazione ad un edificio scelto come caso studio, un esempio concreto della possibilità di declinare le prestazioni delle facciate doppie pelli trasparenti all'area mediterranea, caratterizzata dalla necessità di regolare la componente termica dell'irraggiamento solare nei mesi estivi e di garantire buone prestazioni di resistenza termica nelle stagioni più fredde, quando i fenomeni indotti come l'effetto serra, possono contribuire a ridurre, ed in taluni casi annullare, la necessità di ricorrere a sistemi di riscaldamento meccanico.

Dopo aver definito le caratteristiche del componente dinamico, in fase di progettazione preliminare, individuando le peculiarità specifiche di movimento dei sottosistemi che lo costituiscono, si è passati alla stesura delle caratteristiche esecutive di dettaglio, in relazione alla necessità di renderlo realizzabile. In questa fase è stato redatto un documento di Valutazione e Sviluppo di Indicazioni Progettuali del caso studio nel quale sono elencate informazioni riguardanti:

- Struttura, connessioni e tecniche di montaggio
- Requisiti e prestazioni particolari
 - Stabilità
 - Permeabilità all'aria
 - Tenuta all'acqua
 - Isolamento termico
 - Isolamento acustico
 - Resistenza agli urti
 - Sicurezza all'intrusione
 - Resistenza e la reazione al fuoco
 - Mantenimento delle prestazioni al variare delle condizioni climatiche e con il passare del tempo
 - Ecc...
- Gestione e controllo della posa in opera
- Manutenzione

Contemporaneamente alla fase di stesura progettuale si è provveduto a valutare le potenzialità date dalla possibilità di variare la configurazione geometrico – spaziale del componente e le sue prestazioni termigrometriche, definendo un modello di analisi che permettesse di comprarne le prestazioni, in termini di consumi energetici dell'edificio, con quelle di sistemi di facciata doppia trasparenti statici e di soluzioni di involucro tradizionale dell'area mediterranea (abbiamo scelto un componente di facciata realizzato in muratura con apertura centrale, realizzato con materiali che ne garantiscono la rispondenza ai parametri in termini di trasmittanza termica normale e periodica ai provvedimenti normativi vigenti in Italia). Uno degli obiettivi della ricerca è, infatti, quello di valutare le performance energetiche di tipologie di involucro leggere

che per le loro caratteristiche non potranno mai presentare valori di massa superficiale e inerzia termica paragonabili ad una muratura massiva, e che per una lacuna normativa, vengono comparati nella definizione delle caratteristiche da garantire ad aperture finestrate.

Il sistema di facciata trasparente proposto è stato, infatti, analizzato attraverso la simulazione virtuale delle sue prestazioni, al fine di valutarne le performance in relazione alla capacità di garantire il comfort dello spazio confinato (comfort termico e luminoso) al variare delle condizioni climatiche esterne e dell'area geografica di applicazione. La simulazione è stata fatta su diverse conformazioni e soluzioni di involucro di chiusura verticale, in modo da valutare l'efficienza energetica dei sistemi scelti in relazione alla variabilità delle soluzioni di configurazione proposte e dei materiali utilizzati

V.d Verifiche

La fase propositiva è stata accompagnata da un momento di analisi e verifica dei risultati raggiunti, attraverso l'applicazione del componente di facciata dinamico, in termini di risparmio energetico per la climatizzazione invernale ed estiva. È stato necessario scegliere degli strumenti di simulazione termodinamica e illuminotecnica e delle metodologie di validazione relative alla possibilità di quantificare le performance energetiche (termo igrometriche e d'illuminamento) del componente in un'area geografica caratterizzata da clima temperato, con inverni miti ed estati calde. Abbiamo scelto di condurre le verifiche contestualizzando l'applicazione dell'involucro in tre città italiane: Milano, Firenze, Palermo, con l'obiettivo di valutare i benefici e/o gli svantaggi dati dall'adozione di sistemi di facciata totalmente trasparente e di individuare delle strategie correttive.

Nella fase preliminare di verifica e progettazione abbiamo dovuto procedere ad un'analisi delle prestazioni attraverso la costruzione di un modello virtuale ed alla valutazione del suo comportamento in termini di:

- Trasmissanza termica
- Verifica termo-igrometrica

Queste valutazioni sono state fatte con il software Thermus.

Si è quindi provveduto ad analizzare in regime termico dinamico il contributo dato dal componente ai fabbisogni energetici dell'edificio in termini di:

- Fabbisogno di energia termica per il riscaldamento
- Fabbisogno di energia termica per il raffrescamento
- Consumo di energia primaria per riscaldamento e raffrescamento
- Costo per il condizionamento (riscaldamento - raffrescamento)
- Quantità di CO₂ prodotta dagli impianti di climatizzazione in fase di gestione.

In questa fase di valutazione è stato necessario definire una metodologia di analisi di tipo quantitativo che ci permettesse di valutare le prestazioni del componente attraverso la comparazione dei risultati raggiunti con quelli ottenuti attraverso l'adozione di altre tipologie di facciata. Abbiamo quindi individuato dodici configurazioni di involucro verticale opaco e trasparente e definito un modello di test room virtuale rispetto al quale sono state condotte le simulazioni con il software TRnsys inerenti il fabbisogno energetico per riscaldamento e raffrescamento, valutando il contributo dato dalle condizioni climatiche scelte e dall'orientamento della facciata. Le simulazioni sono state fatte "collocando" la test room nelle tre località geografiche italiane scelte e facendo ruotare "virtualmente" la facciata che ospita il componente da testare rispetto ai quattro punti cardinali. Lanciando delle simulazioni relative al calcolo dell'energia primaria

di cui ha bisogno l'impianto di condizionamento per riscaldare e raffrescare lo spazio test nell'arco di un anno abbiamo definito in quali condizioni è possibile adottare il componente di facciata dinamico senza incidere negativamente sul bilancio energetico globale dell'edificio.

Con l'obiettivo di quantificare il contributo dato al comfort visivo di uno spazio confinato dal nostro sistema di facciata abbiamo, infine, valutato l'illuminamento sul piano di lavoro dell'ambiente confinato attraverso il confronto dei risultati ottenuti adottando le tipologie di facciata scelte per la fase di valutazione precedente.

Le simulazioni sono state condotte con il software Relux che ci ha permesso di quantificare il fattore di illuminamento medio sul piano di lavoro e di visualizzare attraverso un modello tridimensionale la distribuzione della luce naturale.

VI. Possibili sviluppi futuri della ricerca in post dot, possibili enti finanziatori ulteriori

L'indagine scientifica condotta sull'involucro dinamico e la sua applicazione nel complesso sistema edificio apre numerose linee di ricerca che possono essere definite delle vere e proprie anticipazioni di una realtà di processo e di produzione industriale che non solo sta caratterizzando la sperimentazione degli ultimi anni ma, soprattutto, caratterizzerà quella dei prossimi decenni. Tra gli sviluppi futuri della ricerca possiamo individuare:

- La valutazione delle prestazioni energetiche dei componenti dinamici di facciata attraverso il monitoraggio delle temperature superficiali dei subsistemi che li compongono e le successive valutazioni condotte con software di simulazione fluidodinamica per valutare la temperatura dell'aria all'interno dell'intercapedine ed il reale valore di trasmittanza termica raggiunto dal sistema;
 - L'analisi delle caratteristiche di comportamento acustico degli elementi di involucro intelligente, attraverso la definizione di indicatori per la progettazione;
 - L'analisi del ciclo di vita dei materiali utilizzati e dei processi produttivi necessari per la fabbricazione del sistema di facciata con l'obiettivo di valutarne l'impatto ambientale;
 - L'analisi delle relazioni tra il processo di innovazione dell'involucro e il processo di innovazione sistema edificio, al fine di ottimizzarne i consumi energetici;
 - L'analisi dei sistemi di automazione e controllo delle performance dell'edificio;
 - La definizione di linee guida utilizzabili per sviluppare una normativa in merito alle prestazioni energetiche dell'involucro intelligente;
 - La definizione di nuovi strumenti di simulazione che permettano la valutazione a priori e in tempi più sintetici il comportamento termigrometrico dei sistemi di facciata trasparente con l'obiettivo di valutarne in fase di progettazione preliminare il contributo positivo o negativo dato al fabbisogno energetico dell'edificio;
 - La valutazione e l'ottimizzazione dei processi di produzione degli elementi che costituiscono il sistema tecnologico;
 - L'analisi economica, in termini di costi e benefici, relativa alla valutazione e quantificazione dei costi di progettazione, esecuzione, messa in opera e manutenzione a fronte dei vantaggi acquisibili in termini di risparmio energetico e riduzione dell'impatto ambientale;
 - La possibilità di sviluppare componenti di involucro intelligente che possano essere applicati anche negli interventi di retrofitting energetico degli edifici esistenti.

*I've seen things you people wouldn't believe.
Attack ships on fire off the shoulder of Orion.
I watched c-beams glitter in the dark near the Tannhäuser Gate.
All those ... moments will be lost in time,
like tears... in rain.*

Do Androids Dream of Electric Sheep?, Philip K. Dick

Capitolo 1

Sostenibilità ambientale e involucro edilizio

Il rapporto tra uomo e ambiente è da sempre caratterizzato da un approccio di tipo conflittuale, in cui l'essere umano ha cercato di trasformare la natura adattandola ai suoi fabbisogni. La necessità di trovare soluzioni tecnologiche che garantissero la creazione di un microclima artificiale ha determinato la colonizzazione di ambienti naturali che sono stati conformati alle esigenze umane, attraverso azioni e soluzioni che manifestavano una capacità di adattamento di gran lunga superiore a quella di altri esseri viventi. Tuttavia è necessario ricordare che prima dell'avvento della rivoluzione industriale l'attività umana è stata correlata alla realizzazione di oggetti, costruzioni, sistemi, connotati da una completa reversibilità e di conseguenza con un impatto ambientale ridotto.

Fino agli ultimi decenni del diciannovesimo secolo, l'architettura si è espressa attraverso tecnologie sperimentate e perfezionate nei secoli, capaci di sfruttare al massimo le risorse disponibili, senza danneggiare gli ecosistemi presenti e permettendone la loro rigenerazione. Nei lustri successivi lo sviluppo tecnologico in campo industriale ha permesso una rapida evoluzione delle condizioni di vita, permettendo di giungere alla realizzazione di sistemi antropici più complessi e più difficilmente gestibili.

La disponibilità di energia a basso costo come il carbone e il petrolio, la possibilità di reperire questi combustibili più facilmente e di trasportarli in maniera capillare ha generato nell'uomo un'ampia fiducia nei confronti della tecnologia e delle risorse ambientali, considerate illimitate. La nuova architettura, in preda all'ottimismo diffuso dalla società e nella società, si è 'evoluta' con mezzi e canoni difforni da quelli tradizionali, senza quella 'latente filosofia energetica' che per secoli aveva contraddistinto il suo operato.

La volontà di realizzare luoghi vitali sempre più rispondenti alle esigenze della modernità, la propensione dell'uomo a credere nello sviluppo tecnologico, il naturale ottimismo, da tempo ormai vacillante, hanno determinato il consumo di gran parte dell'energia fossile a disposizione sino alle recenti crisi energetiche che hanno indotto a riflettere sulla necessità di introdurre nuovi modelli di sviluppo tecnologico-industriale.

Il conflitto arabo-israeliano del 1973 ha aperto una questione energetica molto problematica: quella del costo del petrolio e della dipendenza dell'uomo moderno da questa fonte di energia. Il conflitto, seguito poi dalla rivoluzione iraniana e dall'invasione dell'unione sovietica in Afghanistan, ha indotto i paesi produttori di petrolio riuniti nell'OPEC a concordare un drastico aumento del prezzo del greggio estratto. In pochi anni il prezzo è salito da pochi dollari al barile a 62 dollari, quotazione registrata nei primi mesi del 2007¹. L'aumento del petrolio ha determinato un incremento generalizzato dei costi in quasi tutti i settori produttivi e questo ha reso evidente la stretta interdipendenza tra fonte energetica e stile di vita.

E' stato stimato che la domanda mondiale di energia primaria cresce con un tasso medio annuo di circa 2,1%, senza considerare che numerosi paesi in via di sviluppo

quali India, Cina e paesi del Sud-Est asiatico incrementeranno di molto, nei prossimi anni i loro consumi in relazione al loro sviluppo industriale e sociale.

L'utilizzo indiscriminato di fonti energetiche non rinnovabili ha determinato inequivocabilmente conseguenze ambientali in molti casi irreversibili quali il surriscaldamento del pianeta e l'effetto serra. Dal 1975 la temperatura terrestre è aumentata di circa 0,5°C e si prevede che nei prossimi anni possa aumentare di almeno 2°C, con le conseguenze ambientali già ampiamente descritte dagli scienziati contemporanei; valutando il consumo apportato da paesi in via di sviluppo possiamo ipotizzare che nel 2010 la produzione totale d'anidride carbonica sarà doppia rispetto a quella del 1990.

La riflessione su queste problematiche di carattere economico ed ambientale ha contribuito negli ultimi anni a spostare l'attenzione sulla necessità di formulare nuovi modelli di sviluppo economico definito propriamente sostenibile per la volontà di preservare le risorse naturali presenti per le generazioni future.

Le principali tematiche che hanno determinato questo nuovo approccio sono legate:

- al costo delle fonti energetiche fossili, distribuite in maniera disordinata sull'intero globo, che ha registrato un considerevole aumento, dovuto sia alle crisi politiche dei paesi produttori, sia alla pressanti richieste dei paesi in via di sviluppo come India e Cina che chiedono di avere condizioni di crescita economico-industriale simili a quelle dei paesi occidentali;

- alle variazioni climatiche ed alle loro drammatiche conseguenze legate, come prima ricordato all'uso indiscriminato delle risorse energetiche esistenti.

Contestualmente alle crisi energetiche degli anni settanta si registra la nascita di movimenti ed associazioni che si pongono come obiettivo quello di promuovere forme di sviluppo sostenibile e portare a conoscenza dell'opinione pubblica le problematiche legate allo sfruttamento delle fonti energetiche fossili.

Nel 1972 nasce il Club di Roma², e viene pubblicato il report «I Limiti dello Sviluppo» il primo documento che sottolinea la necessità di rivedere lo stile di vita che il mondo occidentale ha acquisito dopo la seconda guerra mondiale, prendendo coscienza del limite delle risorse a disposizione.

Nel 1987 viene pubblicato il «Rapporto Brundtland»³, che promuove presso l'opinione pubblica mondiale, concetti quali risparmio energetico e lo sviluppo sostenibile.

Alla metà degli anni novanta nell'ambito del progetto READ (Renewable Energy Architecture and Design) sviluppato dalla Commissione Europea è redatta da Thomas

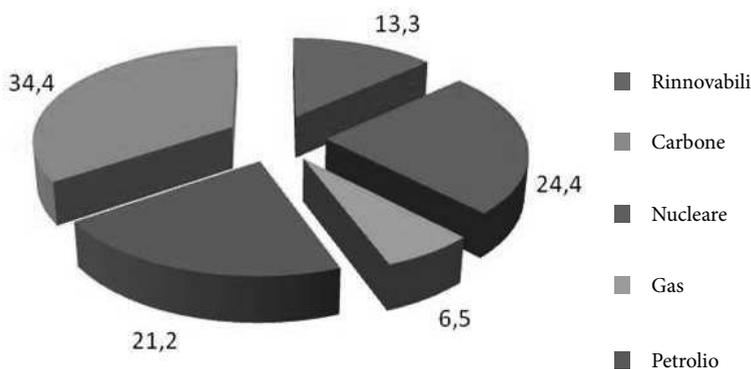


Fig. 1.1 - Offerta di energia primaria. Mondo. Anno 2003. Fonte: elaborazione ENEA sui dati EIA

Herzog «La Carta Europea per l'Energia Solare in architettura e pianificazione urbana» che viene sottoscritta da dieci tra i più famosi architetti europei, tra i quali: Renzo Piano, José M. de Prada Poole, Richard Rogers, ecc..

Questo documento indica il ruolo etico che l'architetto deve assumersi nei confronti della tutela ambientale attraverso il suo operato e contiene delle linee guida a scala architettonica e urbana per progettare in modo energeticamente consapevole.

Nel 1997 è redatto il Protocollo di Kyoto, attraverso cui numerosi Paesi nel mondo si assumono la responsabilità di sottoscrivere una relazione d'intenti finalizzata al contenimento delle emissioni di CO₂ in atmosfera ed orientata a promuovere politiche per l'efficienza energetica su tutto il Pianeta terra. Il protocollo diviene attivo con l'adesione da parte della Russia nel 2004 ed è attualmente in vigore. Rispetto agli obiettivi di riduzione di emissioni di CO₂ non si rileva nessuna riduzione di emissioni in atmosfera, ed in alcuni Paesi, tra i quali l'Italia, si registra addirittura un incremento di emissione di sostanze nocive (obiettivo di riduzione del 7% delle emissioni di gas serra, incremento ad oggi del 9% delle emissioni).

Al vertice G8 2008 (Toyako, Giappone) i paesi industrializzati si sono impegnati in linea di principio a ridurre le emissioni di gas serra di almeno il 50% entro il 2050. Al vertice G8 2009 (L'Aquila, Italia) l'impegno alla riduzione delle emissioni da parte dei paesi del G8 è stato ribadito e rafforzato ed i paesi emergenti, nella sessione allargata del vertice, hanno aderito al principio di limitare l'incremento medio di temperatura entro livelli dell'ordine dei due °C senza tuttavia specificare come conseguire tale risultato e senza assumere impegni precisi sulle modalità di riduzione delle emissioni.

Nell'aprile 2009 il vertice G20 di Londra, la cui significatività è dovuta alla valenza rappresentativa globale (oltre i ¾ del PIL, dei consumi energetici e delle emissioni mondiali), ha messo a fuoco il 'nuovo' fattore costituito dalla crisi economica e il concetto di «Green Recovery» basato sull'idea che la riduzione di risorse prodotta

	PETROLIO	GAS NATURALE	CARBONE	NUCLEARE
Consumi cumu- lati al 2000	111	58	148	10
Previsione con- sumo cumulato 2000-2010	263	298	347	256
Riserve conven- zionali accertate + presunte	295	420	3400	260
Altre riserve convenzionali probabili			3000	150
Riserve non convenziona- li accertate + presunte	525	450		15560
Altre riserve non convenzionali probabili	1900	400		8900

Tab. 1.1 - Stima dei fabbisogni globali di energia per il XXI secolo e riserve accertate, presunte e probabili di fonti non rinnovabili convenzionali e non convenzionali (mld. Tep). Fonte: Gian Paolo Beretta, *Il contesto energetico globale: prospettive future*, Osservatorio per l'energia e l'Ambiente, Brescia, gennaio 2006.

dalla crisi non può riflettersi sugli sforzi per la tutela del clima. Il «Green Recovery» presuppone che la crisi possa non sottrarre ma al contrario liberare risorse sottoutilizzate da destinare alle politiche climatiche che quindi si pongono come motore di sviluppo rispetto all'intera economia, con un'inedita connotazione anticiclica.⁴

La Conferenza sui Cambiamenti Climatici di Copenaghen, che si è tenuta nel dicembre del 2009, sottolinea la difficoltà a coniugare la necessità di promuovere politiche ambientali efficaci a scala globale con le esigenze di sviluppo economico delle varie realtà mondiali. La Conferenza, che prende atto delle gravi problematiche conseguenti all'innalzamento delle temperature causate dall'effetto serra si conclude con accordo sottoscritto da Stati Uniti, India, Brasile e Cina e di cui gli altri Paesi – compresa la Comunità Europea - prendono atto. L'accordo ribadisce semplicemente il generico obiettivo di contenere entro due gradi centigradi l'aumento della temperatura media planetaria e l'impegno finanziario verso i Paesi Poveri (30 miliardi di dollari per il triennio 2010-2012 e 100 miliardi all'anno dal 2020 in poi); il documento non contiene obiettivi di riduzione delle emissioni di gas serra con la conseguenza di diventare semplicemente un atto propositivo ma non vincolante rispetto alla soluzione delle problematiche ambientali che minacciano socialmente ed economicamente le popolazioni dell'intero Pianeta.

A seguito degli sviluppi della politica ambientale internazionale, dopo gli accordi di Kyoto sui cambiamenti climatici, la International Energy Agency ha sviluppato una serie di scenari sullo sviluppo energetico a livello internazionale al 2030 e al 2050. Tali scenari legano in modo stretto il consumo di energia (e l'utilizzo di differenti mix energetici) all'andamento della produzione di CO₂.

In particolare, gli scenari analizzati sono tre:

1. Baseline, che presuppone che consumi e produzione di CO₂ seguano l'andamento attuale (senza, quindi, alcun intervento a supporto degli accordi di Kyoto);



Fig. 1.2: Tribunale Civile Manchester, Denton Corker Marshal, Manchester, Regno Unito, 2003. Esempio di involucro eco efficiente o ambientalmente interattivo. La parte pubblica si distingue per la presenza di un doppio involucro vetrato contenente i volumi opachi sospesi delle sale d'attesa. Gli uffici sono contenuti in blocchi di vetro colorato schermati da un diaframma metallico.

2. ACT, che prevede interventi tali che al 2050 il livello di emissione di CO₂ sia lo stesso del 2005;
3. BLUE, che delinea scenari di intervento tali da dimezzare nel 2050 la produzione di CO₂ rispetto al 2005.

Dall'analisi di questi scenari si evince come il settore delle costruzioni rimane dopo il settore dell'industria quello in cui si registreranno i consumi maggiori di energia a fronte di una costante emissione di CO₂. Questa considerazione ci permette di comprendere perché, nonostante il parziale fallimento degli accordi in merito alla riduzione di emissione di gas serra, numerosi Paesi hanno avviato politiche che promuovono l'efficienza energetica in più settori, dalla produzione ai consumi finali, con l'obiettivo di ridurre le emissioni di gas serra e limitare la dipendenza energetica da fonti fossili.

Le nuove tecnologie energetiche sono al centro di importanti iniziative dell'Unione Europea, dei paesi dell'OCSE, delle economie emergenti e della politica energetica della nuova amministrazione americana. Ad esse si guarda non soltanto per far fronte alla sfida climatica e alla sicurezza energetica ma anche come elemento in grado di contribuire al rilancio delle economie emergenti dalla crisi economica.

Le tecnologie energetiche sulle quali si punta nell'ottica di una nuova green economy, che possa aprire nuovi scenari di sviluppo non solo economico, ma anche e soprattutto sociale, sono quelle legate ai seguenti settori:

- Efficienza energetica;
- Sequestro della CO₂;
- Fonti rinnovabili;
- L'energia nucleare.

E' interessante rilevare, che a livello internazionale, è proprio l'area dell'efficienza energetica quella che ricopre un ruolo fondamentale, non solo per la varietà di tecnologie che ad essa afferiscono ma anche per le sue implicazioni sociali, comportamentali (usi finali) e commerciali. In tutte le analisi e gli orizzonti temporali da qui al 2050 l'efficienza energetica risulta essere la risorsa più importante non solo ai fini della riduzione delle emissioni ma anche per il contenimento della domanda di fossile e il miglioramento della sicurezza energetica. La sua primaria rilevanza commerciale e industriale deriva dal fatto che essa investe non solo il settore dell'offerta ma anche e prevalentemente il settore della domanda di tecnologie energetiche.

L'efficienza energetica è chiaramente riconducibile ai settori:

- Residenziale;
- Terziario;

	1995	1997	1998	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Agricoltura	169,0	168,5	164,2	161,9	162,7	162,0	163,3	175,3	179,2	181,3
Industria	1.797,1	1.816,9	1.807,7	1.879,3	1.845,6	1.869,8	1.935,3	2.039,0	2.106,2	2.180,5
Trasporti	1.724,7	1.803,1	1.853,1	1.935,6	1.942,5	1.985,8	2.032,7	2.122,4	2.173,0	2.226,4
Terziario	504,6	531,1	530,8	557,7	569,3	571,4	597,5	615,2	641,2	642,6
Residenziale	1.713,8	1.750,9	1.741,2	1.812,7	1.840,3	1.854,7	1.904,8	1.927,7	1.943,2	1.957,7
Totale	5.909,2	6.070,6	6.097,0	6.347,2	6.360,5	6.443,7	6.633,6	6.879,6	7.042,8	7.188,4

Tab. 1.2 - Mondo - Consumi finali di energia per settori (milioni di tep). Fonte: Energy balance of Non OECD countries, IEA 2008

- Industriale;
- Dei trasporti.

Rispetto ai quali si possono rilevare dei parametri in merito a:

- Efficienza nell'uso finale dei combustibili;
- Efficienza negli usi finali di elettricità;
- Efficienza nell'elettrogenazione, e fuel switching negli usi finali.

Tra le tecnologie più interessanti per potenziale e costo (negativo) di abbattimento, bassa intensità di capitale e quindi ritorno tempestivo degli investimenti, si collocano molte delle tecnologie di uso finale che consentono risparmi nei consumi elettrici nei settori residenziale, commerciale e dei servizi come ad esempio le nuove tecnologie per l'illuminazione, l'elettronica e i dispositivi domestici a basso consumo, il condizionamento efficiente, con costi di abbattimento compresi tra -60 e -90 €/tCO₂. Costi negativi e significativo potenziale di abbattimento anche per l'isolamento termico (mediante retrofitting) degli edifici, che tuttavia richiede maggiori investimenti e tempi di ritorno più lunghi dipendenti anche dalle condizioni climatiche locali. In generale, si stima (ETP 2008) che l'efficienza nel settore residenziale e nei servizi possa contribuire per una quota di circa il 16% agli obiettivi globali di mitigazione.⁵

Dalle analisi condotte in questi anni, a scala internazionale e nazionale, è emerso, quindi, come il settore maggiormente impattante dal punto di vista ambientale è quello legato al mondo delle costruzioni che solo in Italia registra consumi energetici maggiori del settore dei trasporti e dell'industria, consumi imputabili in massima parte al settore residenziale e terziario rispetto al quale emerge che buona parte dell'energia, circa il 57%, è destinata al condizionamento (invernale e/o estivo), e conseguentemente alla produzione di acqua calda sanitaria, elettricità e gas per usi domestici.

La necessità di promuovere forme di sviluppo sostenibile è quindi intimamente connessa alla necessità di proporre nuovi modelli architettonici che garantiscano l'efficienza energetica ed il limitato impatto ambientale del settore industriale legato al mondo delle costruzioni, che risulta essere particolarmente energivoro, garantendo comunque adeguate condizioni di comfort agli utenti degli spazi edificati. Tale riflessione è relativa a tutti i settori legati alla costruzione architettonica, dal residenziale al terziario, promuovendo proprio in quest'ultimo settore, a cui spesso sono assegnati valori simbolici e rappresentativi, la responsabilità di divulgare esempi virtuosi del



Fig. 1.3: CSET, Centre for Sustainable Energy Technologies, Mario Cucinella Architects, Ningbo, China, 2009

costruire capaci di sperimentare, attraverso l'applicazione, l'innovazione tecnologica legata al processo costruttivo ed ai componenti e sistemi innovativi.

Le tecnologie evolute connesse all'efficienza energetica ed all'automazione di quello che possiamo definire, non a caso, il sistema edificio si sono registrate, nell'ultima decade, proprio negli edifici pubblici e privati legati ad attività non residenziali, promuovendo una ricerca stilistica sempre più connessa all'innovazione tecnologica dell'involucro che ha assunto la duplice valenza di elemento connotante il contenitore rispetto alla funzione contenuta e di sistema, attivo o passivo, cui è stato affidato il ruolo di regolare i flussi di energia passanti tra interno ed esterno confinato e di garantire adeguate condizioni di comfort indoor.

Gli edifici destinati ad attività terziarie presentano i livelli più alti di consumo energetico, per l'illuminazione ed il raffrescamento, se confrontati con altri tipi di edifici e in particolare con gli edifici residenziali. A questo tipo di edifici è attribuito a scala globale un consumo che varia tra 100 e 1000 kWh/m², a seconda della localizzazione geografica, delle modalità d'uso dell'edificio e del tipo di apparecchiature presenti, dell'organizzazione del lavoro che vi si svolge, del tipo di attrezzature impiantistiche e di movimentazione interna, dei sistemi di riscaldamento e/o di raffrescamento (HVAC) di cui sono dotati, del tipo di illuminazione, ecc...

Nei Paesi occidentali circa il 40% dei consumi di energia è imputabile al settore delle costruzioni, in particolare di questa fetta di consumi il 22% è imputabile agli edifici residenziali ed il restante 18% agli edifici commerciali.

Il problema energetico che caratterizza la nostra epoca determina la necessità di costruire edifici energeticamente consapevoli che siano in grado, al contempo, di garantire le condizioni di comfort richieste dagli utenti. L'obiettivo è quello di sviluppare un atteggiamento più umile nei confronti dell'ambiente, che sappia utilizzare le risorse attraverso l'uso sapiente della tecnologia odierna; ad edifici, programmati e progettati per creare una netta separazione tra ambiente interno ed ambiente esterno si dovranno sostituire edifici in grado di poter e saper filtrare quegli elementi naturali che contribuiscono a render più confortevoli gli spazi confinati.

È quindi fondamentale proporre nuove forme dell'abitare energeticamente consapevoli che promuovano:

- Il miglioramento e lo sviluppo di sistemi, tecnologie e materiali innovativi per una maggiore efficienza del sistema edificio-impianto e promuovano la loro applicazione nella realizzazione di nuovi edifici o nel recupero d'immobili esistenti.
- La determinazione di criteri, norme e codici di calcolo per le valutazioni energetiche e di eco-bilancio degli edifici e la definizione di proposte normative per la ristrutturazione e la certificazione energetica degli edifici.
- La determinazione di criteri, norme e codici di calcolo per le valutazioni energetiche e di eco-bilancio degli edifici e la definizione di proposte normative per la ristrutturazione e la certificazione energetica degli edifici.
- Lo sviluppo e la diffusione di tecnologie che permettano la conservazione dell'energia.
- L'integrazione di sistemi solari attivi sia nelle nuove costruzioni che nelle ristrutturazioni.
- La maggiore capacità isolante degli elementi dell'involucro edilizio, con particolare attenzione posta alla qualificazione prestazionale degli infissi (sostituzione o modifiche delle parti vetrate o dell'intero serramento o di una parte di questo).

La ricerca inerente nuove tecnologie per l'involucro, che risulta essere l'elemento cardine nella regolazione dei flussi energetici gestiti all'interno del sistema edificio, si

prospetta come uno dei settori in forte crescita per i prossimi decenni in cui saranno proprio gli interventi nel settore delle costruzioni a determinare il successo o il fallimento delle politiche energetiche avviate e degli obiettivi in termini di sostenibilità ambientale che ogni Stato ha fatto propri nelle ultime decadi.

La necessità di ridurre i consumi energetici degli edifici, siano questi a destinazione residenziale o terziaria, impone di formulare un nuovo approccio alla progettazione che non può essere improntata solo sulla ricerca estetico-formale attraverso la riproposizione indiscriminata di modelli in aree geografiche diverse, ma deve trovare nuove soluzioni declinabili a contesti ambientali diversi.

1.1 Normativa Internazionale

A livello globale sono stati emanati diversi provvedimenti e strumenti che permettono di valutare l'efficienza energetica degli edifici in modo qualitativo e quantitativo in relazione alle caratteristiche morfologiche, funzionali, tecnologiche ed impiantistiche proposte.

Negli Stati Uniti si fa riferimento a:

- Allo Statuto per il Risparmio Energetico e la Produzione (ECPA)⁶ che attribuisce a ogni stato federato le competenze in materia di regolamento edilizio locale e di certificazione degli edifici commerciali sulla base degli standard previsti dal modello «ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1.1999 - 2004». La normativa federale, che distingue due sole categorie funzionali residenziale e non residenziale, dà indicazioni in merito alle prestazioni energetiche dell'involucro edilizio, limitandosi ad indicare gli spessori minimi di isolamento per elementi verticali e orizzontali, opachi e trasparenti.

- All'U.S. Building Council⁷, organizzazione nazionale non-profit formatasi nel 1993 che ha istituito nel 2000 il «Leadership in Energy and Environmental Design» (LEED) Green Building Rating System, uno strumento di verifica dei progetti formulato con l'obiettivo di innalzare i livelli di sostenibilità delle realizzazioni architettoniche, mediante una riduzione del loro impatto globale sull'ambiente. La procedura LEED è applicabile volontariamente ed è destinata ai progettisti ed ai gestori dei processi di costruzione di edifici commerciali, pubblici, residenziali di nuova costruzione, ma può essere utilizzato anche per gli edifici esistenti oggetto d'interventi di ristrutturazione. Il metodo di certificazione è stato concepito sotto forma di checklist ed è organizzato in base a problematiche ecologiche già facenti parte del bagaglio di conoscenze degli architetti. Quest'aspetto ne facilita l'uso nel corso del processo di progettazione, permettendo di definire quali obiettivi di qualità ambientale si intendano raggiungere. L'applicazione del sistema prevede l'autocertificazione, nel senso che non contempla la figura di un ente certificatore esterno come nel caso del BREEAM⁸ inglese, e affida al progettista stesso il compito di raccogliere i dati per la valutazione e di inviarli all'organismo certificatore. La finalità del sistema LEED è quella di verificare quante e quali "misure" ecologiche siano state adottate e implementate nella costruzione. Il sistema si basa sull'attribuzione di crediti per ciascuno dei requisiti caratterizzanti la sostenibilità di un edificio adeguatamente soddisfatti. Dalla somma dei crediti conseguiti dipende il livello di certificazione ottenuto. I criteri contemplati dal metodo LEED per valutare la qualità ambientale della costruzione sono raggruppati in sei categorie: ogni categoria prevede uno o più prerequisiti prescrittivi, che devono essere soddisfatti in ogni caso per accedere alla certificazione, e un certo numero di requisiti di performance ambientale che permettono l'attribuzione di un punteggio all'edificio progettato.

La Cina ha solo recentemente maturato la volontà di avviare un forte impegno nel

miglioramento dell'efficienza energetica. Risale al 1990 l'adozione della prima normativa sull'efficienza energetica per le nuove costruzioni, anche se limitata ai sistemi di riscaldamento delle abitazioni. Successivamente le prescrizioni sono state estese agli edifici ad uso commerciale. La normativa del 1990 presenta prescrizioni di base molto semplici, ma oggi si sta lavorando all'integrazione di nuovi metodi di valutazione e a nuove prescrizioni. Il rispetto della normativa ancora oggi è molto basso: soltanto una percentuale che va dal 20% al 30% degli edifici è stata realizzata in conformità con la normativa energetica cogente.

Il Cina Energy Group ha sviluppato un quadro tecnico-normativo sugli aspetti energetici degli edifici ad uso terziario. Questo strumento normativo può essere considerato la prima vera e propria normativa energetico-edilizia elaborata in Cina (termi-

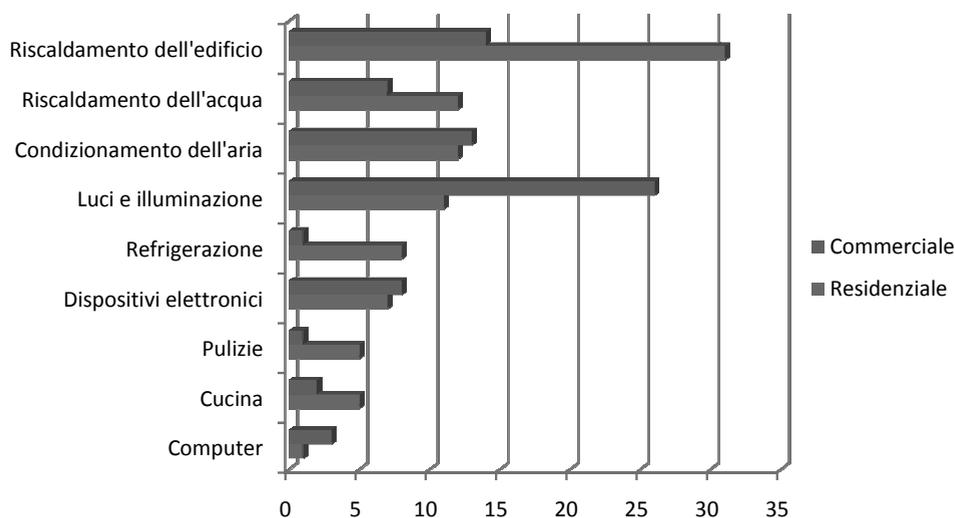


Fig. 1.4: Confronto dei consumi energetici negli edifici per uffici e negli edifici residenziali. Fonte: US EIA 1999

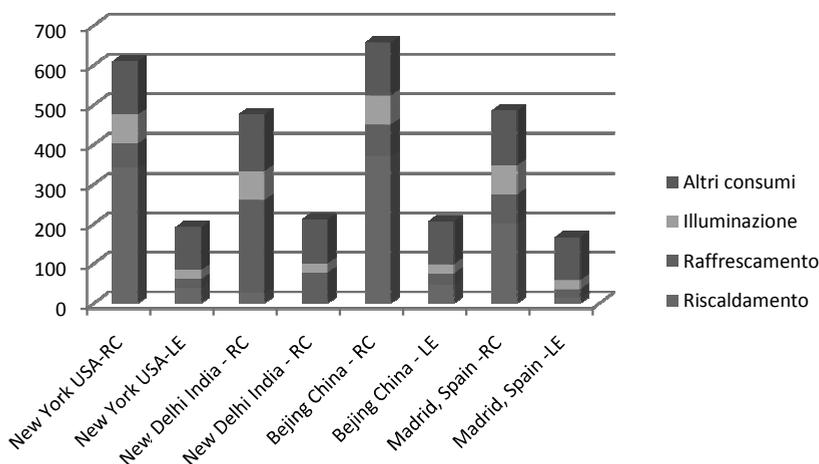


Fig. 1.5: Consumi elettrici in edifici per uffici tipo in varie località nel mondo. Fonte: US EIA 1999

nata nel 2002 e approvata nel 2004). L'obiettivo delle norme, in questo caso, è quello di ridurre fino al 50% i consumi di energia rispetto all'edilizia normale. Questo strumento normativo è stato sviluppato sulla base di standard americani e riprende i requisiti fondamentali per l'efficienza energetica direttamente dagli standard Ashrae.

In Australia il quadro delle norme energetiche obbligatorie da applicare all'edilizia è relativamente limitato, ma oltre a questo esistono sistemi di certificazione degli edifici molto sofisticati. Il sistema normativo è articolato a livello federale, regionale e locale. Le prescrizioni della normativa energetica obbligatoria sono per la maggior parte rivolte solo all'edilizia residenziale, e fanno riferimento unicamente alle prestazioni energetiche dell'edificio. La Nuova Zelanda, invece, ha sviluppato una normativa energetica, che include altri aspetti come l'illuminazione, anche per gli edifici ad uso terziario, (Australian Greenhouse Office, 2005).

Dall'inizio degli anni novanta ad oggi la Comunità Europea ha avviato una politica sociale ed economica che ha come obiettivo quello di promuovere il Risparmio e l'Efficienza energetica in tutti i settori interessati dall'attività degli Stati membri, ponendosi i seguenti obiettivi strategici:

- Riduzione del 30% delle emissioni di gas-serra rispetto ai livelli del 1990, a condizione che gli altri Paesi industrializzati facciano altrettanto, con un impegno indipendente dell'UE a raggiungere almeno il 20%.
- Riduzione dei consumi energetici di almeno il 20%.
- Raggiungere una quota del 20% del contributo delle fonti energetiche rinnovabili rispetto al consumo energetico complessivo.
- Raggiungere una quota minima del 10% di biocarburanti rispetto al totale dei consumi di benzina e gasolio.

Nel perseguire i cosiddetti obiettivi 20/20/20, all'Europa va riconosciuto il primato di aver riportato la tecnologia al centro della politica energetica. Il SET (Strategic Energy Technology Plan) adottato dal Consiglio d'Europa nel Marzo 2008, individua delle priorità tecnologiche, delinea un percorso di sviluppo e impegna l'industria e la cooperazione europea su primi programmi congiunti (European Industrial Initiatives, EII) che riguardano energia solare, eolico, sequestro della CO₂, nucleare di IV generazione, bioenergia e reti intelligenti, e che si affiancano ad iniziative pre-esistenti quali la Joint Technology Initiative (JTI) su idrogeno e fuel cells e il programma sulla fusione termoneucleare, con obiettivi di lunghissimo termine.

La Comunità Europea ha emanato nel 2002 la Direttiva Energy Performance in Building 2002/91⁹ che contiene disposizioni in merito a:

- a) alla metodologia per il calcolo del rendimento energetico integrato degli edifici;
- b) l'applicazione di requisiti minimi in materia di rendimento energetico degli edifici di nuova costruzione;
- c) l'applicazione di requisiti minimi in materia di rendimento energetico degli edifici esistenti di grande metratura sottoposti a importanti ristrutturazioni;
- d) la certificazione energetica degli edifici,
- e) l'ispezione periodica delle caldaie e dei sistemi di condizionamento d'aria negli edifici, nonché una perizia del complesso degli impianti termici le cui caldaie abbiano più di quindici anni.

La Comunità Europea indica a tutti gli Stati membri le modalità attraverso cui emanare la legislazione nazionale finalizzata al risparmio energetico nel settore dell'edilizia, sottolineando l'importanza di valutare le prestazioni energetiche di componenti, sistemi ed edifici in relazione alle condizioni climatiche locali ed alle caratteristiche dimensionali e funzionali dell'edificio. E' interessante rilevare che la direttiva eu-

ropea 2002/91 prestava particolare attenzione ai consumi energetici estivi indicando la necessità di adottare «strategie che contribuiscono a migliorare il rendimento termico degli edifici nel periodo estivo...sviluppando maggiormente le tecniche di raffresca-

CRITERI	STANDARD PASSIVHAUSE ORIGINALE	STANDARD PASSIVHAUSE ESTESO
Riscaldamento	Domanda di energia utile netta per il riscaldamento ambientale non superiore ai 15 kWh/mq di superficie netta abitabile.	Domanda di energia utile netta per il riscaldamento ambientale non superiore ai 15 kWh/mq di superficie netta abitabile.
Raffrescamento	Non è considerato	Domanda di energia utile netta per il raffrescamento ambientale non superiore ai 15 kWh/mq di superficie netta abitabile.
Energia Primaria	Domanda di energia primaria per tutti i servizi energetici inclusi riscaldamento, acqua calda sanitaria, elettricità per l'abitazione e gli ausiliari non superiore a 120 kWh/mq di superficie netta di abitazione.	Domanda di energia primaria per tutti i servizi energetici inclusi riscaldamento, acqua calda sanitaria, elettricità per l'abitazione e gli ausiliari non superiore a 120 kWh/mq di superficie netta di abitazione.
Tenuta dell'aria	L'involucro edilizio dovrebbe presentare un risultato del test di pressurizzazione (a50Pa) non superiore a 0,6 h-1, secondo la norma UNI EN 13829.	Se una buona qualità dell'aria ed un levato comfort termico sono raggiunti per mezzo di un sistema di ventilazione meccanica, l'edificio dovrebbe presentare un risultato ai test di pressurizzazione (a 50Pa) non superiore a 0,6 h-1, secondo la norma UNI EN 13829. Per località con temperature esterne invernali superiori a 0°C un risultato del test di pressurizzazione paria 1,0 h-1, può essere considerato sufficiente.
Comfort Invernale	In inverno la temperatura interna delle stanze può essere mantenuta sopra i 20°C, entro i limiti energetici su menzionati.	In inverno la temperatura interna delle stanze può essere mantenuta sopra i 20°C, entro i limiti energetici su menzionati.
Comfort estivo	Non è considerato	Nelle stagioni calde e umide la temperatura operativa deve rimanere nell'intervallo di comfort definito dalla norma EN 15251. Inoltre se è utilizzato un sistema di raffrescamento attivo la temperatura operativa può essere mantenuta sotto i 26°C.
Verifica	Tutti i valori di richiesta energetica sono calcolati secondo il Passivhouse Package (PHPP) e si riferiscono alla superficie netta abitabile.	Tutti i valori di richiesta energetica sono calcolati secondo la versione aggiornata Passivhouse Package (PHPP 2007) e si riferiscono alla superficie netta abitabile.

Tab. 1.3 – Confronto tra lo standard Passivhouse Originale e lo Standard Passivhouse Esteso. Fonte: AA.VV., *Passivhouse per il Sud Europa. Linee Guida per la progettazione*, Rockwool, Milano, 2007

mento passivo, soprattutto quelle che contribuiscono a migliorare le condizioni climatiche interne ed il microclima intorno agli edifici».¹⁰

Dalla pubblicazione della Direttiva Europea sono state avviate numerose ricerche finalizzate a dimostrare la possibilità di costruire edifici ad emissioni Zero o Passiv Hause. Le prime sperimentazioni significative si sono avute nel nord Europa, in quelle aree geografiche in cui i consumi maggiori si hanno per il riscaldamento degli edifici e non per il raffrescamento, con la conseguenza che standard e metodologie progettuali valide per quel tipo di clima sono state spesso esportate anche nell'area del mediterraneo dove invece è necessario individuare strategie finalizzate al raffrescamento passivo ed all'inerzia termica. Tra le ricerche Europee che negli ultimi anni si sono occupate di colmare questa lacuna scientifico – tecnologica ricordiamo le seguenti:

- Best practice for double-skin Facades (BESTFACADE)
- EULEB, European High Quality Low Energy Buildings
- Service buildings Keep Cool: Promotion of 'sustainable cooling' in the service building sector (KeepCool)
- Building Advanced Ventilation Technological examples (BUILDING ADVent)
- Passiv-on
- Eco-culture
- Integrated Energy Design in public buildings INTEND

BEST FACADE, in particolar modo, ha costituito un importante riferimento per il nostro lavoro di ricerca poiché ci ha permesso di avere un quadro preciso dello stato dell'arte inerente le doppie pelli trasparenti realizzate in Europa negli ultimi decenni, evidenziando la necessità di riflettere su nuove proposte progettuali inerenti questo settore e strettamente legate alle condizioni climatiche dell'area Mediterranea.

EULEB è una ricerca Europea, a cui ha partecipato anche il Centro ABITA di Firenze, che ha avuto lo scopo di fornire informazioni su edifici pubblici esistenti, non residenziali, ad alta qualità e basso consumo energetico in tutta l'Europa. I venticinque edifici analizzati attraverso la ricerca hanno permesso di valutare l'efficacia delle strategie "bioclimatiche" nelle varie zone d'Europa, in particolare l'attenzione è stata focalizzata sulle seguenti tecnologie:

- Isolamento
- Controllo Solare
- Illuminazione
- Riscaldamento
- Raffreddamento
- Ventilazione
- Materiali
- Energie Rinnovabili
- Co-Generazione
- Impiego Della Pioggia

Dai risultati della ricerca è interessante notare che nel settore di edifici per uffici consumi rimangono comunque elevati (da 100 kWh/m² a 550 kWh/m²) probabilmente perché pur prestando attenzione nella scelta di strategie relative all'involucro ed agli impianti che incrementassero l'illuminazione naturale degli spazi e l'isolamento invernale, non si è adeguatamente valutato il fabbisogno energetico nei mesi estivi, soprattutto in cui casi in cui sono state adottate grandi superfici trasparenti come soluzioni di chiusura verticale e non è stato possibile adottare efficaci strategie per la ventilazione naturale.

PASSIV-ON, sviluppata in collaborazione con il Politecnico di Milano, è stata final-

izzata a riformulare il concetto di Edificio Passivo anche per aree geografiche con clima temperato, proponendo l'utilizzo di materiali e tecnologie che limitino il fabbisogno energetico per la climatizzazione estiva e consentano di individuare uno standard di riferimento inerente alle prestazioni d'involucro e d'impianto anche e soprattutto nei mesi estivi.

Infine, La ricerca Atika che Velux sta conducendo al fine di dimostrare i benefici dell'adozione di un involucro dinamico per garantire un ottimale comfort interno anche nelle Nazioni del Sud Europa, in cui l'applicazione di grandi superfici trasparenti può causare gravi problematiche di surriscaldamento estivo. Atika è un prototipo abitativo residenziale capace di ottimizzare, attraverso la scelta oculata dei materiali con cui è costruita e della morfologia dei suoi spazi pensati per favorire la ventilazione naturale, il fabbisogno energetico globale dell'edificio: garantisce, infatti, consumi di energia primaria globale (riscaldamento + produzione di acqua calda sanitaria Epgl), che permettono di raggiungere la categoria A+ secondo il D.Lgs. 311/06 Grazie all'utilizzo degli schermi solari e della ventilazione naturale i consumi per la climatizzazione estiva si riducono da 172 kWh/m² a 41 kWh/m² con un risparmio di energia primaria superiore al 75%.

1.2 Normativa Italiana

L'Italia importa l'80% dell'energia primaria – energia elettrica e gas metano – necessaria al fabbisogno energetico nazionale dall'estero¹¹, con le conseguenze negative registrate negli ultimi anni:

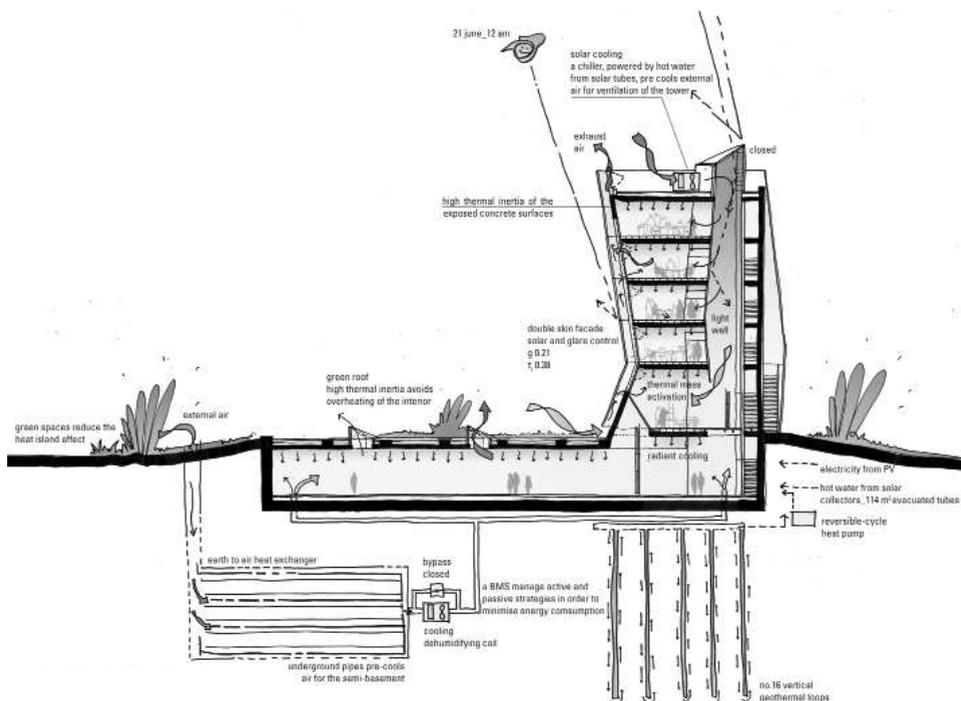


Fig. 1.6: CSET, Centre for Sustainable Energy Technologies, Mario Cucinella Architects, Ningbo, China, 2009. Sezione Bioclimatica con analisi del funzionamento nei mesi estivi.

- Black out provocati da danni sulla rete elettrica o da consumi inaspettati durante i mesi estivi dovuti all'aumento dei consumi di energia elettrica necessaria ad alimentare i condizionatori nelle abitazioni e negli uffici;
- Aumento considerevole del prezzo del gas metano. Importato in prevalenza dalla Russia che ne detiene il monopolio.

Gas e petrolio sono impiegati sia direttamente (trasporti e condizionamento estivo ed invernale), sia indirettamente (come fonte energetica primaria per produrre altre forme di energia).

La domanda di energia primaria si attesta nel 2008 a 192 Mtep, subendo una flessione di circa un punto percentuale rispetto al 2007, per una generalizzata contrazione dei consumi di tutte le fonti fossili non compensata dall'accresciuto contributo delle fonti rinnovabili. Nel corso del 2008 si è registrato un incremento del contributo da fonte idroelettrica, eolica e solare; la quota di fonti energetiche rinnovabili sul totale dei consumi primari di energia è leggermente più elevata rispetto alla media dei Paesi OCSE soprattutto grazie al notevole apporto della fonte idroelettrica.¹²

Le valutazioni sull'evoluzione del sistema energetico italiano fino al 2020 registrano un aumento medio annuo dei consumi di energia dell'ordine dell'1,2% nel primo decennio e dello 0,8% nel secondo. La tendenza è quella di sostituire progressivamente il petrolio con il gas naturale, che entro il 2020 dovrebbe diventare la fonte energetica primaria maggiormente utilizzata nel nostro Paese.

Nell'ultima decade si registra inoltre una crescita dei consumi di combustibili solidi (carbone) e delle fonti rinnovabili, con un consumo stimato entro il 2015 di 19 Mtep. In questo momento, le politiche energetiche italiane sono finalizzate a ridurre la dipendenza energetica dall'estero, limitando contemporaneamente l'emissione di sostanze nocive attraverso il ricorso alle fonti energetiche rinnovabili e, negli ultimi anni, al nucleare per la produzione di energia elettrica.

Il piano energetico nazionale, sviluppato in conseguenza della direttiva europea 2006/32/CE, punta a raggiungere l'obiettivo del 9% di risparmio energetico entro il 2016, attraverso tre punti:

1) mantenere almeno per alcuni anni misure già adottate (quali la riqualificazione energetica nell'edilizia, la riduzione del carico fiscale per il Gpl e gli incentivi per creare un parco auto ecologico e diminuire l'inquinamento; gli incentivi al sistema agro-energetico, le detrazioni fiscali per motori industriali efficienti; gli sgravi per elettrodomestici ad alta efficienza, promozione della cogenerazione ad alto rendimento);

	Prodotti petroliferi	Gas naturale	Combustibili solidi	Fonti rinnovabili	Energia elettrica	Totale
Produzione	5,4	10,7	0,4	13,5	-	30
Importazione	107,6	55,5	17,1	0,6	10,2	191
Esportazione	24,7	0,1	0,1	-	0,2	25,1
Variazioni scorte	0,3	-0,1	0,3	-	-	0,5
Consumo interno lordo	88	66,2	17,1	14,1	10	195,5
Variazioni 2003/2004	-3,1%	+3,8	+11,5	+ 17,5	-10,5 (importazioni)	+1,2

Tabella 1.4: Approvvigionamento energetico italiano nel 2004 (Mtep). Fonte: Rapporto Energia e Ambiente 2005, ENEA

2) attuare misure in corso di recepimento, come la direttiva Ue sull'eco-design per la quale è già pronto uno schema di decreto legislativo che, in linea con le norme europee, stabilirà per tutti i prodotti e servizi che incorporano l'uso dell'energia l'obbligo di essere messi in commercio corredati da una specifica etichettatura di conformità agli standard europei.

3) introdurre a partire dal 2009 il limite di 140 grammi di CO₂/km alle emissioni medie delle autovetture, corrispondente ad un risparmio di 23.260 GWh/anno e cioè il 18% dell'obiettivo complessivo. Tra gli interventi di cui l'action plan considera c'è anche il Progetto di innovazione industriale sull'Efficienza energetica nell'ambito del piano industria 2015.

In Italia, tuttavia, secondo i rapporti ENEA le fonti energetiche rinnovabili, hanno contribuito nel 2007 a poco più del 7% del consumo interno lordo. Tale percentuale è imputabile per il 65% del totale all'idroelettrico, con un 14,5% riconducibile al settore della biomassa e dei rifiuti, l'11,3% alla geotermia e solo un 9,2% all'energia eolica (8,2%) e solare termica (0,1%) e fotovoltaica.

A livello mondiale l'Agenzia Internazionale di energia indica che nel 2003 le fonti energetiche rinnovabili hanno coperto il 13,3% dell'offerta totale di energia primaria, con una produzione di energia equivalente a 1.404 Mtep, pari a 10.579 Mtep. Nello stesso anno il petrolio ha contribuito all'offerta di energia primaria per il 34,4%, contro il 24,4% del carbone, il 21,2% del gas naturale e il 6,5% del nucleare.

Le fonti energetiche fossili, con oltre l'80% dell'offerta primaria, hanno rappresentato ancora nel 2007 la principale fonte di approvvigionamento energetico e, secondo le previsioni dei principali osservatori internazionali, manterranno questo ruolo almeno per un decennio.

Il trend nazionale di produzione energetica da rinnovabili ha fatto segnare, negli ultimi cinque anni, una forte fluttuazione dell'idroelettrico, condizionata da: fattori climatici; un buon incremento dalla produzione da biomassa e rifiuti. Tale produzione si è comunque attestata a valori molto lontani da quelli dei Paesi europei, pur con un leggero incremento della produzione da fonte geotermica ed eolica. Il solare fotovoltaico ed il solare termico registrano un leggero aumento dovuto agli incentivi statali che promuovono l'utilizzo di queste tecnologie a scala urbana e architettonica. Dobbiamo tut-

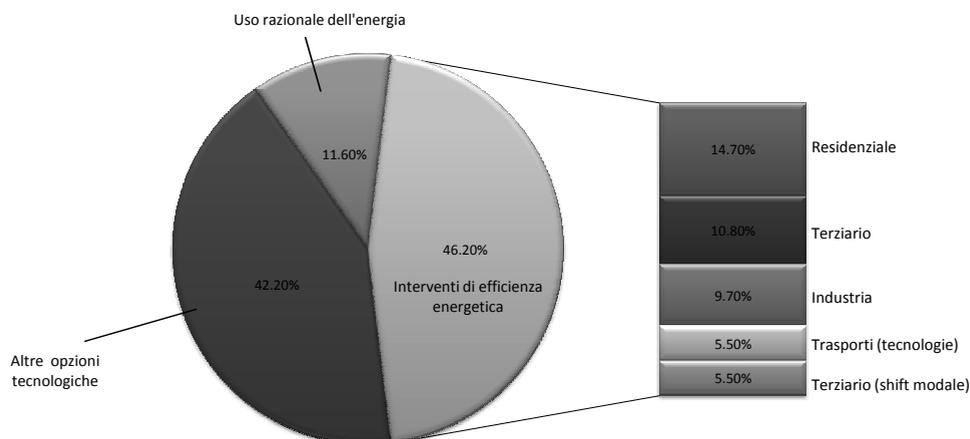


Fig. 1.7: Contributo delle opzioni di efficienza energetica negli usi finali alla riduzione di emissioni di CO₂ nello scenario ACT + rispetto allo scenario di riferimento. Fonte: elaborazione dati ENEA

tavia ricordare che il sistema degli incentivi alle rinnovabili in vigore in Italia, ha determinato non poche distorsioni, dimostrandosi funzionale, più che al conseguimento di obiettivi di sviluppo delle rinnovabili sul lungo periodo, all'incentivazione – sia in forma diretta che indiretta (esenzioni) – di una vasta gamma di settori del panorama elettrico estranei alle rinnovabili.

Le politiche incentivanti, come il conto energia o altre forme di finanziamento locali e regionali, hanno inoltre causato la diffusione incondizionata di tecnologie quali il fotovoltaico anche in situazioni nelle quali sarebbe stato sicuramente più proficuo adottare altre tecnologie.

La necessità di incrementare l'efficienza energetica nazionale, intervenendo sul settore delle costruzioni, a cui come abbiamo visto sono imputabili i maggiori consumi energetici, ha determinato il rilancio della ricerca e della produzione industriale legata a prodotti innovativi che consentono non solo di ridurre le dispersioni e/o i guadagni energetici positivi e negativi, ma garantiscono di trasformare l'involucro architettonico in un componente capace di produrre energia necessaria al fabbisogno energetico dell'edificio.

Gli scenari energetici elaborati per l'Italia mostrano come, nel breve-medio periodo (2020), la possibilità di riduzioni consistenti dei consumi di energia, e più ancora delle emissioni di CO₂, sia legata in primo luogo a un uso massiccio di tecnologie più efficienti, il che richiede evidentemente investimenti per la diffusione e lo sviluppo di tecnologie innovative: quasi il 50% dell'abbattimento dipende, infatti, dalla riduzione dei consumi energetici nei settori di uso finale, grazie in primo luogo all'accelerazione

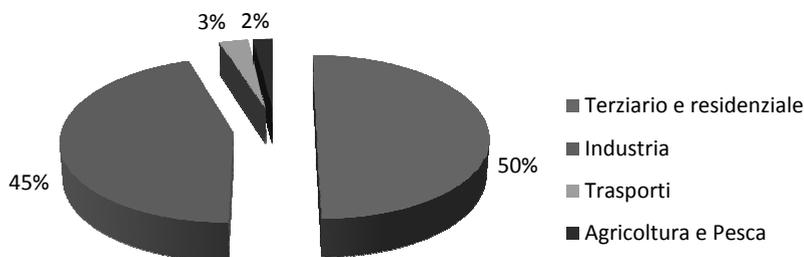
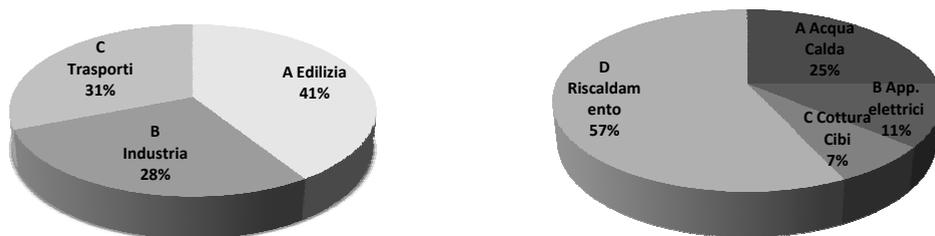


Fig. 1.8: Energia elettrica. Consumi per settore uso finale, Italia 2007. Valori percentuali. Fonte ENEA sui dati MISE (Bilancio sintetico 2007)



A sinistra Fig. 1.9: Consumi energetici in Italia differenziati per settore. A - Settore edilizio; B - Industria; C - Trasporti. Fonte: ENERDATA. A destra Fig. 1.10: Consumi energetici nel settore edilizio in Italia: A - Produzione acqua calda; B - Apparecchi elettrici; C - Cottura cibi; D - Riscaldamento. Fonte: ENERDATA

nella sostituzione delle tecnologie.

Tra le diverse opzioni il potenziale maggiore si ha nel settore residenziale (più di 15 Mt di CO₂) e in modo quasi equivalente dal settore dei trasporti.

A tutto ciò si aggiunge infine il potenziale contributo rilevante delle opzioni di riduzione della domanda di servizi energetici, che implicano cambiamenti nei «modelli di uso dell'energia» da parte dei consumatori.¹³

Dal «piano d'azione per l'efficienza energetica esteso al 2020» sviluppato da e da ERSE, in collaborazione con la task-force sull'efficienza energetica istituita dal Ministero dello Sviluppo Economico, presentato a settembre 2007, emerge come uno degli obiettivi che il Governo ha già intrapreso ed intende proseguire per centrare l'obiettivo di risparmio energetico del 9,6% entro il 2016 (circa 11 Mtep), sia quello di intervenire in modo efficace attraverso l'innovazione tecnologica nel settore terziario, annoverato tra le macroaree rispetto alle quali sono configurati scenari d'intervento efficaci. In questo settore le misure di miglioramento dell'efficienza energetica riguardano quattro categorie d'intervento:

- riscaldamento efficiente,
- condizionamento efficiente,
- illuminazione degli edifici,
- illuminazione pubblica.

Come nel caso del settore residenziale tali misure derivano dalla direttiva sulla certificazione energetica degli edifici (relativamente all'efficienza nel riscaldamento e nel condizionamento) e dalla Direttiva 92/75/CEE EUP. In questo caso, i risparmi aggiuntivi a livello di edificio sono dovuti principalmente al miglioramento della climatizzazione (estiva e invernale) e alla maggiore efficienza dei sistemi d'illuminazione.

Dal punto di vista normativo l'Italia ha recepito le Direttive Europee 2002 /91 CE e 2006/32 CE. In particolare le indicazioni dell'EPBD sono state trasferite nelle leggi emanate a partire dal 2005 in materia di efficienza energetica degli edifici; dal D.Lgs. 192/2005 ai recenti Decreti attuativi, anche l'attenzione del legislatore si è spostata sulla necessità di indicare nuovi modi di costruire e consumare energia all'interno dei nostri fabbricati, indicando le prestazioni che gli elementi d'involucro e d'impianto devono garantire per il ridurre il fabbisogno energetico per il riscaldamento ed il raffrescamento. La recente adozione delle norme UNITS 11300 come strumenti di riferimento per il calcolo del fabbisogno energetico degli edifici ha inoltre colmato la lacuna registrata nel nostro paese in merito all'assenza di indicazioni precise per valutare l'efficienza energetica durante tutto l'arco dell'anno – inverno ed estate - ed in relazione alle diverse fasce climatiche. Le UNITS 11300 sulle prestazioni energetiche degli edifici si dividono in quattro parti:

- Parte prima Determinazione del fabbisogno di energia dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale.
- Parte seconda. Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria.
- Parte terza. Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva.
- Parte quarta. Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per riscaldamento di ambienti e produzione di acqua calda sanitaria.

Attualmente sono state pubblicate la parte prima e seconda, è quindi possibile calcolare le prestazioni dell'involucro in relazione alle sue caratteristiche tecnico-morfologiche durante tutto l'arco dell'anno e di conseguenza determinare la prestazione dell'impianto che dovrà fornire energia per il riscaldamento e l'acqua calda sanitaria. E'

interessante notare che la parte prima permette di determinare il Fabbisogno Energetico di energia Primaria Estivo dell'Involucro (Epe inv.), espresso in kWh/mq (residenziale) o in kWh/mc (non residenziale), strettamente dipendente dall'inerzia termica dei componenti opachi e dalle caratteristiche dei componenti trasparenti (superficie, apporti solari, presenza e caratteristiche delle schermature).

La conseguenza diretta di queste norme tecniche sarà la necessità di proporre nuovi modelli di edifici a emissioni zero anche per l'Area Mediterranea, dove negli ultimi anni si esportavano modelli architettonici caratterizzati da involucri ermetici e iper-isolati incapaci di garantire buone condizioni di comfort anche nei mesi con le temperature più elevate.

1.3 Il mercato dell'involucro edilizio in Italia. Situazione attuale e prospettive di crescita

Secondo il rapporto UNCSAAL¹⁴ 2009- 2010, il settore legato alla produzione di componenti di facciata, nonostante un fisiologico decremento della produzione dovuto alla crisi economica, sta puntando verso un'innovazione di prodotto sempre più evoluta che mira alla produzione di componenti innovativi ed energeticamente efficienti.

Nel 2009, indipendentemente dal trend congiunturale negativo, si è ulteriormente consolidata, rispetto agli anni precedenti, la tendenza di affermazione sul mercato di serramenti con elevati contenuti estetici.

Riguardo al mercato delle facciate continue, Uncsaal, sempre attraverso l'analisi dei bilanci delle più rappresentative imprese del settore, stima che nel 2009, in Italia, siano state realizzate facciate per un totale complessivo di 630 milioni di euro con una sostanziale conferma dell'andamento del 2008.

Questo risultato è stato determinato principalmente da due fattori:

- Il completamento di grandi realizzazioni provenienti da commesse, in Italia e all'estero, degli anni passati.
- L'accelerazione della diffusione, già registrata da alcuni anni, di interventi medio piccoli di involucro destinati a centri commerciali, showroom, edifici direzionali.¹⁵

La normativa Europea 2002/91 CE ed i provvedimenti legislativi adottati in tutti gli Stati Europei hanno incrementato la ricerca inerente le prestazioni energetiche, in termini di trasmittanza e fattore di assorbimento, legata alle superfici trasparenti. La richiesta del mercato di prodotti che permettessero di soddisfare le esigenze dettate dai provvedimenti legislativi ha permesso a questo settore industriale di sopportare il difficile momento economico attualmente in atto. Nei prossimi anni: la cogenza della Marcatura CE; le legislazioni sul risparmio energetico; le detrazioni del 55% e in generale l'aumento della domanda di qualità da parte dei consumatori; renderanno necessaria una nuova industrializzazione dell'intera filiera produttiva dei serramenti metallici con un incremento ed una maggiore specializzazione degli operatori interessati.

Sarà quindi necessario introdurre sul mercato dei prodotti dell'involucro edilizio, dei serramenti e delle facciate, componenti innovativi caratterizzati dall'adozione di nuove tecniche costruttive e dalla possibilità di rispondere alla domanda di soluzioni integrate 'alternative', ecosostenibili e determinanti per il risparmio energetico.

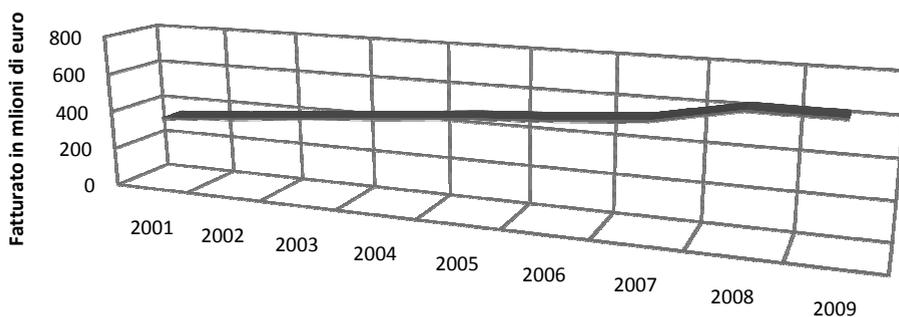
La tendenza nazionale è quella di puntare all'innovazione di prodotto ed all'innovazione del processo produttivo, promuovendo una sinergia operativa che prenda in esame non solo qualità e le prestazioni dei prodotti, ma anche la brandizzazione, la distribuzione, la penetrazione del mercato, l'intermediazione e il prezzo.

Le parole chiave su cui si potrà analizzare lo sviluppo industriale di questo settore nei prossimi anni saranno quindi:

- Competizione tra tipologie ed approcci costruttivi differenti,
- Utilizzo di materiali innovativi,
- Competizione sulle prestazioni,
- Ricerca di soluzioni alternative ecosostenibili e determinanti per il risparmio energetico.

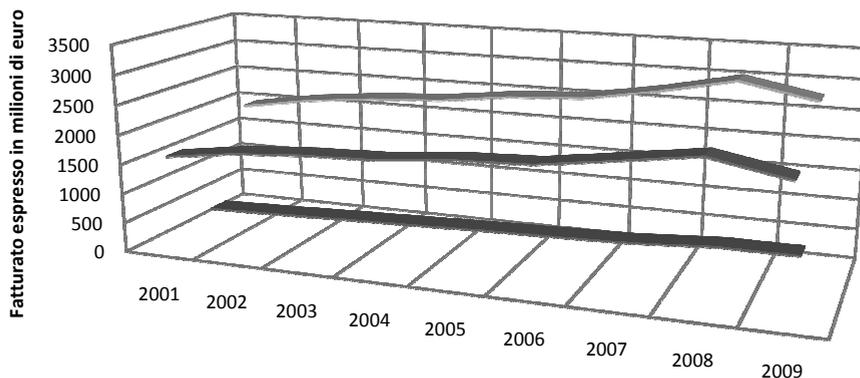
Numerose aziende si stanno specializzando nella produzione di prodotti ad alte prestazioni e ad elevato valore aggiunto (domotica, design, ecc...), riuscendo in questo

Facciate continue



	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
■ Facciate continue	352	382	420	453	490	516	550	633	630

Fig. 1.11: Evoluzione del fatturato italiano dell'involucro edilizio nel decennio 2001-2009. Fonte: UNCSAAL



	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
■ Serramenti metallici	1600	1760	1840	1875	1987	2028	2200	2376	2138
■ Facciate continue	352	382	420	453	490	516	550	633	630
■ Involucro edilizio	1952	2142	2260	2328	2477	2544	2750	3009	2768

Fig. 1.12: Evoluzione del fatturato italiano dell'involucro edilizio nel decennio 2001-2009. Fonte: UNCSAAL

modo a penetrare il mercato internazionale grazie alla possibilità di fornire prodotti altamente innovativi frutto dell'esperienza ultradecennale acquisita dalla manifattura locale. È interessante notare che aziende italiane come Permasteelisa, Metra e Focchi riescono ad esportare anche all'estero i manufatti della loro produzione, fornendo soluzioni d'involucro e/o di facciata adeguate alle necessità di ogni tipo di progetto.

Come precedentemente ricordato, è evidente che il mercato delle facciate continue in Italia è strettamente connesso al settore edilizio degli edifici per uffici e per le attività commerciali, caratterizzati spesso da facciate doppie pelli trasparenti, scelte come soluzione tecnologica di chiusura perché capaci di rappresentare formalmente il brand del committente che si esprime sempre più spesso attraverso l'architettura dell'edificio che lo rappresenta.

Gli involucri trasparenti ed altamente tecnologici si sono diffusi indiscriminatamente in tutto il mondo occidentale a partire dagli anni novanta, e possono essere considerati il frutto del trasferimento inconsueto di un modello tecnologico di chiusura verticale nato nel nord Europa, per ridurre i consumi energetici degli edifici sfruttando l'effetto serra nei mesi invernali, in aree geografiche connotate dalla presenza di involucri massivi che garantivano altre prestazioni fisiche oltre all'isolamento termico, quali l'inerzia e l'assorbimento della radiazione solare.

La necessità di riformulare nuove tipologie d'involucro trasparente in relazione al clima mediterraneo, indurrà sicuramente i progettisti e le aziende di settore a proporre nuovi componenti di facciata capaci di garantire prestazioni termo-igrometriche corrispondenti a quelle indicate dai recenti riferimenti normativi, prevedendo la possibilità di integrare sistemi per la produzione di energia rinnovabile.

La ricerca condotta nella fase di analisi dei casi studio ci ha dimostrato che a livello internazionale, dopo una prima fase di riproposizione sistematica del modello di facciata doppia pelle trasparente in tutto il mondo occidentale, si comincia a registrare la diffusione di nuovi prodotti e sistemi di involucro vetrato orientati ad una nuova idea del componente trasparente, rimodulato sulla necessità di garantire prestazioni variabili nell'arco dell'anno e di regolare fenomeni fisici, quali la ventilazione naturale dell'intercapedine e la modulazione del fattore di assorbimento e riflessione degli elementi adottati, con l'obiettivo di ridurre il carico energetico nei mesi estivi.

Da questa riflessione nasce la volontà di sviluppare un concept per un sistema di facciata doppia pelle trasparente capace di garantire buone prestazioni anche in una fascia climatica, come quella mediterranea, caratterizzata da inverni miti ed estati calde e che, sfruttando la possibilità di integrare sistemi di automazione, garantisca una variabilità di conformazione durante l'arco dell'anno, modulando le sue prestazioni alle condizioni di comfort interno ed alle condizioni climatiche ambientali.

Conclusioni

Dall'analisi avviata in questo capitolo sulla situazione energetica globale e locale e gli sviluppi sociale e d'economici ad essa legati, emerge come le strategie e le politiche internazionali siano orientate a diminuire i consumi energetici per ridurre conseguentemente l'emissione di sostanze nocive in atmosfera e alleviare l'impatto ambientale dell'umanità.

Uno dei settori su cui è necessario intervenire, con investimenti che riguardano prevalentemente lo sviluppo tecnologico, è sicuramente quello delle costruzioni, che concorre quasi e quanto il settore dell'industria ad inquinare il Pianeta. Una rilevante inefficienza nei consumi finali di energia è imputabile ai settori dell'edilizia residenziale

e terziaria; settori rispetto ai quali sono stati emanati negli ultimi decenni, a scala internazionale e locale, provvedimenti normativi atti ad incrementarne le prestazioni. Se l'edilizia residenziale è quella che necessita delle maggiori attenzioni perché energeticamente più inefficiente del settore terziario, quest'ultimo presenta delle problematiche legate alla gestione dei sistemi di illuminazione e condizionamento estivo che richiedono interventi nel breve termine. Intervenire su edifici non residenziali permette di dimostrare l'efficacia dell'adozione di nuove tecnologie d'involucro e d'impianto destinate al contenimento dei consumi energetici ed alla produzione di energia da fonti rinnovabili.

Emerge, infine, la necessità di trovare nuovi modelli costruttivi che garantiscano condizioni di comfort estivo e non solo invernale, introducendo nuovi parametri di verifica delle prestazioni dell'involucro, quali l'inerzia termica e/o il controllo dell'assorbimento solare da parte delle superfici trasparenti, attraverso il ripensamento di alcune tecnologie (pareti multistrato iperisolate, facciate trasparenti, sistemi di ventilazione meccanica e controllata) che spesso sono state importate dal Nord al Sud Europa senza valutare il loro impatto negativo nelle stagioni dell'anno più calde. In Europa ed in Italia sono state avviate negli ultimi anni interessanti ricerche finalizzate a proporre nuovi modelli di edifici a zero emissioni e/o passivhouse adatte al clima Mediterraneo, e si registra la volontà, rilevata in più sedi istituzionali riconosciute, di promuovere nei prossimi decenni l'innovazione tecnologica legata alle prestazioni dell'edificio nei mesi estivi.

L'input dato dall'apparato normativo europeo, in merito alla necessità di riformulare le prestazioni dell'involucro edilizio trasparente, ha permesso al settore industriale coinvolto di resistere alla crisi economica degli ultimi anni, puntando alla ricerca ed allo sviluppo di nuovi prodotti (dalle finestre ai componenti di facciata), capaci di rispondere alle indicazioni prescrittive di carattere normativo, garantendo la riduzione dei consumi energetici a scala dell'edificio.

La ricerca in oggetto si pone quindi l'obiettivo di indagare, nell'ambito degli edifici per uffici, nuove soluzioni d'involucro dinamico e trasparente, con l'obiettivo di permettere l'adozione di questa tecnologia, che continua a trovare largo successo nel mondo delle costruzioni, anche in una fascia climatica temperata nella quale senza l'opportuna adozione di accorgimenti atti a limitare gli apporti solari, potrebbe incrementare i consumi energetici degli edifici.

Note

¹Il dato è riferito alle quotazioni della Borsa di New York del 27 febbraio 2007.

²Il Club di Roma è un'associazione non governativa fondata nel 1968, la sua missione è di agire come catalizzatore dei cambiamenti globali, individuando i principali problemi che l'umanità si troverà ad affrontare, analizzandoli in un contesto mondiale e ricercando soluzioni alternative nei diversi scenari possibili.

³Commissione mondiale sull'ambiente e lo sviluppo, Rapporto Brundtland «Il futuro siamo noi», 1987. Nel rapporto Brundtland è celebre l'affermazione: «Lo sviluppo sostenibile è uno sviluppo che soddisfa i bisogni del presente senza compromettere le necessità delle generazioni future», spostando l'attenzione dalle problematiche globali a scala ambientale alle tematiche legate allo sviluppo sociale ed economico delle popolazioni di tutte le epoche storiche, presenti e future.

⁴Autori Vari, *Rapporto Energia e Ambiente 2008. Analisi e Scenari*, ENEA, Roma, Settembre 2009

⁵Autori Vari, *Rapporto Energia e Ambiente 2008. Analisi e Scenari*, ENEA, Roma, Settembre 2009

⁶U.S. Energy Conservation and Production Act.

⁷ <http://www.usgbc.org/Displaypage.aspx?categoryID=19>

⁸Il sistema BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), il primo strumento di tipo commerciale per la valutazione della qualità ambientale degli edifici sviluppato nel 1990, è diventato un punto di riferimento per i metodi prodotti successivamente.

⁹Direttiva europea del Parlamento Europeo e del Consiglio 2002/91/CE, Gazzetta ufficiale delle Comunità europee, del 4 gennaio 2003

¹⁰Direttiva europea del Parlamento Europeo e del Consiglio 2002/91/CE, Gazzetta ufficiale delle Comunità europee, del 4 gennaio 2003

¹¹Rispetto alla media dei ventisette Paesi dell'Unione Europea, i consumi di energia primaria in Italia si caratterizzano per un maggiore ricorso a petrolio e gas, per una componente strutturale di importazioni di elettricità (circa il 5% dei consumi primari), per un ridotto contributo del carbone (pari al 9% dei consumi primari di energia) e per l'assenza di generazione elettronucleare. Da: Autori Vari, *Rapporto Energia e Ambiente 2008. Analisi e Scenari*, ENEA, Roma, Settembre 2009

¹²Autori Vari, *Rapporto Energia e Ambiente 2008. Analisi e Scenari*, ENEA, Roma, Settembre 2009

¹³Autori Vari, *Rapporto Energia e Ambiente 2008. Analisi e Scenari*, ENEA, Roma, Settembre 2009

¹⁴Uncsaal, l'Unione Nazionale Costruttori Serramenti Alluminio Acciaio e Leghe, è l'Associazione confindustriale delle imprese italiane che operano nel comparto dell'involucro edilizio, nata nel 1972 per iniziativa di un piccolo gruppo di aziende italiane del settore dei serramenti e delle facciate continue. Uncsaal rappresenta e associa le migliori realtà industriali dell'intera filiera produttiva: i costruttori di serramenti e facciate continue, gli estrusori, i produttori di accessori e componenti per l'isolamento e la tenuta, i posatori e gli studi professionali impegnati nell'involucro edilizio.

¹⁵Osservatorio Economico Uncsaal, *Il mercato dell'involucro edilizio in Italia. Serramenti Metallici Facciate Continue. Anno 2009. Scenari 2010*, gennaio 2010.

Capitolo 2

Involucro Architettonico Dinamico

2.1 Evoluzione delle prestazioni energetiche dell'involucro architettonico

Per gli esseri umani la necessità di costruire artificialmente il proprio habitat è legata all'evoluzione antropologica del passaggio dallo stato di vita nomade a quello sedentario che ha comportato l'esigenza di delimitare fisicamente spazi costruiti distinti, per caratteristiche e condizioni fisiche, dagli spazi naturali esterni. Per creare questi luoghi artificiali nei quali condurre le attività primarie del vivere l'essere umano ha sviluppato sistemi e componenti di separazione sempre più complessi, capaci di garantire, in ogni istante, condizioni di vita mutevoli tra un ambiente e l'altro. I luoghi costruiti si sono così evoluti nel tempo con una generale indifferenza dalle condizioni climatiche esterne, potendo ricreare condizioni vitali dissimili da quelle dello spazio limitrofo. Questa caratteristica ha portato ad un'artificializzazione degli stili di vita, associata ad una minor adattabilità, imponendo un sistema di bisogni più complesso e diversificato. Col passare del tempo, l'esigenza legata all'indipendenza tra lo spazio indoor e lo spazio outdoor si è progressivamente arricchita, con la conseguente necessità di elaborare tecnologie in grado di soddisfare classi di requisiti che vanno dal controllo degli agenti atmosferici alla rappresentatività della funzione sociale dell'edificio. Le architetture si sono, quindi, evolute nel tempo da semplice riparo dalle intemperie (dalla pioggia, dal vento, dal sole, dall'intrusione di persone o animali, dal freddo, dal caldo, ecc.), ad elemento rappresentativo delle potenzialità della società stessa (grazie alle soluzioni formali e materiche adottate), a sistema di regolazione del comfort interno (attraverso la quantità e la qualità dell'illuminazione, della ventilazione, del riscaldamento e del raffrescamento).

Durante gli anni del Rinascimento e dell'Umanesimo e in parallelo con la progressiva rivalutazione dell'autonomia dello spirito individuale, la parete esterna viene enfatizzata fino a diventare una vera 'parete da esposizione'. Tale processo si accentua ancora in età barocca: diventa usuale che le facciate rivolte verso le strade e le piazze si trasformino in grandi quinte scenografiche, finendo per svincolarsi quasi del tutto dall'organismo edilizio e rivaleggiando con le altre facciate esterne quanto a sovrabbondanza di forme ed a impiego di materiali pregiati e di mezzi artistici significativi. In questo caso ciò che ha importanza decisiva per la facciata è, molto più degli aspetti tecnici o funzionali, il suo divenire un mezzo per ottenere un particolare effetto architettonico. La parete esterna diventa un supporto iconografico ornato di rilievi, sculture, pitture, mosaici e

La NORMA UNI 8290 all'interno del sistema tecnologico classifica il sistema delle chiusure in chiusure verticali, orizzontali (superiore e inferiore) e inclinate; dove per chiusure verticali si intendono le pareti perimetrali verticali e gli infissi esterni; e per chiusure orizzontali o inclinate si intendono le coperture, isolai su spazi aperti e le relative modalità di attacco a terra

scritte, e gli elementi funzionali primari diventano tutti oggetto della più raffinata arte decorativa.¹

Con l'affermarsi di modi di vita sempre più complessi, si adottano tipologie architettoniche più evolute, in cui alle esigenze tecnologiche legate alla sicurezza degli utenti vengono coniugate nuove soluzioni inerenti il comfort indoor e la celebrazione estetica; si passa come ricorda Federico Butera in un suo celebre libro 'Dalla caverna alla casa ecologica'² attraverso lo sviluppo di modelli dell'abitare sempre più complessi che in tempi recenti propongono soluzioni legate alla sostenibilità ambientale.

L'involucro architettonico ha quindi registrato una trasformazione strettamente legata all'evoluzione delle scoperte che hanno caratterizzato la specie umana nei secoli, evolvendosi in relazione all'uso dei materiali ed alla possibilità di sfruttare le loro caratteristiche per garantire condizioni termo-igrometriche adeguate all'interno degli spazi confinati. Formalmente e fisicamente l'architettura si è evoluta dai modelli più semplici e minimalisti di insediamento, quali le tende o le grotte, a sistemi più complessi caratterizzati sino agli inizi dell'ottocento dalla presenza di grandi masse murarie che in corrispondenza della rivoluzione industriale hanno perso consistenza a favore di involucri sempre più leggeri e trasparenti. I decenni successivi al 1870, infatti, sono caratterizzati dallo sviluppo di nuovi sistemi costruttivi spesso realizzati in fabbrica e poi assemblati in cantiere in cui sono adottati nuovi materiali (come ad esempio gli isolanti termici o le nuove superfici vetrate).

L'architettura razionalista, scarna ed essenziale, sostituisce la ricca corporeità del passato con la volumetria, coerentemente con la ricerca spazio-funzione che rappresenta il suo obiettivo prioritario e si esprime in forme pure prive di qualsiasi decorazione superficiale. Da ciò si comprende il progressivo indebolimento del valore della facciata, ridotta ad anonimo ed insignificante involucro totalmente indipendente dal proprio contenuto.



Fig. 2.1: Monastero La Tourette, Le Corbusier, Lione, 1957

I nuovi edifici perdono ogni rapporto con il contesto, con la morfologia del territorio e con le tipologie locali precedenti, internazionalizzandosi nell'aspetto e nelle volontà. A domande edilizie sempre differenti, condizionate dalle caratteristiche dell'ambiente esterno, si risponde sempre nello stesso modo, rendendo il linguaggio architettonico universale ma poco adeguato a richieste ambientali più specifiche. L'involucro si trasforma in un sistema di funzioni complesse, talvolta incapace, però, di apportare modifiche appropriate alle qualità termiche dell'edificio. L'invenzione e l'introduzione in campo edilizio di sistemi di riscaldamento e raffrescamento (avvenuta per la prima volta all'interno del Larkin Building costruito a Buffalo da F. L. Wright) hanno, infatti, reso l'involucro, un sistema indipendente dalle condizioni climatiche esterne. Le facciate, rappresentative di una concezione che pervade un'intera epoca, diventano sempre più 'leggere', fino a trasformarsi in curtain wall. Le grandi superfici trasparenti determinano l'incremento delle temperature indoor nei mesi estivi a causa dell'irraggiamento diretto, mentre nei mesi invernali comportano copiose dispersioni di calore verso l'esterno. Il discomfort causato dalle proprietà intrinseche del vetro è bilanciato solo grazie alla presenza dei sistemi impiantistici che provvedono alla climatizzazione dell'ambiente durante tutte le stagioni dell'anno.

Almeno fino al tardo Ottocento, alle partizioni esterne, massicce e impenetrabili, era, infatti, affidato il compito di esprimere e rappresentare la funzione e il decoro dell'edificio e lo studio delle facciate si concentrava sull'elaborazione di codici, come stile e decorazione, da imprimere alle superfici dell'involucro come ad una pagina su cui scrivere.

1800	<p>Introduzione del concetto di flusso di calore, gradiente termico e conduttività termica</p> <p>Introduzione del valore di K per indicare la trasmittanza termica di un corpo</p>
1850	<p>Palazzo di cristallo Londra.</p> <p>Introduzione al concetto di dispersione termica per trasmissione ed areazione</p> <p>Brevetto sulle vetrate isolanti</p> <p>Prima facciata con collettori ad aria (USA)</p>
1900	<p>Prima facciata doppia pelle stabilimento industriale a Steiff, Germania</p> <p>Brevetto per elementi isolanti in sughero</p> <p>Prima facciata a vetri ventilata. Hallidie Building, San Francisco, USA</p> <p>Produzione del vetro isolante</p> <p>Brevetto del vetro a protezione solare</p>
1950	<p>Sviluppo di sostanze isolanti minerali</p> <p>Sviluppo del sistema di isolamento termico a cappotto</p> <p>Introduzione del concetto di fisica delle costruzioni</p> <p>Sviluppo del muro di Trombe</p>
2000	<p>Casa Passiva</p> <p>Plusenergiehaue</p>

Nel 1926 Le Corbusier indica la 'facciata libera' come uno dei suoi cinque punti della nuova architettura, definendo così la 'pelle' dell'edificio come una leggera membrana indipendente dalla struttura.

L'involucro acquista un aspetto innovativo, abbandonando la massività necessaria per la realizzazione delle strutture edilizie a muri portanti e superando quella concezione ormai consolidata che vede la partizione esterna come barriera visiva tra interno ed esterno.

L'edificio trasparente, diventa così espressione della nuova architettura capace di rigenerare e affrancare la società che la produce attraverso la sua consistenza effimera, ed assume, nel mondo contemporaneo, un valore 'ermeneutico', interpretando la realtà e facendone emergere l'essenza più profonda; i curtain wall attuali esprimono enigmaticità in quanto la passata trasparenza è stata sostituita dalla riflessione dell'ambiente esterno.³

La trasformazione delle strutture massive e pesanti in sistemi più leggeri e sottili è avvenuta in funzione della necessità di emancipare le funzioni dell'involucro da quelle dell'edificio.

Il modello architettonico proposto dal movimento moderno, riconoscibile per l'inconsistenza materica dei suoi confini fisici comincia a manifestare le sue carenze in termini di efficienza energetica negli anni settanta, in corrispondenza della prima crisi energetica, quando i sistemi impiantistici di condizionamento, a causa della mancanza delle fonti energetiche fossili, non riescono a garantire le prestazioni termiche degli spazi confinati. È proprio in questi anni che si diffonde una nuova coscienza ecologista anche nell'ambito della cultura architettonica, promuovendo nuovi modelli dell'abitare che puntano a riproporre, in chiave contemporanea, soluzioni tecnologiche del passato, capaci di sfruttare passivamente ed attivamente le fonti energetiche naturali per soddisfare il fabbisogno energetico degli edifici.

In questo momento storico, caratterizzato da un incremento considerevole del prezzo del petrolio, l'involucro edilizio è stato oggetto di particolare attenzione per quanto riguarda l'isolamento termico. Si sviluppano, in tutta Europa, le tecniche per coibentare gli elementi di involucro opaco (tamponamenti, coperture, pavimenti) e si diffondono i vetri a camera ed i serramenti a taglio termico e con tenuta all'aria, in grado di abbattere il valore della trasmittanza termica degli elementi vetrati di oltre il 50 per cento. Contemporaneamente si fa strada nella pratica architettonica il cosiddetto approccio bioclimatico teorizzato già negli anni sessanta da Victor Olgyay nel suo libro «Design with climate».⁴

L'involucro, che dall'età industriale in poi diventa 'assoluto' rispetto alle caratteristiche climatiche locali, ritorna a strutturarsi come sistema complesso, in grado di agire ed interagire rispetto all'ambiente circostante, mediando in modo attivo il rapporto tra uomo ed ambiente.

I sistemi meccanici di controllo legati all'involucro di facciata sono potenziati ed automatizzati, garantendo la possibilità di esercitare un controllo ambientale flessibile al variare sia delle condizioni dell'ambiente esterno, sia delle esigenze dell'utenza interna. Da struttura bidimensionale, l'involucro diventa un sistema tridimensionale, assumendo la qualità di uno 'spazio'; doppio, triplo, a molteplice polivalenza, capace di sviluppare proprietà innovative di spazio cuscinetto e di filtro altamente dinamico e selettivo.

Alla complessità delle prestazioni richieste si risponde attraverso la complessità di sistemi, sperimentati grazie alla ricerca tecnologica degli ultimi anni; ricerca che sempre più spesso tenta di trasformare la pelle di un edificio in un mezzo di esaltazione

delle qualità dell'edificio stesso e in un sistema in grado di pubblicizzare la tecnologia che lo ha generato.

A partire dagli anni ottanta gli involucri massivi sono composti da strati funzionali progettati per rispondere alle esigenze interne ed esterne, presentando spesso in posizione baricentrica uno spazio camera (vuoto o riempito di materiale isolante) necessario a garantirne le prestazioni di controllo, di protezione climatica e di leggerezza. In modo analogo, anche la parete vetrata subisce un processo di smaterializzazione che tuttavia ne incrementa la capacità di resistenza statica e le funzioni di controllo degli scambi termici.

Le facciate a doppia pelle che si diffondono in Europa nell'ultima decade sono caratterizzate dalla presenza di spazi vuoti (buffer zone) interclusi tra i due strati principali di delimitazione tra interno ed esterno, che in taluni casi sono trasformate in veri e propri ambienti di vita.⁵

Gli architetti contemporanei sperimentano le potenzialità scultoree e le capacità espressive dei nuovi materiali di rivestimento esterno utilizzando la pelle dell'edificio come generatrice di forme e di immagini spesso sganciate dall'oggetto delimitato.

È sempre l'involucro edilizio l'oggetto di continue ricerche da parte di progettisti, che come Norman Foster, Richard Rogers, Jean Nouvel o Renzo Piano, si rivolgono all'high tech ritenendo la tecnologia il contenuto e la principale finalità degli sforzi espressivi dell'architettura.

Nelle architetture high tech giocano un ruolo fondamentale le emergenze impiantistiche (camini, canalizzazioni d'aria, unità di trattamento aria, ecc...), come nel Centre Georges Pompidou a Parigi (R. Piano e R. Rogers, 1977) o nei PA Technology Laboratories a Princeton (R. Rogers, 1985). Ma in alcuni casi è proprio la pelle dell'edificio che diviene un dispositivo tecnologico dotato di una propria funzionalità, come nel caso dell'Institute du Monde Arabe a Parigi (Jean Nouvel, 1987).



Fig. 2.2: Centre Pompidou, Renzo Piano e Richard Rogers, Parigi, Francia, 1977. L'edificio, diventato ormai un'icona dell'architettura contemporanea, si caratterizza per la scelta di trasformare la rete impiantistica in elemento estetico caratterizzante l'involucro architettonico.

Le facciate mediatiche contemporanee, diffuse in tutto il mondo, che incorporano nuovi strumenti figurativi e nuove tecnologie di comunicazione e che creano nuovi effetti grafici e cromatici avvalendosi di membrane e vetri traslucidi, si inseriscono nella tradizione del rivestimento architettonico come supporto iconografico.⁶

L'attenzione della ricerca contemporanea va orientata proprio verso il concetto di involucro in quanto frontiera, interfaccia dinamica permeabile e selettiva, tramite cui può realizzarsi quel processo di interazione tra gli elementi ambientali interni ed il mondo esterno, quel flusso 'adattivo' di scambi materiali ed immateriali da cui dipende il mantenimento di condizioni di benessere e di comfort all'interno degli spazi abitati. Il cattivo funzionamento degli edifici moderni può essere attribuito al fatto di avere progettato l'involucro in maniera totalmente formalistica, prestando nulla o poca attenzione alle condizioni climatiche esogene. Il compito di mantenere le condizioni interne richieste è affidato agli impianti di condizionamento, con inevitabili sprechi, inefficienze e cattivo funzionamento.⁷

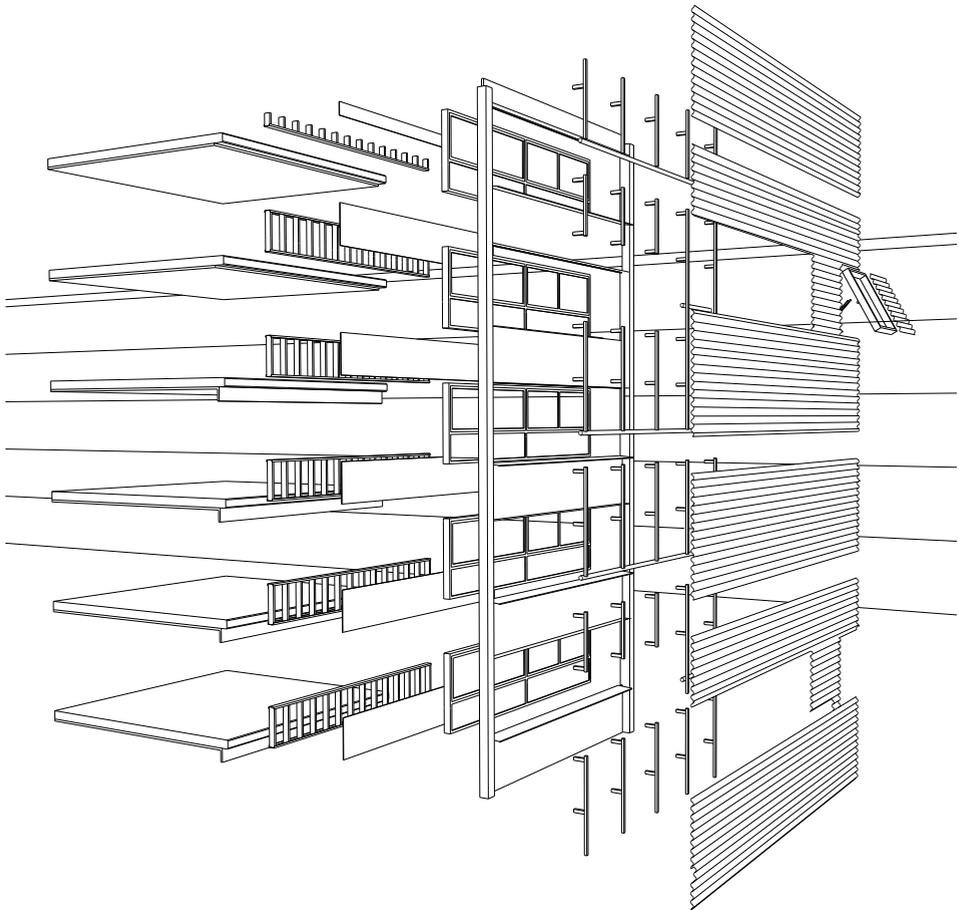


Fig. 2.3: Morphosis, Federal Building, San Francisco, 2007. Particolare della Facciata Sud - Est. Le facciate dell'edificio presentano soluzioni tecnologiche legate all'orientamento: la facciata sud -est è caratterizzata dalla presenza di una schermatura solare realizzata in metallo microforato che protegge dal surriscaldamento la retrostante pelle in vetro; nella facciata nord-ovest (nella pagina accanto) sono invece stati integrati dei sistemi di schermatura fissi traslucidi che regolano la luce naturale all'interno degli ambienti di lavoro.

Di recente la ricerca tecnologica sta indagando nuove frontiere di sperimentazione capaci di ribadire la qualità osmotica di un processo di scambio che riguarda i flussi di energia passati e scambiati proprio attraverso l'involucro.⁸ Si registrano nuove sperimentazioni finalizzate a dimostrare la possibilità di dotare le superfici di chiusura verticale ed orizzontale di sistemi atti a garantirne il dinamismo che consenta loro di gestire i flussi materici passanti alla stregua di un organismo biologico. Dalle architetture di Toyo Ito agli edifici organici di Greg Lynn le nuove frontiere della sperimentazione in architettura sono orientate a proporre nuovi modelli dell'abitare in cui l'organismo edilizio sia capace di garantire anche in autonomia il comfort dei suoi utenti. In tal senso l'evoluzione e la diffusione dei sistemi di controllo informatico (dalla domotica ai Building Management System) hanno permesso di trasferire alla scala dell'edificio le potenzialità dei sistemi dotati di intelligenza artificiale, permettendo una regolazione dello spazio anche in assenza dell'utente umano ed in stretta relazione con tutta una serie di necessità che garantiscono di ottimizzare dal punto di vista funzionale e fisico lo spazio costruito.

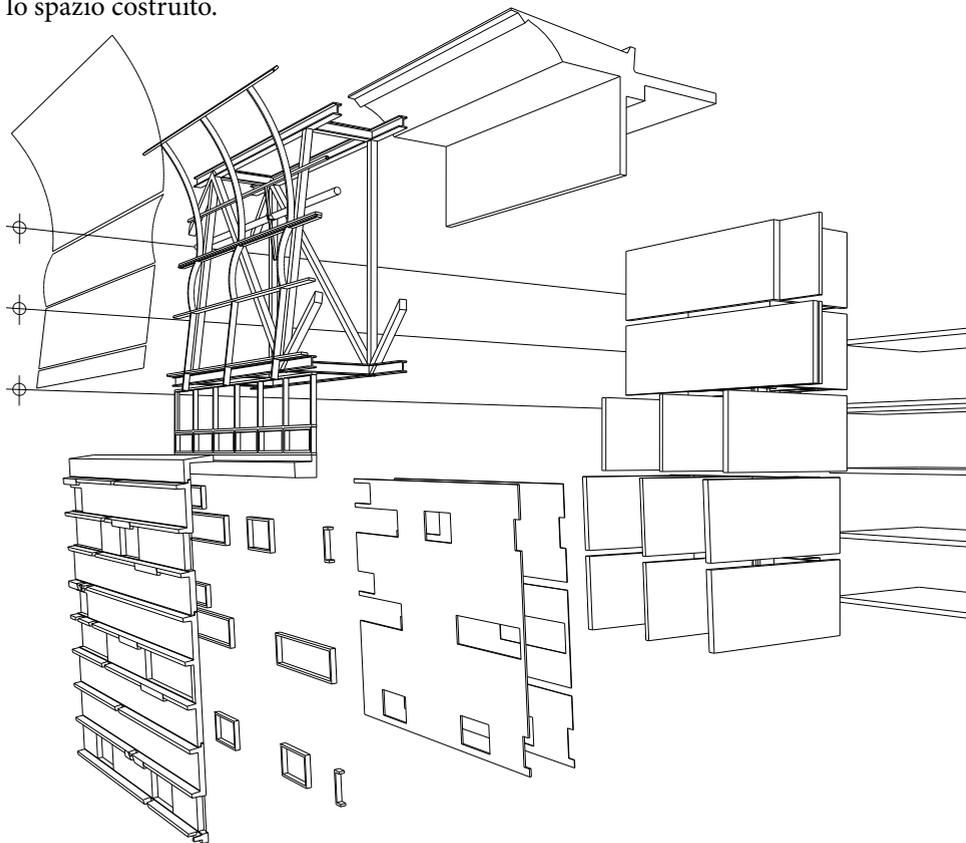


Fig. 2.4: Morphosis, Federal Building, San Francisco, 2007. Particolare della Facciata Nord-Ovest. L'edificio è caratterizzato da un sistema di aperture che attraverso un sistema di controllo domotico permettono di ventilare naturalmente gli uffici. La facciata è stata progettata come una pelle dinamica che cambia conformazione in relazione alla direzione ed alla velocità dei venti esterni. La struttura dell'edificio, costituita da setti in cemento armato lasciato a vista, funziona come massa termica e la particolare forma ondulata dei controsoffitti aiuta a diffondere l'aria all'interno dello spazio confinato. Nei montanti della facciata sono integrati dei tubi in cui scorre acqua calda che trasformano nei mesi invernali la chiusura verticale in un sistema di riscaldamento radiante.

Le architetture adattive sono quindi l'ultima frontiera della ricerca architettonica contemporanea e sono sempre più connesse alla volontà di proporre nuovi modelli d'involucro dinamico che contribuiscano alla riduzione del fabbisogno energetico dell'edificio, rendendolo strettamente dipendente dalle condizioni climatico-ambientali esterne, e sviluppando quindi tutte quelle componenti che ne incrementino la capacità di variare conformazione in relazione alla necessità di regolare i flussi di energia termica, luminosa, sonora passanti attraverso di esso.



Fig. 2.5: Palais des Congrès of Montreal, AEdifica, Montreal, Qc, Canada, 2003.

2.2 Involucro come sistema attivo

Se dal punto di vista architettonico l'involucro edilizio può essere considerato una pelle capace di conferire suggestioni all'edificio, dal punto di vista fisico esso è la superficie di controllo che delimita il sistema termodinamico dell'ambiente costruito. Come superficie di confine, l'involucro ha la funzione di regolare i flussi di energia passanti al fine di garantire le condizioni di comfort termico, visivo, acustico e la qualità dell'aria negli ambienti confinati, riducendo nel contempo i consumi energetici e gli impatti ambientali.

Facendo l'analisi etimologica dei termini 'facciata' ed 'involucro', si possono notare alcune differenze concettuali. Il termine facciata deriva dal latino *facies*, che significa 'forma esteriore', 'apparenza' ed indica quindi il volto dell'edificio, ne costituisce insieme al volume l'immagine all'esterno attraverso la quale viene proiettata l'identità propria; l'elemento facciata è fortemente dipendente dalle altre parti e sistemi dell'edificio, sia a livello formale che a livello tecnologico.

Il termine involucro, derivante dal verbo latino *involvère* (volgere intorno, avvolgere), non definisce solo l'aspetto superficiale e bidimensionale, ma indica tutto ciò che avvolge esternamente qualcosa, arrivando a definire un sistema più complesso, dotato di spessore proprio, alcune volte percepibile. L'involucro si può definire come un sistema tridimensionale di chiusura integrale dell'edificio, costituito da diversi elementi tecnici che sono strettamente interdipendenti (strati).

La distinzione funzionale tra 'strato' ed 'involucro' è legato al loro stato di autonomia strutturale. Gli 'strati' non sono di per se portanti e non fanno parte di

un'unità strutturale principale: sono uno 'strato' una lastra di rivestimento metallico, un pannello isolante o le lastre di un vetro camera. Possono essere strati di supporto, strati di tenuta all'acqua, strati di impermeabilizzazione o di tenuta all'aria, strati di barriera al vapore, ecc., a seconda del loro contributo al funzionamento complessivo del sub sistema a cui appartengono.

L' 'involucro' è prevalentemente portante, ed è in parte o del tutto autonomo dal punto di vista spaziale e/o strutturale. Un involucro può essere formato da più strati, come nel caso della 'pelle' esterna ed interna di una facciata.

Dal punto di vista fisico, è l'involucro architettonico la «superficie di controllo che delimita il sistema termodinamico dell'edificio»⁹. L'obiettivo dei sistemi di regolazione è quello di produrre un ambiente stabile, termicamente equilibrato, in grado di ottenere, anche in architettura, quello stato omeostatico indispensabile alla vita del mondo animale e vegetale.

Il termine 'involucro edilizio', il cui significato è abbastanza recente, ha sostituito il termine 'chiusura', utilizzato nella scomposizione del sistema tecnologico nella UNI 8290, a sottolineare il concetto di globalità delle parti che definiscono un ambiente interno (caratterizzato da condizioni "climatico/ambientali" stabili) rispetto ad un ambiente esterno.

2.2.1 Termodinamico

Le prestazioni dell'involucro devono garantire il comfort termico e igrometrico degli spazi confinati e il contenimento dei consumi energetici mediante il soddisfacimento dei seguenti requisiti prestazionali:

- Requisiti ambientali:
 1. Mantenimento della temperatura dell'aria negli spazi abitativi nelle stagioni di esercizio degli impianti di riscaldamento entro i limiti di legge di 20 - 22 °C ;



Fig. 2.6: Istituto Universitario, Pfeifer Kuhn Arkitekten, Friburgo, 2006. L'involucro architettonico è caratterizzato da una doppia pelle con una superficie trasparente in vetro sovrapposta ad un muro rivestito di legno. L'aria tra i due layer incrementa l'inerzia termica degli elementi di chiusura verticale opaca: Nei mesi invernali è utilizzata per il riscaldamento degli uffici, d'estate ne limita il surriscaldamento.

2. Mantenimento delle condizioni di comfort termico negli ambienti interni nel periodo estivo.
- Requisiti tecnologici:
 1. Controllo dei fenomeni di condensa superficiale e interstiziale;
 2. Controllo della combinazione 'Temperatura - Umidità - Ventilazione';
 3. Resistenza termica e inerzia termica ai fini del risparmio energetico e del comfort ambientale interno.

La normativa italiana nel campo della certificazione energetica e del risparmio energetico è in continua evoluzione: l'entrata in vigore dal febbraio 2005 dell'accordo internazionale di Kyoto che impegna il nostro Paese a ridurre entro il 2012 le emissioni di gas serra al 6,5% rispetto ai valori del 1990, ha dato un forte input al governo e al legislatore ad affrontare da subito questi rilevanti problemi. Lo stesso è avvenuto a livello europeo con l'avvento di numerose normative che tentano di riunire e unificare le normative di ogni singolo Paese in modo da affrontare il problema energetico con gli stessi strumenti e regole.

Le prestazioni energetiche dell'intero organismo edilizio dipendono dall'efficienza dell'involucro chiamato a circoscriverlo, se le componenti di chiusura (verticali, orizzontali, trasparenti, opache) non sono state progettate e realizzate in maniera consona alle prestazioni energetiche dell'edificio, le dispersioni dei flussi di calore passanti attraverso le stesse ne comprometteranno i consumi energetici finali. Le azioni termiche che agiscono sull'esterno di un edificio sono combinazioni d'impatti radiativi e convettivi. La componente radiativa consiste nella radiazione solare incidente e nello scambio termico radiativo con l'ambiente esterno e con il cielo. L'impatto termico



Fig. 2.7: Studi televisivi Esluges, Oscar Aceves, Emili Llorach, Eugenia Barbat, Patrick Genard, Daniela Hentschel, Alfons Ortil, Enric Berga, Barcellona, Spagna, 2004. L'edificio è caratterizzato dall'adozione di interessanti sistemi di involucro, tra i quali si ricorda la soluzione di copertura nella quale sono state integrate soluzioni ibride di tipo termico fotovoltaico.

convettivo è una funzione dello scambio con la temperatura dell'aria circostante, e può essere accelerato dal movimento dell'aria.

Le dispersioni termiche che avvengono sotto forma di calore, dipendono dalla differenza di temperatura tra la faccia interna ed esterna dell'involucro stesso e dalla resistenza termica del materiale (o combinazione di materiali) del quale è fatto l'involucro.

I materiali che costituiscono un involucro che separa due ambienti a temperature differenti offrono una resistenza al passaggio del calore che varia in relazione diretta allo spessore del materiale e in relazione inversa alla sua 'facilità' a trasmettere il calore (trasmittanza).

- La trasmittanza termica (U) (W/m^2K), o coefficiente globale di trasmissione del calore interno - esterno è definita dalla norma UNI 7357 come il "flusso di calore che passa da un locale all'esterno (o ad un altro locale) attraverso una parete per mq di superficie della parete e per K di differenza tra la temperatura del locale e la temperatura esterna, o del locale contiguo".
- La conduttività o conducibilità termica (l) (W/mK) di un materiale indica il flusso di calore che, in condizioni stazionarie, passa attraverso uno strato unitario di materiale in presenza di una differenza unitaria di temperatura tra le due facce opposte del materiale considerato. La conduttività dipende dalla porosità (densità) e dal contenuto igrometrico del materiale.
- La resistenza termica (R) (m^2K/W) totale di una parete, che è ovviamente l'inverso

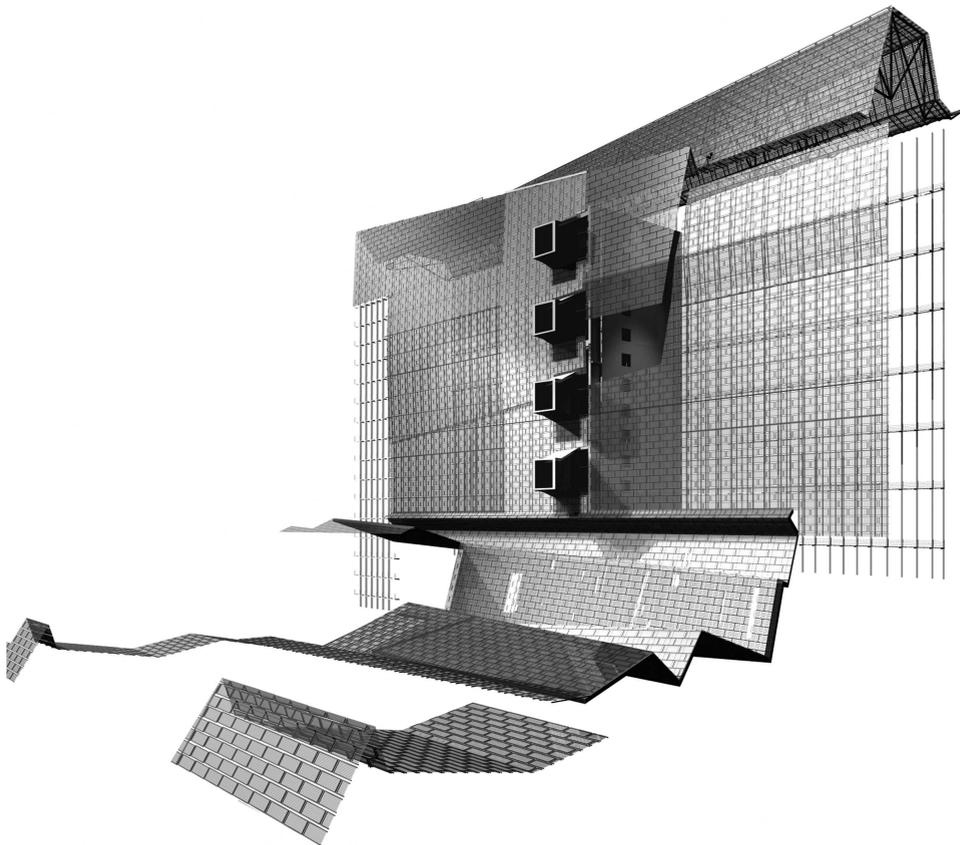


Fig. 2.8: Morphosis, Federal Building, San Francisco, 2007. Esploso della Facciata Nord-Ovest.

della trasmittanza termica, sarà dunque data dalla somma delle differenti resistenze che il flusso di calore incontrerà lungo il percorso dall'elemento più caldo a quello più freddo.

Particolare attenzione deve inoltre essere data alle prestazioni termiche dell'involucro edilizio in regime termico variabile, nei mesi invernali (in quei periodi in cui il riscaldamento è saltuario, o intermittente, specie con attenuazioni notturne), ma soprattutto nei mesi estivi.

Nel corso della stagione estiva, in particolare durante le successioni di giornate caratterizzate da valori elevati di temperatura e di intensità d'irraggiamento solare, gli involucri edilizi dovrebbero essere progettati e realizzati in modo tale da assicurare condizioni ambientali di sufficiente benessere termoisometrico all'interno degli ambienti confinati, anche in assenza di impianti di condizionamento.

A tale scopo, assumono particolare importanza:

- Il sistema di protezione dall'irraggiamento solare (schermi, oggetti, alberi ecc.);
- L'inerzia termica delle pareti opache dell'edificio, quantificabile in base all'attenuazione (s) dell'ampiezza delle variazioni della temperatura superficiale interna rispetto a quella ambientale esterna, e al ritardo di fase (f), cioè all'intervallo di tempo con cui le variazioni di temperatura esterna si trasmettono all'interno (ore). Buone prestazioni sono assicurate, da questo punto di vista, da pareti opache in grado di fornire come valori orientativi $s < 0,05$ e $f > 8$ ore, relativamente a un'ipotetica oscillazione sinusoidale della temperatura esterna avente periodo di ventiquattro ore. Per ridurre i consumi energetici per la climatizzazione estiva è fondamentale attenuare i valori massimi di temperatura negli ambienti e ritardare l'immissione di energia termica negli stessi, spostandola verso le ore notturne quando la temperatura dell'aria esterna è ai valori minimi e il fenomeno del reirraggiamento raffredda rapidamente le superfici esterne.

Le perdite di calore attraverso l'involucro possono essere ridotte attraverso le seguenti strategie:

Utilizzare la massa termica;

- Prevenire la conduzione di calore aggiungendo isolamento termico all'involucro per incrementare la sua resistenza termica;
- Progettare l'edificio in un modo più compatto per ridurre la superficie complessiva, attraverso la quale il calore può essere trasmesso;
- Aggiungere barriere al flusso di calore radiativo attraverso, per esempio, la posa di fogli in alluminio dietro i radiatori e usando vetri isolanti ed a bassa emissività come pure isolare i cassonetti delle finestre e porte laddove sono presenti gli avvolgibili esterni.

Nella fase progettuale dell'involucro edilizio si dovrà prestare particolare attenzione al controllo e alla verifica dei fenomeni di condensa interstiziale e superficiale, come previsto dalla Norma UNI EN ISO 13788, prestando particolare attenzione alle condizioni igrometriche di progetto interne ed esterne dell'edificio ed alle caratteristiche (spessore, conduttività termica, resistenza alla diffusione del vapore) di ciascuno strato di materiale che costituisce la parete.

Il calcolo della condensa interstiziale è effettuato quantificando i profili delle temperature e delle pressioni di vapore acqueo (saturo ed effettivo) all'interno della parete: se la pressione di vapore effettiva (P_e) raggiunge o supera quella della pressione di vapore saturo (P_s), si avrà formazione di condensa. Tale fenomeno può essere arginato disponendo in ordine decrescente gli strati che compongono la struttura in funzione della loro permeabilità al vapore acqueo (i materiali con resistenza maggiore al vapore

vanno collocati verso l'ambiente abitato, quelli con resistenza minore vanno collocati verso l'ambiente esterno). I fenomeni di condensa superficiale si manifestano, invece, quando la temperatura della superficie interna della parete è inferiore alla temperatura di condensa dell'aria dell'ambiente abitato. Dal calcolo del profilo della temperatura all'interno della parete, si determina anche il valore della temperatura superficiale interna ed è quindi possibile valutare gli eventuali rischi di condensa superficiale.

Nella progettazione dei sistemi di involucro tecnologico, risulta fondamentale analizzare le condizioni climatiche presenti nell'intorno ambientale, cercando di ricreare un adeguato equilibrio tra parametri climatici esterni, condizioni termigrometriche interne e componenti tecnologiche scelte.

L'ideazione, la progettazione e la realizzazione di un involucro architettonico dinamico comportano una complessità direttamente proporzionale alle prestazioni richieste ed alle variabili presenti in ogni intervento. Per questo motivo è importante definire a priori le caratteristiche principali dell'involucro e giungere, attraverso queste, ad organizzare un sistema di priorità nella fase della sua progettazione e realizzazione.

Un edificio tradizionale è capace di rispondere alle sollecitazioni esterne soltanto attraverso la sua componente massiva e la sua configurazione costruttiva, mentre risulta essere incapace di rapportarsi ad un ambiente in continua variabilità. Al contrario, un edificio intelligente deve possedere la capacità di conoscere ciò che accade al suo interno e nel suo immediato intorno, decidere il modo in cui intervenire per rendere confortevole gli ambienti confinati e rispondere velocemente al mutare delle esigenze e delle condizioni climatiche.

Gli involucri sono, tra le componenti architettoniche, quelle che possiedono una maggior interdipendenza con i sistemi meccanici di controllo e negli ultimi anni si sono trasformati da sistemi passivi, capaci di utilizzare gli agenti naturali esterni e le fonti di energia rinnovabili, in:

- Sistemi attivi, che riescono ad integrarsi con gli impianti grazie a captatori solari, pannelli fotovoltaici, vetri a prestazioni elevate ecc.;
- In sistemi ibridi, dinamici e polivalenti, capaci di prestazioni sia attive che passive.

L'involucro passivo, strettamente legato alle caratteristiche dell'ambiente esterno, garantisce di:

- Massimizzare il guadagno solare diretto perché dotato di estese superfici vetrate ad elevato isolamento termico e attrezzate con sistemi schermanti per il controllo dell'abbagliamento e per la protezione solare nel periodo estivo;
- Accumulare l'energia solare anche quando essa non penetra direttamente nell'ambiente, grazie all'adozione di tecnologie quali il muro Trombe, o i collettori solari ad aria ed acqua;
- Avere spazi cuscinetto tra i sistemi di chiusura trasparente e opaca al fine di incrementare la protezione dal freddo e sfruttare l'energia solare nel periodo invernale;
- Ridurre l'apporto di calore durante i mesi estivi attraverso la presenza di schermature solari artificiali e/o naturali;
- Incrementare l'illuminazione naturale attraverso un adeguato dimensionamento delle aperture trasparenti;
- Favorire la ventilazione naturale diminuendo i consumi energetici per la climatizzazione estiva;
- Integrare soluzioni per l'adozione di sistemi per il passive cooling che garantiscono nei mesi estivi una riduzione del carico termico interno attraverso la ventilazione notturna degli ambienti.

- Solitamente gli involucri passivi sono adottati in edifici a destinazione residenziale, con una bassa domanda di energia, in cui gli utenti si fanno carico della gestione e regolazione dei dispositivi di comando che consentono all'involucro di assumere alternativamente le configurazioni giorno/notte e inverno/estate. Questa soluzione d'involucro presenta tuttavia i seguenti limiti applicativi:
- Spesso limita l'espressione architettonica del progettista che deve adottare soluzioni tecnologiche standard in relazione all'orientamento dell'involucro;
- Risulta strettamente legato alla gestione dell'utenza, se non è collegato a sistemi impiantistici che gli permettano di assumere le varie configurazioni "bioclimatiche" autonomamente;
- Richiede precisi interventi di variazione delle sue prestazioni in relazione al variare delle situazioni climatiche esterne e tali interventi non sempre sono agevoli;
- Presenta una bassa efficienza di utilizzo dell'energia solare sia a causa della ridotta capacità di captazione dei componenti edilizi passivi sia a causa dell'assenza di efficaci sistemi per la distribuzione e l'accumulo del calore.

Dai sistemi di guadagno solare passivo può derivare una riduzione degli indici energetici del 30–50 %. I progetti di architettura passiva o ad "Emissione zero" sono di facile realizzazione.

Le medesime componenti valgono per l'architettura in vetro: si considera il controllo dei veicoli solari e le dispersioni per trasmissione. Il caso più ingegnoso è quando già in facciata l'edificio reagisce se necessario assorbendo, accumulando, controllando e convogliando o invertendo il flusso di luce solare per compensare le dispersioni per trasmissione. Nell'ambito di un progetto di ricerca svoltosi presso il Politecnico del



Fig. 2.9: Energy Base Building, POS Arkitekten Vienna, 2008. Questo edificio per uffici è caratterizzato dalla grande facciata orientata a SUD che, attraverso l'interazione con uno scambiatore di calore posto sulla copertura, funziona come un enorme collettore solare. L'edificio ha un fabbisogno globale di energia di 25 kWh/mq anno, con una riduzione dei consumi dell'80% rispetto ad un edificio per uffici costruito in modo tradizionale. Con una riduzione delle emissioni di CO₂ di 200 tonnellate l'anno.

Liechtenstein, patrocinato da istituti tecnici superiori, si stanno studiando 'vetrate a passaggio fluido con management energetico integrale'.

L'involucro attivo, è invece caratterizzato dalla presenza di sistemi impiantistici per la captazione dell'energia solare e la ventilazione naturale e artificiale.

Sono esempi di involucri attivi le facciate dotate di collettori solari ad aria o ad acqua e di pannelli fotovoltaici; ma, in qualche modo, anche le facciate a doppia pelle o i sistemi d'involucro dotati di recuperatori di calore, che permettono di ridurre il fabbisogno energetico dell'edificio mantenendo le condizioni a contorno ad una temperatura costante.

Certamente l'involucro attivo risulta più efficiente in termini energetici e più controllabile in termini funzionali rispetto a quello passivo: i componenti impiantistici per la captazione dell'energia solare e per la distribuzione e l'accumulo dell'energia trasformata hanno, infatti, prestazioni testate ed i flussi d'aria movimentati da



Fig. 2.10: Biblioteca Pública Pompeu Fabra, Miquel Brullet Matarò, Barcellona, Spagna, 1998. Si tratta di uno dei primi edifici d'Europa in cui è realizzata una facciata fotovoltaica in pannelli di silicio policristallino semitrasparente. Il fotovoltaico contribuisce alla produzione di energia elettrica per l'edificio e funziona come sistema di ombreggiatura per la sala lettura.

elettroventilatori trasportano quantità di calore ben definite in relazione alle differenze di temperatura in gioco. Non si può negare che la modularità dimensionale tipica dei componenti impiantistici vincola non poco le opportunità di espressione architettonica e crea problemi di accoppiamento fra il disegno della facciata ed i caratteri distributivi e morfologici degli ambienti interni.

Nell'ultimo decennio gli involucri attivi con collettori solari ad aria o ad acqua integrati non sembrano aver incontrato, se non in applicazioni particolari, l'interesse dei progettisti. Le ragioni sono da ricercarsi non soltanto nel fatto che la presenza di tali collettori in facciata e/o in copertura limita fortemente le possibili soluzioni compositive, ma anche nel fatto che i bilanci energetici ed economici effettivamente sperimentati non sono poi risultati così favorevoli come in un primo momento erano apparsi alla luce di scenari energetici assai pessimisti.

E' invece significativo il successo delle doppie pelli trasparenti e delle facciate fotovoltaiche, queste ultime costituite da celle di silicio integrate nelle specchiature vetrate. I pannelli fotovoltaici si trovano ormai in commercio con diverse dimensioni e caratteristiche, nella versione semitrasparente sono particolarmente adatti per

integrazioni architettoniche in situazioni nelle quali sia necessario ombreggiare lo spazio confinato. Inoltre la necessità di ventilare la parte anteriore del pannello ne rende consigliabile l'applicazione in soluzioni di facciata ventilata, dove il contributo termico del sistema fotovoltaico incrementa i moti d'aria ascensionali all'interno dell'intercapedine.

L'involucro ibrido, è caratterizzato dalla complementarità delle tecnologie impiantistiche ed edilizie e dalla presenza di sistemi di regolazione e controllo che lo rendono una componente fondamentale all'interno del complesso sistema edificio-impianto. In generale questi tipi di involucro sono contraddistinti dalla presenza di uno o più dei seguenti sistemi tecnologici:

- Materiali e sistemi innovativi ad alte prestazioni per la captazione e l'accumulo dell'energia solare;
- Dispositivi per gestire la ventilazione naturale in combinazione con sistemi di ventilazione meccanica;
- Schermi mobili per il controllo dell'irraggiamento solare;
- Presenza di soluzioni tecnologiche atte ad incrementare la penetrazione della luce naturale e modularne l'intensità;
- Sistemi di building automation per la gestione integrata degli impianti e degli elementi che costituiscono la pelle dell'edificio.

L'involucro ibrido garantisce diverse prestazioni in termini termo-igrometrici e funzionali, prestazioni che in passato erano affidate ad apparati tecnologici di differente natura; inoltre può essere definito "dinamico", perché in grado di modificare le sue prestazioni termo-igrometriche nel tempo, in relazione alle circostanze climatiche ed alle esigenze dell'utenza.



Fig. 2.11: BMW Welt, COOP HIMMELB(L)AU, Monaco, Germania, 2007. Nella doppia pelle dell'edificio è integrato un sistema di tubi radianti che provvedono al suo riscaldamento e raffreddamento. La copertura è completamente rivestita da pannelli fotovoltaici che producono parte dell'energia elettrica di cui ha bisogno l'edificio.

In generale gli involucri ibridi presentano, rispetto ai sistemi di involucro tradizionale, costi di costruzione e di manutenzione superiori, a causa dei materiali impiegati, dell'entità dei pezzi speciali, della complessità di gestione dei componenti e della loro reciproca collocazione.

Si tratta di sistemi tecnologici che tuttavia contribuiscono efficacemente al bilancio energetico dell'edificio, limitando la necessità di ricorrere a dispositivi elettromeccanici di climatizzazione invernale ed estiva, con una conseguente riduzione dei consumi energetici.

Nell'ultimo decennio si sono diffuse con successo a scala globale, anche nuove ricerche sull'architettura cinetica, in cui all'involucro è data la possibilità di trasformarsi muovendosi nello spazio e permettendo all'edificio di assumere conformazioni diverse nel tempo. Lo sviluppo tecnico dalla meccanica attraverso l'elettronica fino alla connessione digitale di unità decentralizzate si basa su una tradizionale funzionalità che attualmente sta conducendo al concetto di elementi edili mobili. Sebbene gli edifici in generale siano considerati oggetti stabili e impassibili, la mutazione controllata di un edificio può dare contributi sempre più interessanti: la ragione sta nella necessità di un ininterrotto adeguamento allo spazio vitale umano, dovuto, da un lato, ai mutamenti dei fabbisogni spaziali, dall'altro dalla reazione alla ciclicità della Natura, all'alternarsi di giorno e notte, estate ed inverno. I cambiamenti a lungo termine vengono realizzati tramite conversioni irreversibili e singolari nell'ambito di una struttura utilizzabile di massima flessibilità, mentre adattamenti a breve termine reversibili sono considerati tramite soluzioni meccaniche. Una persiana di notte deve potersi chiudere per incrementare la sicurezza della finestra e limitare le dispersioni termiche. Il movimento è sempre connesso con un elevato impegno: da un lato, l'energia impiegata per



Fig. 2.12: Rotating Tower, David Fisher, 2006. Il progetto è caratterizzato dall'idea di rendere i vari piani indipendenti gli uni dagli altri e capaci di ruotare. Il core strutturale della torre è una turbina eolica

movimentare la parte, dall'altro lato, sono richieste soluzioni tecnologiche complesse per rendere questa sequenza di movimento elegante, durevole, sicura e reversibile.¹⁰ Oliver Schaeffer¹¹ in un recente articolo pubblicato sulla rivista *Detail* definisce le "architetture in movimento" come:

- 'Ludico-scenografie', in cui il meccanismo dell'involucro legato al movimento rimane segreto e nel migliore dei casi si realizza un sottile equilibrio tra spontanea eleganza ed intensità architettonica. Si tratta di edifici, come la Rotating Tower di David Fischer o il Padiglione Prada Transformer di Rem Koolhaas, in cui il cinematismo corrisponde ad una semplice rotazione o ad uno spostamento orizzontale intorno o lungo un asse. Sicuramente più complessi sono i meccanismi mobili del designer americano Chuck Hoberman. L'invenzione della Sfera di Hoberman, un giocattolo cinetico per bambini, che accoppia sistemi a forbice a strutture portanti tridimensionali che si possono ripiegare su se stesse spazialmente. L'effetto è particolarmente coinvolgente nell'Hoberman Arch realizzato durante i Giochi Olimpici invernali di Salt Lake City nel 2002: una porta scenica semicircolare che si apre a fiore e con eleganti movimentazioni diventa parte stessa della spettacolare messa in scena sul palcoscenico.
- 'Mutabili e reversibili', si tratta di involucri caratterizzati da dispositivi che permettono di regolarne l'apertura e la chiusura o le dimensioni spaziali, attraverso apparati che ne calibrano le superfici in larghezza e lunghezza. Come nel caso di un interruttore digitale, il passaggio da uno stato all'altro avviene il più rapidamente ed il più semplicemente possibile; il movimento diventa strettamente correlato alla destinazione d'uso dell'oggetto architettonico. Sono esempio di questa tendenza i chioschi destinati alla vendita temporanea, scatole intelligenti che cambiano conformazione in relazione alle necessità d'uso dell'utenza, permettendo un'espandibilità spaziale strettamente legata alle necessità funzionali cui sono destinati.
- 'Adattabili nel continuo', per questo tipo di architetture il movimento non viene a modularsi sulle funzioni o sulle destinazioni d'uso, ma viene applicato come veicolo funzionale primario pensato in particolar modo per adattarsi alle condizioni generiche in continuo mutamento. L'obiettivo è il guadagno energetico o per lo meno la riduzione del fabbisogno di energia o di materiali ai minimi termini. La particolare attrattiva degli elementi mobili di facciata si realizza tramite una riproduzione seriale degli elementi. In altri termini, dal movimento di una singola persiana è possibile creare alla fine un'immagine ricca di mutamenti e modulata che attraverso diversi stati di posizione di ogni singolo elemento di facciata si modifica nel corso della giornata. Lo Showroom Kiefer Technic di Giselbrecht and Partner, realizzato nel 2007, trasforma il sistema di chiusura verticale in un elemento architettonico connotante il progetto e rende l'edificio un volume camaleontico che si conforma in relazione alle condizioni climatiche esterne ed alle necessità dell'utenza, contribuendo alla riduzione dei consumi energetici globali dell'edificio attraverso la regolazione dei flussi di energia termica e luminosa che passano attraverso di esso.
- 'Adattabili in modo efficiente', si tratta di quelle architetture o oggetti di design che sono finalizzati, attraverso il loro movimento, a ridurre le distanze tra elementi fisici definiti; il Rolling Bridge di Londra ad esempio rappresenta una perfetta dimostrazione di questo concetto trattandosi di un ponte pedonale che da una conformazione ottagonale di partenza si trasforma in una struttura longitudinale

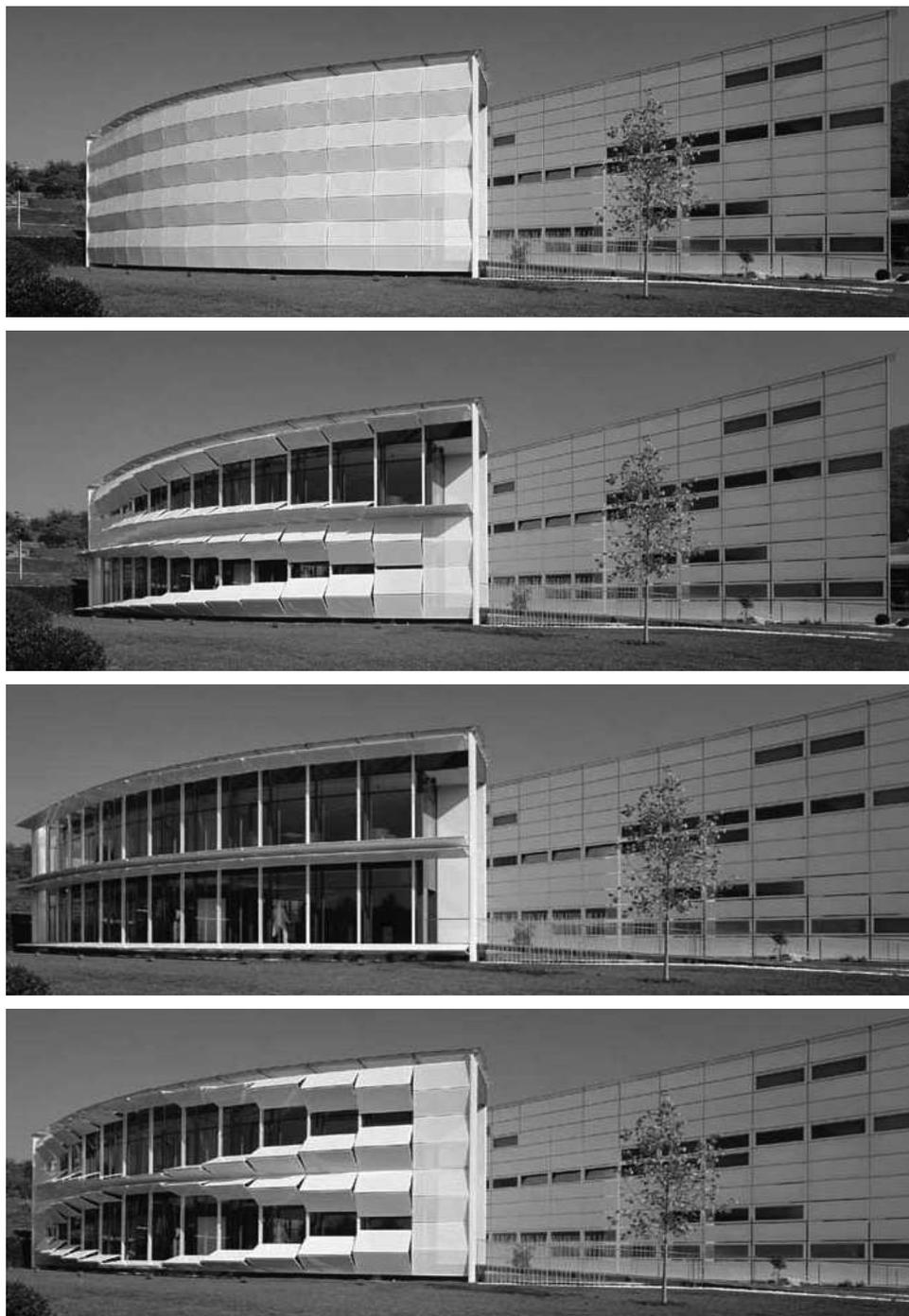


Fig. 2.13: Showroom Kiefer Technic, Giselbrecht and Partner, Bad Gleichenberg, Steiermark, Austria 2007. La facciata realizzata in elementi di alluminio microforato che si muovono lungo degli assi orizzontali, diventa un elemento scultoreo animato che conferisce all'edificio un aspetto mutevole nell'arco della giornata e delle stagioni dell'anno.

capace di collegare due sponde. La sperimentazione progettuale in questo settore determina la proposizione di nuovi modelli di definizione spaziale degli ambienti indoor ed outdoor, rendendo gli spazi costruiti degli elementi capaci di ottimizzare la vivibilità di un luogo.

Nella Sliding House dell'architetto Alex De Rijke degli dRMM architect l'edificio scomposto in parti mobili riesce a cambiare conformazione volumetrica e spaziale nelle varie stagioni dell'anno; l'involucro si muove con un motore elettrico alimentato da quattro batterie per auto caricate da un impianto fotovoltaico posizionato in copertura. L'intero meccanismo è nascosto nelle pareti coibentate che in soli sei minuti si muovono da una stazione all'altra, convertendo gli spazi interni in spazi esterni e ricreando le più differenti situazioni di luce, viste prospettiche e situazioni spaziali. Questa suggestiva soluzione permette inoltre di regolare le prestazioni termiche delle componenti opache e trasparenti limitando le dispersioni termiche nei mesi invernali e il surriscaldamento

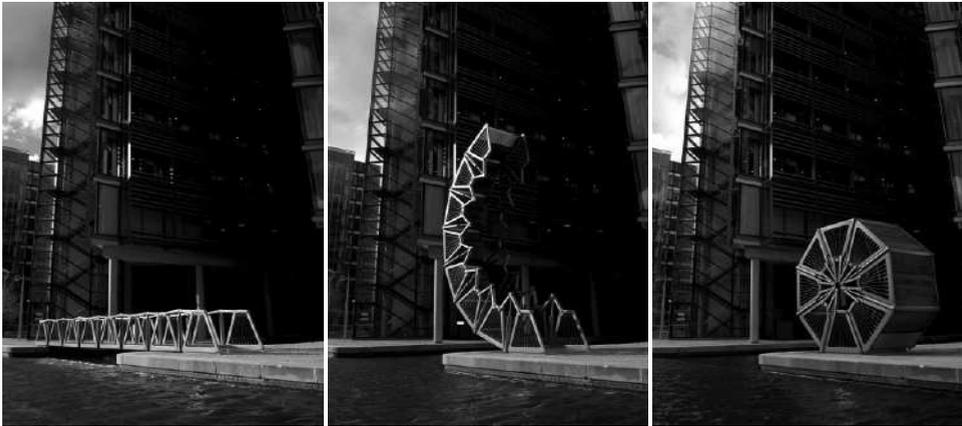


Fig. 2.14: Rolling Bridge, Heatherwick Studio, Londra, 2004. Immagini del ponte nelle sue configurazioni dinamiche.

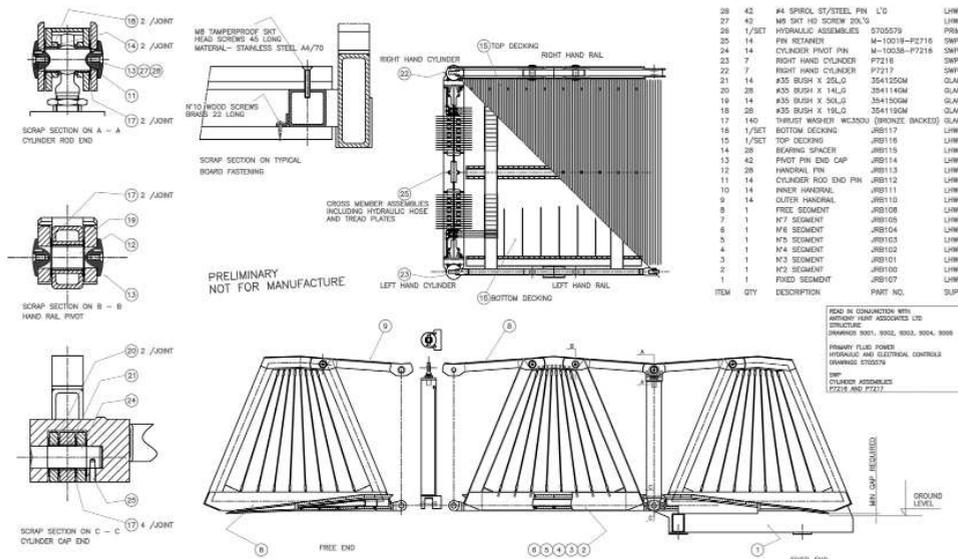


Fig. 2.15: Rolling Bridge, Heatherwick Studio, Londra, 2004. Particolari di progetto.

della grande superficie vetrata nei mesi estivi.

Le architetture cinetiche dimostrano, quindi, che la ricerca architettonica si spinge verso soluzioni innovative che sfruttando la possibilità di integrare nell'involucro architettonico sistemi informatici e attuatori meccanici, trasformandolo realmente da elemento statico ad elemento dinamico, capace di cambiare conformazione rapidamente ed in modo efficiente in relazione alle esigenze funzionali, statiche, fisiche determinate in fase progettuale. Risulta fondamentale ricordare che le ricerche in merito all'architettura dinamica si sviluppano contemporaneamente all'evoluzione degli strumenti informatici a supporto della progettazione architettonica e ingegneristica che permettono di simulare a priori le prestazioni raggiungibili da questi innovativi oggetti architettonici.

2.2.2 Involucro come 'pelle' e 'membrana'

Nelle attività umane atte alla costruzione ed alla trasformazione dello spazio vitale, un ruolo privilegiato spetta alla progettazione dell'involucro architettonico che da elemento-barriera prevalentemente protettivo si è evoluto, anche grazie alla recente ricerca tecnologica, in un complesso sistema-filtro selettivo e polivalente capace di ottimizzare le interazioni possibili tra ambiente interno e ambiente esterno.

Considerare l'involucro architettonico quale "membrana" o "pelle" dell'organismo edilizio significa valutare la qualità osmotica dell'elemento facciata, capace di regolare e, talvolta, generare i flussi energetici e di informazione passanti attraverso di esso, e al contempo anticipare il ruolo che esso ha conquistato nell'ambito della sperimentazione tecnologica contemporanea. Con il concetto di "pelle" si vuole indicare la natura viva e attiva di quella parte dell'edificio deputata a mediare il rapporto tra uomo e ambiente, capace di agire prontamente alle sollecitazioni provenienti dal contesto.¹²

La facciata, intesa come sistema bidimensionale ed unidirezionale è il punto di partenza per l'esplorazione delle potenzialità della "pelle" come membrana di confine tra interno ed esterno, che diventa tridimensionale e bidirezionale. La pelle è confine tra organismo ed ambiente ed allo stesso tempo è elemento fondamentale di contatto sensibile con l'ambiente, senza il quale un organismo non sarebbe in grado di sopravvivere. La pelle in architettura, come superficie di confine, è tanto medium di contatto quanto di separazione. La pelle architettonica come l'organo dove lo spazio architettonico comincia, ovvero finisce, è, come confine tra interno ed esterno, l'espressione più evidente dell'identità di un manufatto, che contemporaneamente si lascia esperire solo come qualcosa di distinto dal manufatto stesso. In questo doppio ruolo di confine ed interfaccia tra un soggetto sensibile ed un ambiente circostante, altrettanto ricettivo quanto attivo, la pelle di un'architettura si carica di una duplice valenza: elemento di rivestimento e protezione e, contestualmente, strumento di relazione ed interfaccia, appunto, verso il mondo esterno.¹³

L'involucro, come 'pelle', svolge il ruolo determinante di sistema dinamico di filtro ambiente capace non solo di regolare i flussi di calore, radiazione, aria e vapore, ma anche di convertire l'irraggiamento solare in energia (termica ed elettrica) utilizzabile per il 'metabolismo' degli edifici, ed in genere di assolvere una serie di prestazioni chiave che ne fanno l'elemento cardine di un globale processo di interazione eco-efficiente con i fattori ambientali naturali.¹⁴

Se si concepisce la facciata come una 'terza pelle' dell'uomo (dopo il corpo e gli abiti), questa sarà progettata cercando di riproporne le stesse caratteristiche e facendo in modo che mano a mano che si procede verso l'interno del corpo, attraverso cias-

cuno dei livelli funzionali, sia ridotta l'oscillazione dei fattori climatici provenienti dall'esterno, in modo da garantire una temperatura del corpo costante pari a circa 37°C indipendentemente dalle condizioni climatiche esterne.¹⁵

La scelta di definire l'involucro come pelle nasce dall'analogia che si vuole creare tra questo elemento fisico e la pelle umana, che è il più esteso organo del corpo degli esseri viventi. L'involucro assolve, infatti, il ruolo di parte metabolica e morfologica dell'edificio interpretato in senso olistico, e attraverso il complesso sistema di attuatori e sensori, che lo caratterizzano nella conformazione tecnologica più evoluta, diventa in grado di regolare in modo attivo le dinamiche termico - funzionali che caratterizzano un edificio evoluto.

Con il termine di 'membrana' si fa riferimento, invece, al processo evolutivo che ha visto nel tempo, attraverso l'apporto tecnologico, il progressivo assottigliarsi dello spessore della pelle stessa, associato però alla capacità di rispondere in maniera più decisa alle sollecitazioni provenienti dall'ambiente esterno.¹⁶

Benham¹⁷ descrive quattro modelli di controllo ambientale in relazione alla qualità di risposta all'ambiente esterno dell'organismo edilizio:

1. 'Involucro conservativo', caratterizzato da un tipo di controllo ambientale che utilizza grandi masse murarie con poche aperture per ridurre le dispersioni termiche nelle varie stagioni dell'anno e nelle varie fasce climatiche in cui viene proposto.
2. 'Involucro selettivo', che si caratterizza per un controllo ambientale basato su principi generali analoghi all'involucro conservativo ma con l'innovazione di utilizzare grandi pareti trasparenti per l'illuminazione e il riscaldamento passivo (esempio: parete trasparente semplice o doppia con dispositivi per il controllo solare).

La corretta proposizione di questa tipologia d'involucro genera soluzioni di "anisotropia" in facciata, ovvero, la facciata esposta a Nord sarà caratterizzata da una massa muraria massiva con piccole aperture, mentre la facciata a Sud avrà grandi vetrate per sfruttare l'irraggiamento solare diretto, anche se dotate di apposite schermature.

3. 'Involucro rigenerativo', che affida a sistemi impiantistici tutti i problemi del controllo ambientale e assume l'involucro esclusivamente come barriera per diminuire l'interazione tra l'interno e l'esterno. (Esempio: parete trasparente con vetrata normale o selettiva). La sua configurazione è quella trasparente con vetrata normale o selettiva, anche riflettente. Sono da considerare edifici rigenerativi tutti quelli dotati di isotropia in facciata, ovvero soluzioni uguali per tutte le esposizioni.
4. 'Involucro ecoefficiente o ambientalmente interattivo o bioclimatico avanzato', che propone un controllo basato sull'armonia tra ambiente esterno ed edificio con la possibilità di gestire i complessi flussi di energia (calore, luce, suono) attraverso le modifiche dell'intorno, la forma dell'edificio, l'organizzazione degli spazi interni e le configurazioni e azioni dell'involucro.

Quest'ultimo modello gestisce i flussi attraverso la regolazione di dispositivi fissi o ad assetto variabile (frangisole, apertura/chiusura di finestre, bocchette di ventilazione, ecc), o con controllo e regolazione manuale o automatica in relazione al tipo di utenza ed alla complessità dell'edificio. La caratteristica di tale tipologia è l'anisotropia dinamica, ovvero la capacità di offrire delle soluzioni differenziate per le diverse esposizioni dell'edificio, dove il cambiamento dell'assetto modula i vari flussi ambientali a seconda delle condizioni climatiche del luogo.¹⁸

Lo studio dell'involucro, rispetto alle modalità di progettazione 'ambientale', funzionale ed 'adattiva' nei confronti delle sollecitazioni climatiche, riguarda la disamina di componenti finalizzati a realizzare i procedimenti di accumulo termico e di termo-

isolamento, di aerazione naturale degli spazi interni, di incremento e di calibrazione dell'irraggiamento solare.

La sperimentazione sull'involucro esprime le qualità 'tecno-organiche' di parte dell'architettura contemporanea, attraverso l'interpretazione e l'assimilazione delle condizioni ambientali in modo combinato all'impiego di tecniche evolute (organitech), capaci di tradurre le potenzialità relative agli stati fisici e naturali «nella realtà attuale del mondo empirico».

L'involucro sperimentale è indagato come 'interfaccia dinamica', come struttura di mediazione e di interscambio tra le sollecitazioni ambientali e le esigenze fruibili degli spazi interni, dotato di 'plasticità evolutiva' e di proprietà di 'adattamento' agli stimoli differenziati provenienti dall'ambiente.

La tipologia ambientale e 'adattiva', di forma 'stratificata', comporta la regolazione del profilo di rendimento utilizzando schermi esterni, membrane, superfici isolanti e 'dispositivi di manipolazione' per il controllo prestazionale basato sulla 'selezione' (selective approach) delle sollecitazioni ambientali.

La tipologia ambientale e 'adattiva' elabora i sistemi di involucro nella loro efficacia metabolica e 'istintuale', dotate di prestazioni 'automatiche' e di membrane definite come delle 'pelli biologiche' (attive nei confronti degli agenti mediante l'azionamento di sensori e di dispositivi protettivi). La relazione biologica individua poi, nei sistemi di regolazione e nelle relative possibilità di apertura e chiusura, di protezione, di schermatura e inserimento ambientale, la funzione 'ipotalamica' reattiva agli stimoli esterni e interni.



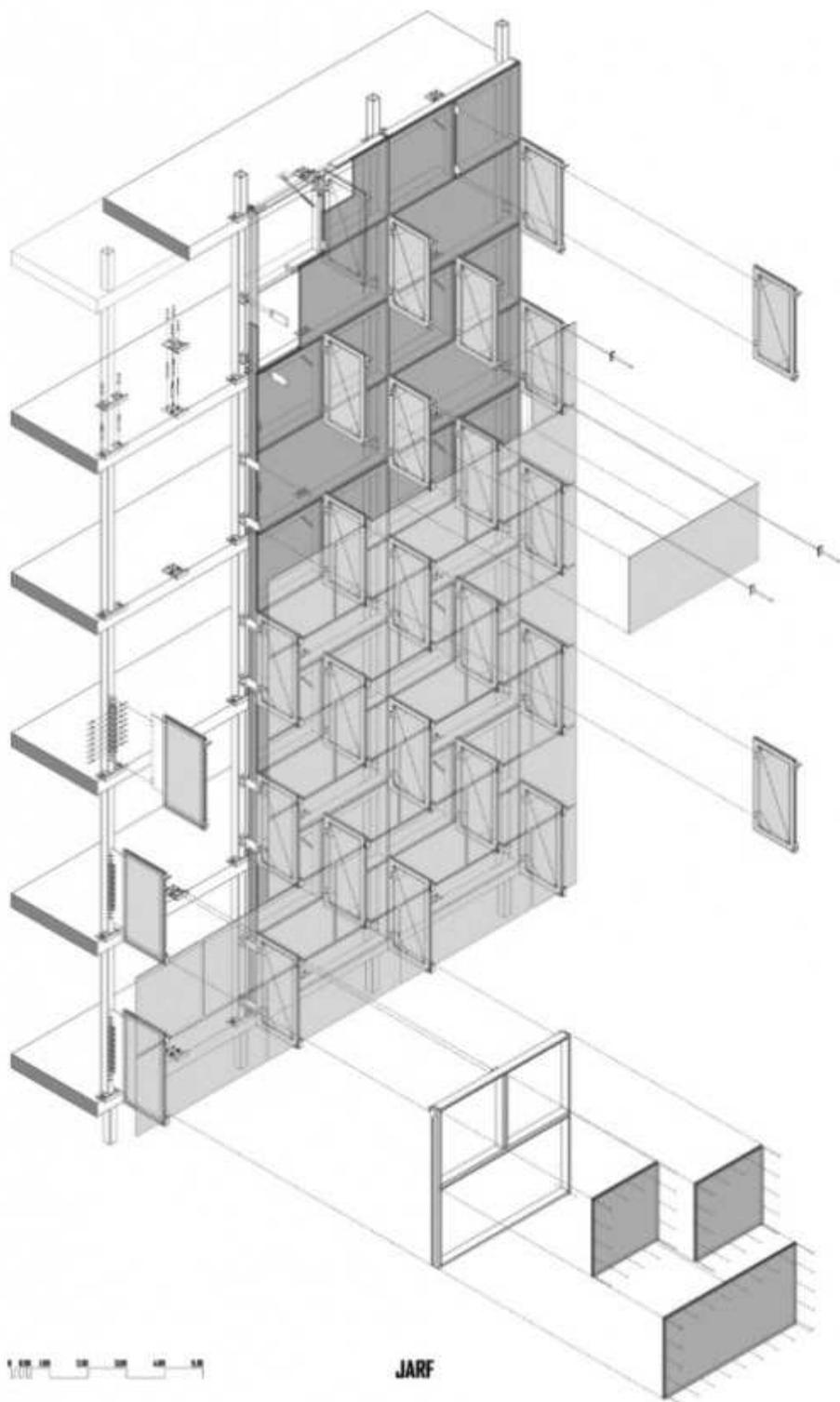
Fig. 2.16: Solar Fabrik, Rolf + Hotz freie Architekten BDA, Friburgo, 1999. Più volte premiato: è un edificio a zero emissioni. Un sistema energetico intelligente copre l'intero fabbisogno di calore ed elettricità tramite energie rinnovabili. La facciata a Sud è totalmente trasparente e schermata da dei brise soleil fotovoltaici.

I sistemi di involucro eco-tech articolati, nella forma di environmentally responsive walls (capaci di rispondere attivamente alle sollecitazioni ambientali mediante il contatto con le condizioni climatiche) e di engineered walls (quali apparecchiature azionabili mediante dispositivi meccanici), sono finalizzati a ricevere, guidare e selezionare le sollecitazioni esterne per realizzare condizioni ergonomiche calibrate negli spazi costruiti (di tipo termoigrometrico, illuminotecnico ed acustico). La disanima si esplicita nello studio di composti “organici”, adattabili e regolabili, nella forma di biological skins e di multifunctional skins, quali dispositivi assorbenti, radianti, riflettenti, filtranti e di trasferimento (termico, luminoso, aereo): le principali combinazioni tipologiche riguardano i sistemi ‘monostrato’ (nella forma single skin façades), i sistemi multistrato (multiple skin façades) e i sistemi integrati dai dispositivi di controllo solare, con schermatura interna od esterna alla facciata. Questi edifici impiegano spesso le trasparenze e le opacità delle superfici che li racchiudono: nel corso delle ore del giorno e della notte, e in relazione all’irraggiamento ed alla temperatura esterna, spostano, ruotano, agguistano gli elementi che ne compongono le facciate per accogliere, respingere o deviare gli eventi atmosferici più disparati.

Michael Wigginton e Jude Harris nel loro testo *Intelligent Skin*¹⁹ definiscono la pelle intelligente come un sistema di controllo attivo e dinamico capace di regolare l’interscambio di energia passante tra l’interno e l’esterno di un ambiente, garantendo un ottimo livello di comfort attraverso la possibilità di variare automaticamente la conformazione del corpo di fabbrica dell’edificio. Un gran numero di sensori permette di regolare in modo preciso il sistema trasformando l’edificio in una fabbrica intelligente.



Fig. 2.17 e Fig. 2.18: Distrito C, Telefónica’s Headquarters, Rafael de la-Hoz Architects, Madrid, 2008. Il progetto è sviluppato con la volontà di ridurre l’impatto ambientale del nuovo insediamento e si caratterizza per l’uso di sistemi tecnologici prefabbricati e di tecnologie per la produzione di energia da fonti rinnovabili: la copertura ospita il più grande impianto fotovoltaico esistente in Spagna, che produce il 40 dell’energia elettrica necessaria all’edificio. La facciata evanescente, scandita per tutta la superficie da un sistema di schermature a lamelle verticali, è caratterizzata dalla presenza di un doppia pelle realizzata con un nuovo tipo di vetro sviluppato proprio per questo edificio: si tratta di una superficie che risulta trasparente dall’interno e opaca dall’esterno.



La pelle intelligente dell'edificio garantisce:

- Protezione dalle intemperie, pioggia, vento e temperature esterne.
- La possibilità di regolare la radiazione solare.
- La possibilità di gestire il passaggio di energia termica.
- Un adeguato isolamento acustico.
- Il controllo dell'edificio aumentandone il grado di sicurezza.

L'evoluzione tecnologica che ha portato alla definizione di un nuovo concetto di involucro, non più statico e passivo, ma adattivo e complesso, ha permesso di indagare e comprendere i vantaggi dell'integrazione di sistemi di automazione a scala architettonica che interagiscono e regolano sia il sistema impiantistico, sia la conformazione estetica - architettonica dell'involucro, con l'obiettivo di ridurre il fabbisogno energetico.

Il cervello di un edificio è il sistema di automazione ad esso associato, e nel dettaglio il computer e il programma informatico che ne regola la gestione. Continuando l'analogia con il corpo umano un sistema di automazione può essere paragonato all'ipotalamo organico.

Michael Davis introduceva nel 1981 il concetto di variabilità della pelle dell'edificio, descrivendo un sistema tecnologico dotato di microsistemi per assorbire, irraggiare, riflettere, filtrare e trasferire servizi da uno spazio all'altro. Nel tempo questo concetto si è definito nell'immagine di un involucro capace di cambiare conformazione in relazione alle sollecitazioni termiche esterne, diventato da trasparente ad opaco, modificando il suo colore, e variando le sue proprietà ottiche. Queste caratteristiche possono essere determinate dalla scelta di materiali che presentano soluzioni evolute in relazione alla loro composizione chimica o all'applicazione sull'involucro di elementi dinamici nel tempo.

I vantaggi dell'adozione di involucri variabili nel tempo in modo autonomo rispetto alla gestione dell'utenza sono giustificati dal fatto che spesso questi sistemi sono adottati in edifici in cui non è garantita la continuità della presenza dell'utenza, come ad esempio nel caso di edifici per uffici.

Dei termostati esterni collegati, ad esempio al sistema impiantistico, permettono di regolare la conformazione delle aperture esterne e del sistema di climatizzazione indipendentemente dalla presenza dell'utenza. La variabilità del sistema di facciata permette di regolare i flussi di energia termica e luminosa attraverso i suoi layer conformativi, ed ha definito un'evoluzione della ricerca legata ai materiali a cambiamento di fase, alle superfici vetrate evolute, quali i vetri elettrocromici e/o fotocromatici, o dei sistemi mobili (orizzontalmente e verticalmente) di schermatura esterna.²⁰

Il concetto di edificio intelligente è, quindi, strettamente correlato a quello di facciata intelligente, poiché è proprio la facciata l'elemento principale che è capace di cambiare configurazione garantendo le performance richieste, enfatizzando la somiglianza tra la facciata e la pelle umana. Questi sistemi di involucro complessi e multi-layer sono sempre caratterizzati dalla possibilità di essere controllati manualmente e in modo automatico, così da gestire in modo efficiente i flussi di energia passanti attraverso di essa. Naturalmente sono i sistemi automatici che garantiscono la completa autonomia del sistema che cambia conformazione in relazione agli input esterni-interni. L'involucro diventa così un vero e proprio sistema organico collegato al sistema centrale di controllo dell'edificio ed all'impianto di climatizzazione che può essere confrontato al sistema arterioso umano.

Thomas Herzog²¹ ci ricorda che se intendiamo l'involucro come pelle dell'edificio, che protegge l'interno dagli agenti atmosferici ma che allo stesso tempo ne sfrutta in modo funzionale la potenza, allora possiamo pensare alla creazione dello spazio protet-

to controllabile. In questo caso le condizioni ambientali esterne diventano una risorsa e non una forza contro cui lottare, mentre l'involucro una 'pelle reattiva' che migliora il benessere interno evoca molte possibilità di cambiamento.

Risulta fondamentale, quindi, sottolineare la tendenza, registrata nell'ultimo decennio, di superare il concetto di chiusura, verticale ed orizzontale, dello spazio costruito, e di definire e parametrizzare i nuovi concetti di pelle e membrana in corrispondenza del ruolo assunto dall'involucro architettonico nella definizione delle nuove prestazioni dell'edificio contemporaneo.

L'involucro come pelle diventa l'elemento fondamentale per regolare i fabbisogni energetici dell'edificio, in particolar modo per quelle architetture 'non domestiche' destinate ad ospitare un'utenza che non è responsabilizzata sulla gestione dell'edificio, in modo non continuativo. In questi casi trasformare l'edificio in un organismo autonomo dotato di intelligenza artificiale e di sistemi variabili di chiusura garantirà, come vedremo successivamente, importanti risparmi in termini di energia.



Fig. 2.19: Radiolinja Office Building, Tommila Aarchitects Ltd, Keilasatama Espoo, Finlandia, 2001. La facciata doppia pelle è collegata con il sistema di condizionamento, e funziona come un sistema di preriscaldamento dell'aria nei mesi invernali e nelle stagioni intermedie, contribuendo a ridurre il fabbisogno energetico dell'edificio. In estate l'aria calda dell'intercapedine è estratta all'esterno dalle bocchette collocate sulla parte alta della superficie vetrata. La pelle interna è realizzata con infissi a triplo vetro, mentre la pelle esterna è costituita da un vetro stratificato di 10,00 mm. L'intercapedine misura 60,00 cm ed è scandita da passerelle in acciaio forato che vengono utilizzate per la manutenzione del sistema di involucro. All'interno della buffer zone è collocato un sistema schermante costituito da una tenda a lamelle, tipo greisser, la cui apertura è regolata da un sistema informatico in relazione alle condizioni di irraggiamento esterno.

2.2.3 L'architettura fra trasparenza e virtualità: l'edificio 'mediatico'

L'architettura contemporanea risulta essere fortemente connotata dalla volontà di rendere gli edifici sempre più rappresentativi del pensiero che li ha generati o del committente che ha contribuito alla loro realizzazione. Da Robert Venturi a Toyo Ito, si registra la necessità di stupire attraverso le scelte tecnologiche e formali adottate. L'involucro architettonico diviene così superficie di sperimentazione e spettacolo, una lavagna multimediale attraverso cui gli attori interessati dal processo di progettazione esprimono la necessità di comunicare un messaggio estetico formale alla società. I grandi schermi in pixel che caratterizzano lo skyline delle città americane o gli edifici ipertecnologici che propongono materiali e soluzioni innovative nelle tecnologie di facciata si sostituiscono alle architetture istituzionali rappresentative che da sempre sono immagine del progresso tecnologico e culturale di una società e di un'epoca.

Il confine che si viene a definire tra mondo fisico e mondo virtuale è costituito sempre più da un mix di riproduzioni elettroniche, di nuovi paesaggi, di comunicazione e rappresentazione. Nella cultura contemporanea viene ad assumere un ruolo centrale l'aspetto visuale, con l'obiettivo della comunicazione rapida, interconnessa e direzionata. Tutte le tecnologie riguardanti l'informazione e la comunicazione stanno assumendo un ruolo fondamentale nello sviluppo dell'architettura contemporanea.

Federic Nantoy afferma che «l'architettura non viene più definita attraverso lo spazio che propone, ma per le sue capacità di trasformarsi il più rapidamente possibile». I campi di applicazione dell'architettura sono orientati da tempo a comprendere i territori dello spazio digitale, insinuandosi all'interno di uno spazio esteso che si sta modificando in funzione delle nuove dimensioni di intervento prodotti dai media, con la quale l'architettura entra sempre in più stretto contatto.²²

Toyo Ito afferma: «Attraverso la diffusione di diverse nuove forme di media, la fluidità acquista sempre maggiore validità. Tanto più lo spazio architettonico e urbano è controllato dai media, quanto più esso diventa cinematografico e fluido. Da una parte i nostri corpi materiali non sono altro che un meccanismo primitivo, che assume aria e acqua e li fa circolare. Dall'altra esiste un altro tipo di corpo all'interno del quale circola informazione, e quel corpo che è connesso al resto del mondo attraverso diverse forme di media contenenti microchip. Oggi siamo obbligati a pensare come combinare architettonicamente questi due diversi corpi e trovare uno spazio appropriato per lo sviluppo del terzo corpo».²³

L'immaterialità è espressa in primo luogo dalla trasparenza, la sensorialità può essere intesa come la capacità di una struttura di interagire con l'esterno, la multimedialità è la scelta di trasformare l'edificio in organismo in grado di rappresentare messaggi su più supporti, integrandoli nell'oggetto edilizio, diventando uno schermo che irradia luci, colori e suoni e, allo stesso tempo comunica delle informazioni.

Spesso si tratta di edifici trasparenti, realizzati con involucri che potremmo definire immateriali: fasci di luce, acqua nebulizzata, elementi scultorei che serialmente danno una consistenza evanescente allo spazio costruito. In relazione alla tecnologia adottata il loro impatto ambientale può essere più o meno grave.

Spesso i media building sono caratterizzati da ampie superfici destinate all'informazione ed alla pubblicità. La scelta di riservare una parte dell'edificio alla comunicazione garantisce di recuperare in tempi più brevi i costi sostenuti per la realizzazione di involucri molto costosi, caratterizzati da pixel luminosi che si distribuiscono in modo più o meno rado su tutta la superficie disponibile. Dal punto di vista energetico si tratta di tecnologie molto impattanti ed energivore in quanto hanno bisogno di

elettricità per funzionare. Il loro impatto può essere ridotto utilizzando i pixel fotovoltaici di ultima generazione o integrando nell'edificio un impianto fotovoltaico che comunemente provvede ad alimentare la facciata mediatica.

Attualmente ci sono molte tecnologie che permettono di trasformare la facciata di un edificio in una superficie mediatica:

- Proiettando o retroproiettando sulla superficie immagini e colori. La proiezione di immagini sulle facciate degli edifici è un metodo abbastanza semplice e relativamente economico; si possono tuttavia rilevare delle difficoltà nell'illuminare le pareti durante le ore diurne di giornate molto soleggiate, specialmente con l'illuminazione frontale. Si ottengono buoni risultati proiettando le immagini su superfici piatte o di colore chiaro, per questo motivo si scelgono vetrate con pellicole colorate o olografiche.

- Integrando nell'involucro macropixel che permettono di trasformare la pelle architettonica in una lavagna multimediale.

La facciata del museo di arte contemporanea a Graz in Austria, progettato da Peter Cook e Colin Fournier nel 2003 è stata concepita come una superficie plasmabile attraverso l'utilizzo di neon circolari che si celano nella doppia pelle di vetro blu. Al tramonto, dietro l'involucro traslucido di metacrilato color petrolio, occhieggiano novecentotrenta luci circolari fluorescenti come fossero pixel a scala urbana; la luminosità di ciascuna si può variare in modo progressivo grazie a un dispositivo computerizzato. I proiettori sono collegati nell'intercapedine tra i due sistemi di facciata. Di giorno l'involucro è ricettore degli eventi che lo circondano e di notte divulgatore di prodotti dell'arte.

- Utilizzando vetri serigrafati, olografici, elettrocromici, che permettono di ottenere una variabilità cromatica durante tutto l'arco della giornata.



Fig. 2.20: Postdamer Platz, Bix, Berlino, Germania, 2005-2006. Si tratta di un'installazione temporanea che ha riguardato un edificio per uffici che si affaccia sulla celebre piazza di Berlino, la facciata si è trasformata per diciotto mesi in una grande lavagna mediatica su cui venivano visualizzate immagini artistiche. Una postazione collocata nella piazza permetteva inoltre ai cittadini di interagire con l'edificio attraverso la possibilità di scrivere sulla facciata le proprie frasi.

- Retroilluminando le superfici trasparenti attraverso corpi illuminanti che vengono inseriti nell'intercapedine tra i due sistemi di chiusura determinando effetti ottici e luminosi controllati da software e programmi computerizzati in grado di comporre immagini statiche o in movimento. Un esempio in tal senso è la Torre dei venti di Toyo Ito, nei pressi della stazione di Yokohama. Un cilindro in alluminio perforato e circondato da dodici anelli al neon rivestiti da lastre riflettenti in materiale acrilico, che modifica il suo prospetto mediante milleduecentottanta piccole lampade sensibili all'intensità e alle variazioni del vento, della luce, della temperatura e al numero dei decibel prodotti dal traffico urbano.

«Ancora una volta l'architettura parla il linguaggio e si serve della tecnologia della pubblicità, non la comunicazione esplicita dai contorni del 'I am a monument' venturiano, bensì un flusso di energia che veicola un sottile ed implicito messaggio che ha

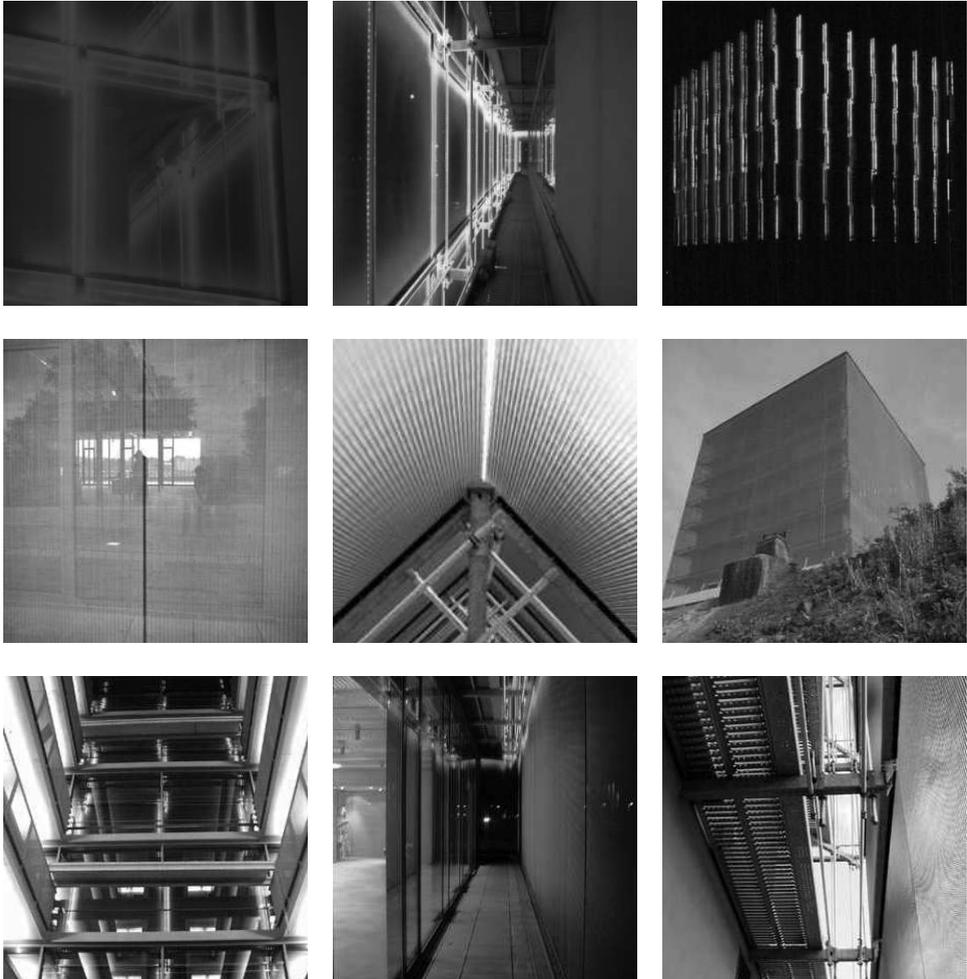


Fig. 2.21: Expomedia "Light Cube", Kramm + Strigl, Saarterrassen, Saarbrücken, 2000. L'intervento di riqualificazione dell'edificio esistente è stato condotto sovrapponendo all'involucro esistente una pelle in microforato all'interno della quale sono stati collocati dei neon verticali che durante le ore notturne permettono di trasformare l'involucro in un'opera d'arte luminosa. Le configurazioni geometriche sono regolate da un software che permette di gestire forme e colori in modo mutevole e sempre nuovo.

nelle allusioni, nella libera interpretazione e nella comunicazione one to one la propria forza ».²⁴

Di conseguenza nell'architettura i muri perdono la loro consistenza, gli oggetti si smaterializzano, il contenuto subentra al contenitore, così si va alla ricerca di uno spazio omogeneo, trasparente sino a diventare effimero.

L'attenzione dell'osservatore, 'filtrata' dalla pelle intesa come 'interfaccia', membrana intelligente, passa così dal contenitore al contenuto, con il risultato che l'edificio rassomiglia al chip di un calcolatore. L'antecedente di tale concezione di architettura lo si trova nel Centre Pompidou a Parigi di Renzo Piano e Richard Rogers.²⁵ In tal senso è celebre la frase dello stesso Rogers in un report per la Pilkington, che nel 1979 afferma:

«L'edificio deve diventare come un camaleonte che si adatta. Un edificio propriamente equipaggiato ed adeguatamente rivestito dovrebbe monitorare tutte le variabili interne ed esterne, temperatura, igrometria e livello della luce, radiazione solare, ecc..., per determinare la migliore equazione energetica, date queste condizioni, e modificare l'edificio in accordo con un sistema interno. Non è troppo chiedere ad un edificio di incorporare, nella sua struttura e nel suo sistema nervoso, la fondamentale qualità dell'adattamento».²⁶

«Il mediabuilding - considerato ancora un'utopia negli anni Sessanta, successivamente disegnato da architetti d'avanguardia e oggi costruito realmente in metropoli come New York, Shanghai e Las Vegas - è [...] la realizzazione concreta della fusione su scala urbana di mondo reale e mondo virtuale, il trasferimento dell'universo telematico dalla sfera privata e individuale, dalla singola postazione informatica alla scala collettiva dello spazio pubblico. In un'epoca di pura informazione come quella che stiamo vivendo, il mediabuilding, attraverso l'utilizzo di facciate interattive multimediali, si propone come nuova struttura architettonica in cui la funzione dell'informazione prevale su quella dell'abitazione».²⁷

Anticipando così i notevoli progressi nel campo della produzione, lavorazione e applicazione di nuove tecnologie a cui si affianca il notevole contributo del vetro in architettura.

Conclusioni

In questo capitolo abbiamo cercato di sintetizzare, attraverso una classificazione prestazionale, l'evoluzione tecnologica, legata alle istanze di efficienza energetica, dell'involucro edilizio. Emerge con forza la tendenza alla smaterializzazione degli elementi di chiusura verticale e orizzontale, che negli anni, parallelamente all'evoluzione della complessità dei sistemi di condizionamento a servizio dello spazio confinato, sono diventati esempio di una ricerca estetico formale dell'architettura minimalista o altamente tecnologica, per cui l'edificio è stato realmente assimilato al concetto di machine à habiter lecorbusieriano, dimenticando totalmente il suo ruolo primario di elemento filtro regolatore dei flussi energetici tra interno ed esterno. Il cortocircuito nell'interpretazione vitruviana della necessaria compresenza di firmitas utilitas e venustas, dettato dall'ottimismo industriale post ottocentesco e post bellico ha portato all'errata interpretazione dell'insegnamento dei maestri moderni, che sperimentavano soluzioni tecnologiche innovative ma cercavano sempre di ricordare il genius loci che le aveva generate. Il già citato Le Corbusier, Frank Lloyd Wright, Mies Van de Rohe, ecc, pur proponendo, in taluni casi, soluzioni architettoniche strettamente dipendenti dal sistema impiantistico di condizionamento, nella maggioranza dei casi riuscivano ad interpretare in chiave moderna i temi dell'architettura locale, proponendo serre ad

accumulo passivo, edifici trasparenti per climi freddi - dove l'effetto dell'irraggiamento avrebbe sicuramente contribuito al comfort indoor -, l'utilizzo di materiali locali in soluzioni tecnologiche che privilegiavano l'assemblaggio a secco, in una visione del progetto integrato antesignana di molte teorie moderne. La crisi energetica degli anni settanta, accompagnata dalle prime e sempre più frequenti riflessioni globali sulla situazione ambientale, ha condotto all'inizio degli anni novanta a riformulare il concetto di involucro e di architettura, con una nuova presa di coscienza del ruolo etico e sociale che entrambi i temi possono rivestire nell'ambito della cultura contemporanea.

L'architettura, opera d'arte ed immagine di un tempo e di un retaggio conoscitivo che l'ha generata, diviene nuovamente il fulcro di una nuova corrente di sperimentazione formale e tecnologica, e l'involucro è l'elemento principe attraverso cui si rispecchia questo cambiamento. Si affermano così nuovi modelli di chiusura, che seppur in molti casi non rinunciano all'evanescenza dimensionale della propria conformazione, declinano in una complessità stratigrafica i sub sistemi necessari a trasformarli da scenografie statiche ad elementi dinamici, osmoticamente attivi. E' il tempo delle architetture mediatiche, dinamiche, multimediali, intelligenti, capaci di cambiare conformazione rispetto agli stimoli ambientali esterni ed alle necessità dell'utenza. L'involucro a schermo avanzato, eco-efficiente e sostenibile interagisce e regola i flussi energetici ed in taluni casi diventa esso stesso sistema impiantistico in grado di produrre energia, termica o elettrica, e di distribuirla a scala edilizia o, addirittura, urbanistica. La ricerca dei prossimi decenni si concentrerà sicuramente nello sviluppo di questi nuovi sistemi di chiusura verticale e orizzontale a tutta superficie, dotati del dinamismo meccanico necessario a renderli realmente tecnologie variabili ed energeticamente efficienti.

Note

¹HERZOG T., KRIPPNER R., LANG W., *Atlante delle facciate*, Utet, Torino, 2005

²BUTERA F., *Dalla caverna alla casa ecologica*, Edizioni Ambiente, Milano, 2007

³DE PAOLI O., "L'involucro vetrato nella progettazione ambientale" in *I percorsi della progettazione per la sostenibilità ambientale*, M. Sala, a cura di, (Firenze, 20 e 21 Ottobre 2004), Alinea editrice, 2004

⁴OLGYAY V., *Design with climate*, Princeton University Press, 1962

⁵ALTOMONTE S., *L'involucro architettonico come interfaccia dinamica. Strumenti e criteri per un'architettura sostenibile*, prefazione di Giorgio Peguiron, Editrice Alinea, Firenze 2004

⁶HERZOG T., KRIPPNER R., LANG W., *Atlante delle facciate*, Utet, Torino, 2005

⁷ALTOMONTE S., *L'involucro architettonico come interfaccia dinamica. Strumenti e criteri per un'architettura sostenibile*, prefazione di Giorgio Peguiron, Editrice Alinea, Firenze 2004

⁸ ALTOMONTE S., *L'involucro architettonico come interfaccia dinamica. Strumenti e criteri per un'architettura sostenibile*, prefazione di Giorgio Peguiron, Editrice Alinea, Firenze 2004

⁹FILIPPI M., “L’involucro edilizio: passivo, attivo o ibrido?”, da *Progettare l’involucro edilizio: correlazioni tra il sistema edificio ed i sistemi impiantistici*, Aicarr, 2001

¹⁰SCHAEFFER O., *Architettura in movimento: tra ludiche scenografie e costruzioni efficienti*, Detail 12, 2009

¹¹Ibidem

¹²TUCCI F., *Involucro ben temperato. Efficienza energetica ed ecologica in architettura attraverso la pelle degli edifici*, Alinea editrice, Firenze, 2006

¹³ARCHEA ASSOCIATI, *La pelle dell'edificio come sistema spaziale*, in Detail 10, 2008

¹⁴COLAFRANCESCHI D., *Sull'involucro in architettura: Herzog, Nouvel, Perrault, Piano, Prix, Suzuki, Venturi, Wines*, Librerie Dedalo, Roma, 1996

¹⁵HERZOG T., KRIPPNER R., LANG W., *Atlante delle facciate*, Utet, Torino, 2005

¹⁶TUCCI F., *Involucro ben temperato. Efficienza energetica ed ecologica in architettura attraverso la pelle degli edifici*, Alinea editrice, Firenze, 2006

¹⁷BENHAM R., *The Architecture of the Well – Tempered Environment*, Architectural Press, Londra, 1969

¹⁸Ibidem

¹⁹WIGGINTON M., HARRIS J., *Intelligent Skin*, Architecture Press, Oxford, 2002

²⁰ Ibidem

²¹HERZOG T., in PERRICCIOLI M., ROSSI M., *Thomas Herzog – Reacting Skin*, Edizioni Kappa, Roma, 2005

²²CLAUDI DE S SAINT MIHIEL A., *Superfici mutevoli. Le tecnologie innovative dei vetri cromogenici per il progetto di involucri a prestazioni variabili*, Tesi di dottorato in Tecnologia e rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente, XVIII ciclo, Università di Napoli, 2005

²³TOYO I., *Image of architecture in electronic age*, in AA.VV., *The virtual architecture*, Tokyo University Digital Museum, 1997

²⁴CORSARO A., *Alta tecnologia a bassa risoluzione*, in www.architettura.it

²⁵ALTOMONTE S., *L'involucro architettonico come interfaccia dinamica. Strumenti e criteri per una architettura sostenibile*, Alinea editrice, Firenze, 2005

²⁶ROGERS R., *Notes on the future of the Glass. Private Report to Pilkington Glass Ltd*, Richard Rogers and Partners, London 1979

²⁷RANAULO G., *Light Architecture*, Testo&Immagine, Torino, 2001

Capitolo 3

Facciate doppia pelle trasparente

Lo sviluppo dei rivestimenti di facciata è legato, a partire dal XVII secolo, all'impiego del vetro in edilizia, periodo in cui si registrano i primi progressi nella fabbricazione e produzione di questo materiale¹. Nello stesso periodo la necessità di incrementare le proprietà isolanti delle finestre porta all'adozione della doppia finestra applicata all'esterno dell'infilso principale². Alla fine del diciannovesimo secolo si diffondono in Europa nuove soluzioni tecnologiche atte a migliorare l'efficienza energetica degli edifici, quali le serre solari e/o i bow windows, che contribuiscono ad aumentare passivamente la temperatura dello spazio confinato nei periodi dell'anno con temperature più basse, e grazie alla possibilità di aprire le specchiature nei mesi estivi non causano fenomeni di surriscaldamento³.

Come ricordato nei capitoli precedenti la ricerca legata agli involucri trasparenti torna ad interessare il settore dell'architettura a partire dagli anni settanta in concomitanza con le prime crisi energetiche e la volontà di riformulare nuovi acronimi architettonici che siano capaci di garantire l'indipendenza energetica degli edifici. Sono questi gli anni delle architetture di vetro proposte in Arizona e nel Nord Europa, allo scopo di dimostrare che è possibile realizzare edifici passivi capaci di trasformare la radiazione solare in energia termica e di essere climatizzati senza l'ausilio delle fonti energetiche fossili.

L'evoluzione legata alla produzione del vetro induce ad utilizzare questo materiale altamente rappresentativo nelle nuove architetture istituzionali, destinate a settori diversi dal residenziale. «Il vetro trova una delle migliori soluzioni d'impiego nella realizzazione delle pareti leggere prodotte industrialmente, che possono essere montate in cantiere sulla struttura portante dell'edificio con montanti e traversi in metallo. Nascono così le "facciate tutto vetro" che contribuiscono a modificare l'immagine architettonica dell'edificio»⁴.

Lo sviluppo di sistemi impiantistici che rendono lo spazio confinato indipendente dalle condizioni climatiche esterne, grazie alla possibilità di riscaldarlo e/o raffrescarlo artificialmente conducono alla rapida diffusione delle facciate trasparenti, che diventano in breve tempo manifesto di una nuova architettura orientata alla smaterializzazione formale e fisica dell'involucro architettonico.⁵

Le facciate trasparenti, paradigma di innovazione tecnologica, si diffondono

La NORMA UNI 8369-2:1987 (Edilizia. Pareti perimetrali verticali. Classificazione e terminologia) definisce le seguenti categorie d'involucro in relazione alle caratteristiche dello strato di ventilazione:

Parete ventilata: soluzione costruttiva caratterizzata da uno strato di ventilazione

Parete ad intercapedine o doppia parete: Soluzione costruttiva caratterizzata dalla presenza di una camera d'aria avente funzione di separare strati esterni da strati o elementi interni.

rapidamente e vengono classificate in relazione al sistema strutturale che le contraddistingue in:

- Continue, si tratta di tipologie di facciata caratterizzati dalla presenza di un sistema di pannelli sostenuti da uno scheletro, in genere di acciaio, collegato alla struttura portante dell'edificio.⁶ Gli infissi così formati supportano riempimenti vetrati o opachi, in quest'ultimo caso le parti opache possono essere tamponate con lo stesso tipo di vetro scelto per le parti trasparenti, con l'aggiunta nella parte posteriore di un pannello isolante. Questo tipo di facciata permette un forte interscambio visivo e l'ingresso di una grande quantità di luce negli ambienti adiacenti, e attraverso l'integrazione di infissi mobili può consentire la ventilazione degli ambienti interni. Poiché la facciata in questo caso non ha nessun ruolo strutturale, i pannelli in vetro risultano essere sollecitati solo a trazione e quindi non sono soggetti a fenomeni di instabilità dovuti alla snellezza. Il sistema di struttura a montanti e traversi è caratterizzato dalla presenza di una griglia costituita da elementi orizzontali e verticali disposti secondo uno schema classico, dove montanti e traversi sono installati in modo isolato in cantiere secondo lo schema definito "a scala", in cui una trama (campata) su due viene realizzata in stabilimento sotto forma di scala e solo i traversi sono assemblati in cantiere⁷. Questo tipo di facciate presenta una scarsa inerzia termica dovuta alle caratteristiche dei materiali leggeri utilizzate per i tamponamenti, che risultano soggetti a varie forme di degrado dovute sia all'azione degli agenti atmosferici che a difetti di montaggio e di messa in opera.
- Composte, o isolanti, o semplicemente vetrocamera; caratterizzate dalla presenza di due o più lastre trasparenti, sigillate attorno ad un anello perimetrale distanziale con la conseguente creazione di un'intercapedine, riempita d'aria, argon o altro gas nobile (immobile e disidratato per evitare fenomeni di condensa e di



Fig. 3.1, a sinistra: Grattaciello Pirelli. Progetto: Giò Ponti, Pier Luigi Nervi. Milano, 1956. Lavori di ristrutturazione delle facciate continue e degli interni a cura di Corvino e Multari, 2005

Fig.3.2, a destra: Herz – Jesu – Kirche, Architetti Allmann Sattler Wappner, Monaco, 2000. Esempio di facciata continua isolante con strutture a montanti e traversi, pressori a filo con lastre di vetro grazie allo sfalsamento continuo delle lastre.

appannamento), che contribuisce ad incrementarne le prestazioni in termini di trasmittanza termica. Questo tipo di facciate è caratterizzato da profilati con diverse forme e realizzati con vari materiali (legno, metallo o pvc) e da tamponamenti in materiale trasparente o traslucido, montati in un sistema multistrato con intercapedine. Lo spessore della camera interna non è direttamente proporzionale al suo potere isolante, in quanto in uno spazio più ampio possono crearsi moti convettivi che favoriscono gli scambi termici con l'esterno.⁸

- Strutturali, si tratta di sistemi di facciata in cui le vetrate sono incollate ad un telaio portante mediante sigillante siliconico ad alta resistenza e di elevate proprietà adesive, specificamente progettato per questo impiego. In questo modo i carichi esterni applicati alle vetrate sono trasmessi ai telai di supporto tramite il silicone strutturale che costituisce il vincolo elastico di fissaggio dei vetri.

La vetrata con silicone strutturale permette di affrancarsi dai sistemi tradizionali di facciate continue, lasciando all'interno i profili portanti e realizzando pareti intere completamente vetrate senza soluzione di discontinuità. Le prime facciate strutturali furono costruite in America negli anni Settanta: all'inizio venivano realizzate con vetri monolitici incollati su due lati, successivamente furono impiegate vetrate isolanti e vetri monolitici con i quattro lati incollati al telaio retrostante.

Questo tipo di facciate non presenta aperture e la climatizzazione interna è affidata ai sistemi meccanici; tuttavia è possibile avere delle lastre che sono intelaiate ad una cerniera e che usano come battuta i profili di silicone, creando finestre apribili. Uno dei maggiori problemi annessi a tale sistema è costituito dal mantenimento non sempre ottimale delle prestazioni meccaniche e di tenuta nel lungo periodo, poiché l'applicazione del sigillante è un'operazione assai delicata che richiede



Fig. 3.3: Musée du Quai Branly, Architetto Jean Nouvell, Parigi, Francia, 2007. Per realizzare la facciata del piano destinato ad uffici è stato utilizzato un sistema di facciata in vetro strutturale caratterizzata dall'uso di silicone structural grazing che garantisce un'ottima tenuta del sistema di facciata con temperature comprese tra - 55° fino a 120°C.

l'ottenimento di alcune caratteristiche basilari, come il mantenimento delle caratteristiche chimico-fisiche, la compatibilità con i materiali di contatto e una reciproca adesione. Sono delle proprietà che servono nel tempo per mantenere la tenuta del giunto vetro-telaio, senza che avvengano screpolature o distacchi imputabili ai movimenti e le flessioni che le lastre subiscono sotto l'azione del vento e dell'utenza, il tutto è accompagnato da ausilio di sostegni meccanici per garantire la massima sicurezza.

- Appese, costituite da un insieme di lastre di vetro sospese le une alle altre con agganci meccanici e collegate tra loro con giunti di silicone orizzontale in grado di assorbire leggeri spostamenti e di garantirne la continuità della chiusura. Il sistema trasferisce tutti i carichi verticali agli attacchi superiori, mediante l'uso di collegamenti, che possono essere metallici o vetrati, che dislocano la componente orizzontale della spinta del vento ad elementi rigidi della struttura.⁹

La funzione portante viene svolta da particolari staffe o articolazioni meccaniche che consentono di appendere l'elemento vetrato alla struttura metallica di supporto, la quale assume la funzione di controventatura per bilanciare i carichi orizzontali indotti dal vento. Gli elementi di ancoraggio passanti, collocati ai vertici delle lastre, rimangono a vista con un impatto visivo minimo date le loro esigue dimensioni. Essi, grazie a dei morsetti dotati di guarnizioni plastiche a contatto con il vetro ed alla possibilità di adeguarsi ai movimenti della facciata, mediante articolazioni mobili di connessione alla struttura di supporto, compensano le sollecitazioni generate dalle dilatazioni termiche e dal vento.

Nel settore delle facciate sospese esistono anche i sistemi "misti" che prevedono il sostegno del vetro per punti, ma con una struttura portante composta da montanti e traversi dalle forme leggere, realizzate in alluminio estruso. In questo modo viene assicurata la completa tenuta del vetro con eleganza e pulizia formale del reticolo interno della facciata.

- Ventilati, in questo tipo di soluzione la parete vetrata è costituita da due sistemi distinti: una facciata esterna generalmente in vetro riflettente con bocchette di ventilazione collocate nella parte inferiore e superiore ed una interna isolante anch'essa talora dotata di aperture destinate all'aerazione dello spazio confinato. Nell'intercapedine tra le due superfici - che può avere uno spessore variabile da 20,00 cm a un metro - circola aria esterna, che si muove grazie all'effetto camino innescato dal calore irradiato dalla vetrata interna. Questo tipo di facciata offre ottime prestazioni anche in condizioni climatiche diverse; per sistemi orientati a sud, est e ovest. Nel periodo invernale la presenza di uno schermo esterno contribuisce ad aumentare la resistenza termica effettiva, soprattutto se le aperture di ventilazione sono regolabili. Durante la stagione fredda, la doppia pelle si comporta come una zona tampone (buffer zone), ovvero una zona di "cuscinetto termico" caratterizzata da una temperatura intermedia tra il microclima relativamente costante interno dell'edificio e le condizioni ambientali variabili esterne. Nel periodo estivo la differenza di temperatura tra l'interno e l'esterno provoca un flusso d'aria nell'intercapedine tra i due vetri con conseguente diminuzione della quantità di calore in ingresso nell'edificio.¹⁰

La diminuzione della trasmissione del calore attraverso la facciata interna permette di mantenere le superfici vetrate ad una temperatura più prossima ai valori della temperatura media ambientale interna.

La facciata esterna può essere costituita da vetri singoli o da unità vetrate doppie, mentre l'intercapedine può avere delle dimensioni variabili. La quantità d'aria

	Tipo di tamponamento	Tipo di involucro	Caratteristiche strutturali	Supporto dei tamponamenti trasparenti	Ventilazione naturale	Fascia climatica di riferimento
FACCIAE CONTINUE	Opaco Trasparente	Monostrato	Collegata direttamente alla struttura dell'edificio o con interposizione di una struttura secondaria in profili metallici.	Telaio	Possibile	Nordico alpino, atlantico oceanico, continentale temperato, continentale freddo.
FACCIAE ISOLANTI	Trasparente	Monostrato	Collegata direttamente alla struttura dell'edificio o con interposizione di una struttura secondaria in profili metallici.	Telaio	Possibile	Nordico alpino, atlantico oceanico, continentale temperato, continentale freddo.
FACCIAE APESE	Trasparente	Monostrato	Portata dal supporto strutturale del fabbricato o con struttura autportante indipendente	Silicone e agganci metallici	Assente	Nordico alpino, atlantico oceanico, continentale temperato, continentale freddo.
FACCIAE STRUTTURALI	Trasparente	Monostrato	Portata dal supporto strutturale del fabbricato o con struttura autportante indipendente	Silicone strutturale	Assente	Nordico alpino, atlantico oceanico, continentale temperato, continentale freddo
FACCIAE VENTILATE	Opaco Trasparente	Doppio strato	Portata dal supporto strutturale del fabbricato o con struttura autportante indipendente	Telaio	Possibile	Nordico alpino, atlantico oceanico, continentale temperato, continentale freddo, mediterraneo.

Tab.3.1: Analisi delle caratteristiche delle diverse tipologie di facciate trasparenti

scambiata tra ambiente esterno e cavità ventilata dipende dalla pressione del vento esterno, dal gradiente di temperatura e dalle dimensioni delle aperture di ventilazione. Le facciate ventilate si diffondono nel Nord Europa con l'obiettivo di implementare le caratteristiche di isolamento termico della frontiera di chiusura verticale trasparente. Questi sistemi sono stati esportati, spesso sconsideratamente, in tutto il mondo, causando talora gravi situazioni di discomfort per gli utenti, che solo l'ausilio di sistemi meccanici di climatizzazione ha permesso di limitare.

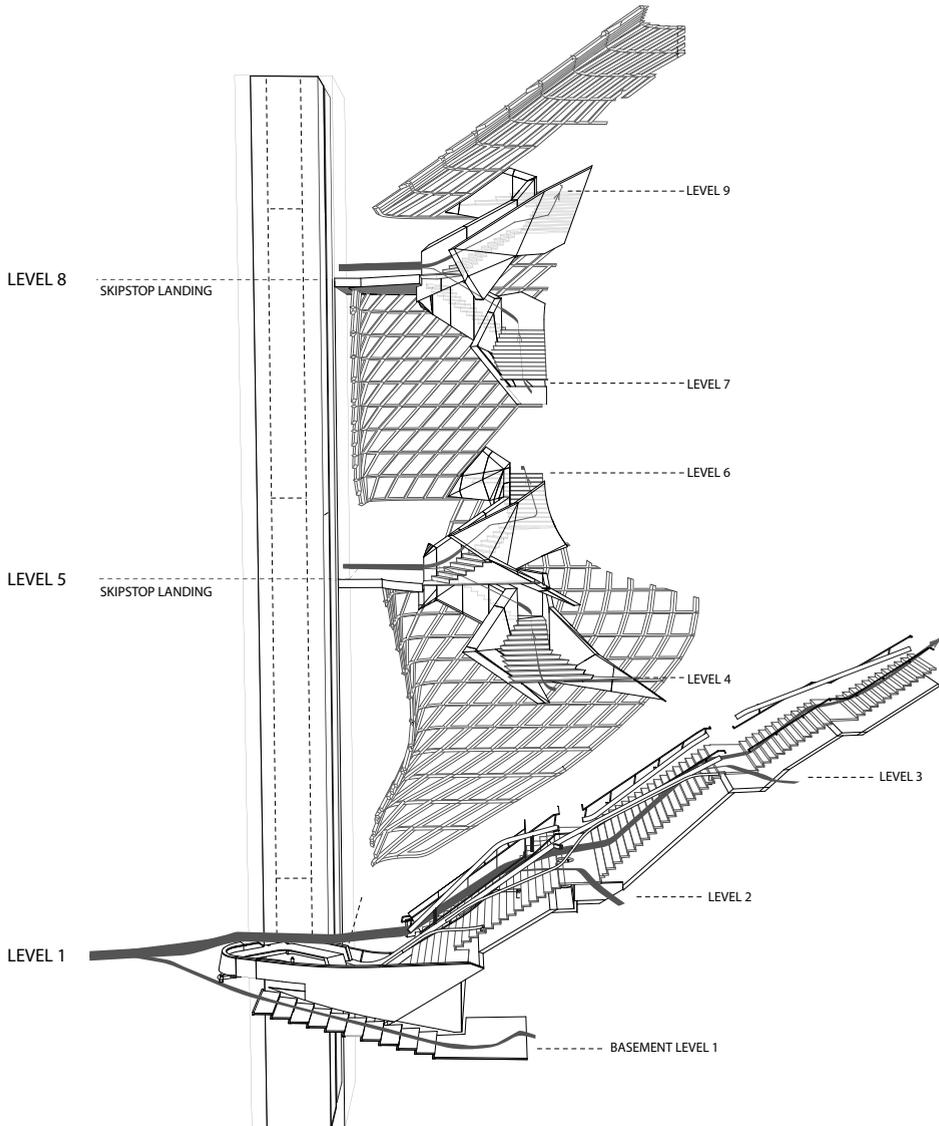


Fig. 3.4: Morphosis, Cooper Union, New York, 2008. Dettaglio della facciata progettata come una pelle dinamica che regola i flussi luminosi e termici necessari all'edificio. In facciata sono integrate delle aperture dedicate alla ventilazione naturale nei mesi estivi; la superficie metallica esterna invece è progettata per garantire una corretta illuminazione delle aule e degli spazi per gli studenti.

3.1 Sistemi di facciata a doppia pelle

Il sistema a doppia pelle può essere considerato un'evoluzione tecnologica della 'facciata continua', di cui rappresenta la più recente espressione evolutiva e ne costituisce la soluzione ad approccio energetico consapevole tecnologicamente più avanzata e promettente, sia per i requisiti prestazionali, che per l'elevata valenza formale.

Dal punto di vista della tecnologia costruttiva, la facciata a 'doppia pelle' non si discosta molto dai tradizionali sistemi di facciata continua più evoluti; sia nella partizione interna che esterna dell'involucro, seguendo lo schema di assemblaggio e conformazione tipico del 'curtain wall'.

L'effetto camino che si genera all'interno dell'intercapedine fa sì che questo tipo di involucro sia caratterizzato dai seguenti vantaggi rispetto ai sistemi tradizionali:

- Riduzione dei rischi di fessurazione e distacco (gli elementi sono assemblati in opera 'a secco' senza l'ausilio di collanti);
- Facilità di posa in opera;
- Manutenzione e possibilità di intervento su ogni singola lastra;
- Protezione dell'edificio dagli agenti atmosferici;
- Eliminazione della condensa superficiale (la presenza dell'intercapedine d'aria favorisce il trasferimento all'esterno dell'eccesso di vapore acqueo prodotto all'interno);
- Eliminazione dei ponti termici e conseguente risparmio energetico;
- Espressiva riduzione del carico termico nel periodo estivo e aumento del calore trattenuto all'interno durante la stagione invernale;
- Riflessione dei rumori esterni ad opera degli strati di paramento, delle intercapedini e degli isolanti che ne determinano l'assorbimento acustico.

L'evoluzione delle facciate doppia pelle ha portato alla sostituzione delle parti opache di tamponamento verticale e orizzontale con componenti traslucidi e trasparenti, in grado di esprimere con maggiore enfasi le qualità estetiche e prestazionali di un edificio.

La ricerca tecnologica ed industriale degli ultimi anni è stata orientata a proporre nuove soluzioni di involucro caratterizzate dall'utilizzo di materiali innovativi di tamponamento e di sistemi di automazione che permettessero di superare il tradizionale concetto di doppia pelle statica, adatto al Nord Europa ed ad aree geografiche con condizioni climatiche simili, e consentisse di declinarle in modo energeticamente efficiente, attraverso la variabilità della loro conformazione fisica, anche in fasce climatiche con temperature miti.

Il recente sviluppo di sistemi 'dinamici' di facciata afferisce alla sfera delle nuove tecnologie per il risparmio energetico ed il controllo bioclimatico, con ricerche focalizzate alla definizione di nuovi sistemi ed organismi energeticamente efficienti, che ha permesso di sviluppare nuovi componenti di facciata trasparente come gli involucri attivi, capaci di integrare il sistema impiantistico al sistema di chiusura e tamponamento, e caratterizzati dalla presenza dell'integrazione di nuove tecnologie per la produzione di energia, quali ad esempio i pannelli fotovoltaici o i pannelli solari ad aria.

Le nuove soluzioni tecnologiche di funzionamento prevedono l'integrazione nell'involucro di sistemi per il monitoraggio e di sensori "intelligenti", attraverso i quali è possibile garantire, modificando i parametri di controllo: in estate l'ottimizzazione della ventilazione nella cavità ventilata; in inverno, la massimizzazione dei guadagni solari, evitando condizioni di discomfort causate da abbagliamento visivo.¹¹

	Trasmittanza termica = K	Confort termico	Confort acustico	Illuminazione	Altri aspetti
Inverno	U doppia pelle \leq U del doppio vetro basso emissivo	Buono	Buono, la seconda pelle è una buona protezione per i rumori che provengono dall'esterno	Luce artificiale persino nelle giornate più luminose, tende abbassate tutto il tempo (per eliminare il fenomeno di abbagliamento), sia per la doppia pelle che per la singola pelle	Costo di costruzione: due volte superiore a quello di una parete tradizionale in Europa e quattro volte negli USA
Estate	Immissione di calore attraverso il vetro interno \geq facciata a vetro singolo con tende frangisole esterne	L'elevata temperatura del vetro interno può causare fenomeni di discomfort	Ventilazione naturale, finestre della pelle interna aperta, il rumore si trasmette di locale in locale di piano in piano	Luce artificiale, tende abbassate tutto il tempo (per eliminare il fenomeno di abbagliamento), sia per la doppia pelle che per la singola pelle	<p>Protezione dal fuoco: possibile trasmissione del fumo da una stanza all'altra in caso d'incendio.</p> <p>Distribuzione spazi: riduzione dello spazio utilizzabile negli uffici, a causa dello spessore della cavità.</p> <p>Manutenzione: costi aggiuntivi</p>

Tab. 3.2: Analisi dei vantaggi e degli svantaggi legati all'adozione di sistemi di facciata trasparenti a doppia pelle.

Nelle facciate a doppia pelle la presenza di bocchette di ventilazione, consente di avere un sistema di facciata variabile con l'alternarsi delle stagioni. In regime invernale, con entrambe le bocchette chiuse, lo sfruttamento dell'effetto serra consente di ottenere uno strato isolante che smorza le perdite di calore indesiderate, mentre in estate, con entrambe le bocchette aperte, la facciata viene ventilata naturalmente o meccanicamente, facendo fuoriuscire il calore in eccesso accumulatosi nell'intercapedine.

Questo sistema di facciata, dotato di componenti schermanti, riesce inoltre a filtrare la luce solare esterna, trasformando un bene quantitativo in uno qualitativo: la luce viene, infatti, direzionata in modo da migliorare l'illuminazione delle stanze interne e contribuisce a ridurre l'utilizzo degli impianti di illuminazione artificiale.

I sistemi di facciata doppia pelle costituiscono attualmente il settore dei componenti di facciata trasparente che negli ultimi anni ha registrato un processo di innovazione tecnologica molto interessante, perché finalizzato proprio alla riduzione dei consumi energetici degli edifici, ed in particolar modo degli edifici per uffici.

Dobbiamo tuttavia ricordare anche alcune problematiche, di non irrilevante importanza, che possono essere causate dall'adozione di queste tipologie di facciata, tra cui, ad esempio, problemi legati all'isolamento acustico ed una scarsa protezione al fuoco, a causa della facilità con cui si propagano fumo e fiamme all'interno dell'intercapedine

dedicata alla ventilazione. Per ovviare a questo problema, solitamente, i progettisti dotano il sistema facciata di elementi divisorii orizzontali all'altezza di ogni piano, capaci di confinare, per quanto possibile, il fumo prodotto da un incendio.

3.2 Classificazione

Esistono, ad oggi, differenti modi di classificazione delle facciate doppia pelle: alcuni si basano sulla configurazione di facciata e sulle modalità di apertura degli infissi interni, altre si concentrano sulla geometria e sulle caratteristiche dell'intercapedine, mentre altri ancora le classificano secondo il tipo di ventilazione.

La classificazione relativa al tipo di ventilazione identifica¹²:

- Le facciate a ventilazione naturale, dove un layer realizzato con un vetro monostrato affiancato ad un'altra superficie di chiusura verticale caratterizzata da maggiore inerzia termica, permette, durante i periodi con poca radiazione solare, di incrementare l'isolamento termico, mentre nei periodi con forte radiazione, la spinta ascensionale dovuta alla differenza di temperatura che si registrano tra esterno ed intercapedine permette di ridurre la temperatura della superficie di chiusura interna. Questo tipo di ventilazione è definito dallo standard NBN EN 12792 come "una ventilazione che conta solamente sulle differenze di pressione senza il supporto del movimento di componenti".
- Facciate a sistema attivo, caratterizzate da sistemi di ventilazione meccanica posti all'interno dell'intercapedine che permettono di espellere l'aria calda nei mesi estivi e di trattenerla, incrementando l'isolamento termico del componente, nei mesi invernali.
- Facciate a ventilazione ibrida, caratterizzate dalla possibilità di incrementare i moti naturali d'aria che si creano all'interno dell'intercapedine per effetto del gradiente di temperatura con sistemi di estrazione meccanica.

Il tipo di ventilazione esercita, più di altri fattori, una considerevole influenza sulle performance termiche della facciata e sulla variabilità di queste nel tempo. In effetti, mentre è possibile garantire le performance di un sistema di ventilazione meccanico, non altrettanto si può fare per un sistema naturale il cui funzionamento varia nel tempo in base alle condizioni meteorologiche (vento e differenza di temperatura).

La classificazione rispetto alla modalità di ventilazione è relativa all'origine ed alla destinazione dell'aria che circola nella cavità ventilata:¹³

- Ventilazione con aria esterna; in questo tipo di facciata l'aria immessa

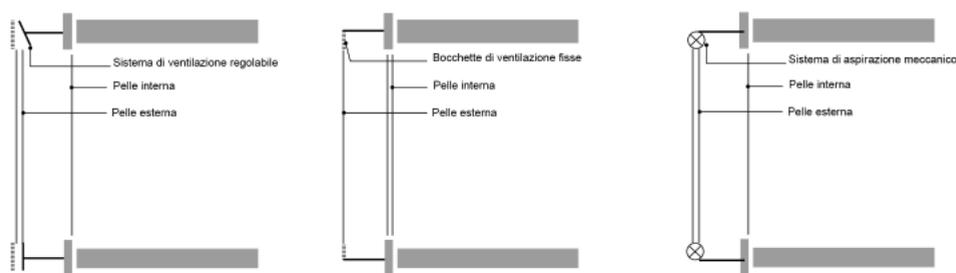


Fig. 3.5: Schemi relativi al tipo di ventilazione in relazione alle caratteristiche delle bocchette. Da sinistra: Ventilazione naturale, bocchette fisse; Ventilazione meccanica, ventilatori; Ventilazione ibrida, bocchette mobili

all'interno dell'intercapedine proviene dall'ambiente esterno dove viene rimessa immediatamente. L'edificio è totalmente avvolto da un'intercapedine d'aria.

- Ventilazione con aria interna; in questo tipo di facciata l'aria immessa all'interno dell'intercapedine proviene dall'ambiente interno dove viene rimessa immediatamente. L'edificio è totalmente avvolto da un'intercapedine d'aria.
- Aria immessa dall'esterno e recuperata all'interno dell'edificio; in questa conformazione di facciata l'aria immessa dall'esterno dell'edificio viene condotta all'interno e può essere utilizzata attraverso degli scambiatori di calore per ridurre il fabbisogno energetico dell'edificio.
- Aria esausta; in questo caso l'aria immessa arriva dall'interno e viene emessa all'esterno dell'edificio.
- Aria in quiete; l'intercapedine non è ventilata e si trasforma in uno spazio a tenuta stagna che incrementa l'isolamento termico dell'involucro.

Le doppie pelli trasparenti possono essere classificate, infine, in relazione alla loro conformazione geometrica in¹⁴:

- box windows; costituite da un telaio tridimensionale fisso al quale sono ancorate due sottostrutture: quella esterna, fissa, costituita da un singolo vetro, e quella

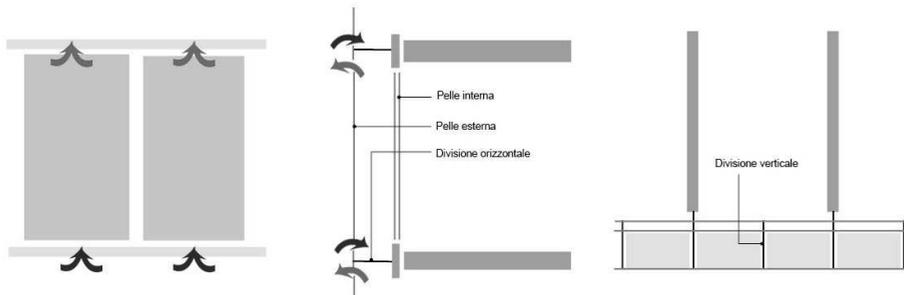


Fig. 3.6 – Schema del sistema di ventilazione nelle facciate “box windows”

	Ventilazione naturale	Ventilazione meccanica	Ventilazione ibrida
Superficie esterna	Vetro monostrato senza caratteristiche di isolamento termico	Vetro camera doppio basso emissivo	Vetro monostrato senza caratteristiche di isolamento termico
Superficie interna	Vetro camera doppio basso emissivo o involucro massivo coibentato	Vetro monostrato senza caratteristiche di isolamento termico	Vetro camera doppio basso emissivo o involucro massivo coibentato
Bocchette di ventilazione	Costituite da lamelle fisse e non regolabili	Sistemi di apertura mobili e regolabili dotati di ventilatori di aspirazione	Sistemi di apertura mobili e regolabili dotati di ventilatori di aspirazione

Tab. 3.3: Analisi delle prestazioni di sistemi di facciata doppia pelle in relazione al tipo di ventilazione dell'intercapedine

interna, caratterizzata da un componente finestrato apribile. L'involucro a doppia pelle viene fissato all'edificio attraverso sistemi di ancoraggio, che possono essere metallici oppure lignei. Le sole aperture che è possibile avere sulla pelle esterna sono gli ingressi dell'aria per la ventilazione dello spazio intermedio. La cavità esistente tra le due sottostrutture della facciata è divisa orizzontalmente all'altezza di ogni interpiano, mentre, verticalmente, la divisione avviene secondo un passo stabilito a livello progettuale, spesso individuato con la distanza tra finestra e finestra. Questa divisione impedisce anche il passaggio di rumori tra un ambiente e quelli ad esso adiacenti, peculiarità che rende questo tipo di facciate particolarmente adatte in quegli edifici dove è richiesto un elevato isolamento acustico. La superficie esterna di queste facciate può essere costituita da un vetro continuo o da una partizione quadrangolare che permette di utilizzare diversi tipi di tamponamento (opaco o trasparente), caratterizzando esteticamente la superficie esterna.

- Shaft-box windows¹⁵; costituita da un sistema di sottostrutture accoppiate a singole celle alternate a canali verticali, i quali si sviluppano lungo tutta l'altezza dell'edificio e svolgono solamente la funzione di recupero dell'aria calda dalle celle adiacenti convogliandola verso l'esterno o verso accumulatori di calore.

La tecnologia associata a questo tipo di involucro dà vita ad una composizione di facciata, dove alle 'box windows' si alternano fasce continue a sviluppo verticale.

I pannelli costituenti la prima e la seconda pelle separati dalla camera d'aria sono montati attraverso un telaio metallico, ancorato alla struttura portante dell'edificio. Di conseguenza, l'intero involucro dell'edificio è caratterizzato dal sequenziale accostamento di celle aventi intercapedini indipendenti tra loro. La maglia strutturale dell'edificio influisce quindi in modo determinante sulla compartimentazione dell'intercapedine, la quale seguirà la scansione degli elementi portanti del fabbricato a cui si fissano le celle stesse. Come nel sistema a canali, la tipologia del telaio che sostiene entrambe le facciate vincola la profondità dell'intercapedine che generalmente non supera i 30 cm.

Questo tipo di facciate garantisce prestazioni migliori in termini di isolamento acustico e termico in edifici con altezze contenute dove non è necessario prevedere sistemi di ventilazione meccanica dell'intercapedine.

L'involucro esterno può essere continuo o strutturale; in entrambi i casi, si possono predisporre sistemi di apertura per facilitare le operazioni di pulizia e manutenzione sia della facciata interna che di quella esterna.

I costi di costruzione e quelli d'esercizio risultano inferiori rispetto ai sistemi di facciata a corridoio e a tutta superficie, grazie alla semplicità del sistema costruttivo

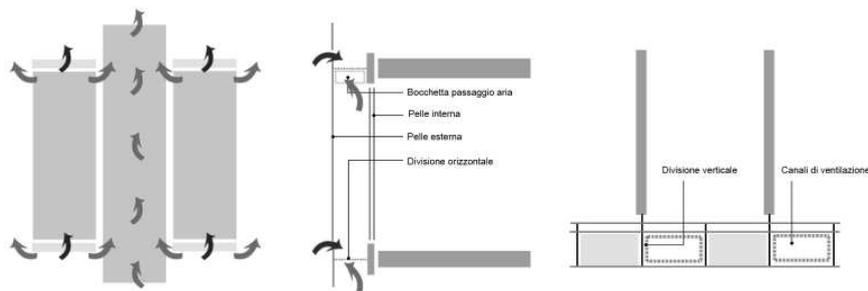


Fig. 3.7: Sistema di ventilazione nelle "shaft box facades"

MODALITÀ DI VENTILAZIONE CON EMISSIONE DALL'ALTO

<p>Ventilazione con aria esterna</p> <p>Possibilità di ventilare naturalmente l'intercapedine con riduzione dei consumi energetici</p>	<p>Ventilazione con aria interna</p> <p>Migliore isolamento termico nei mesi invernali. Possibilità di collegare il sistema di facciata ad un recuperatore di calore per ridurre il carico termico dell'edificio. Riduzione dei consumi energetici</p>	<p>Aria immessa dall'esterno e recupero aria all'interno dell'edificio</p> <p>Possibilità di ventilare naturalmente gli spazi confinati. Possibilità di collegare il sistema di facciata ad un recuperatore di calore per ridurre il carico termico dell'edificio. Riduzione dei consumi energetici</p>	<p>Aria esausta</p> <p>Possibilità di ventilare naturalmente gli spazi confinati. Possibilità di collegare il sistema di facciata ad un recuperatore di calore per ridurre il carico termico dell'edificio. Riduzione dei consumi energetici</p>	<p>Aria in quiete</p> <p>Migliore isolamento termico nei mesi invernali</p>
<p>SVANTAGGI</p> <p>E' sempre necessario avere un sistema di condizionamento e ventilazione meccanica dell'edificio con un aumento dei consumi energetici.</p>	<p>E' sempre necessario avere un sistema di condizionamento e ventilazione meccanica dell'edificio con un aumento dei consumi energetici.</p>	<p>D'estate il sistema non può essere adottato a causa della temperatura che l'aria raggiunge nelle ore diurne all'interno dell'intercapedine, comportando la necessità di un sistema di condizionamento ed un aumento dei consumi energetici dell'edificio.</p>	<p>Poiché l'aria interna viene espulsa dal basso è necessario integrare la bocca di ventilazione con un ventilatore con aumento dei consumi di energia elettrica dell'edificio.</p>	<p>E' sempre necessario avere un sistema di condizionamento e ventilazione meccanica dell'edificio con un aumento dei consumi energetici.</p>
<p>SOLUZIONI</p> <p>Integrare nel sistema di facciata tecnologie per la produzione di energia che possano ridurre l'incremento di consumi energetici (fotovoltaico, solare termico)</p>	<p>Integrare nel sistema di facciata tecnologie per la produzione di energia che possano ridurre l'incremento di consumi energetici (fotovoltaico, solare termico)</p>	<p>Integrare nel sistema di facciata tecnologie per la produzione di energia che possano ridurre l'incremento di consumi energetici (fotovoltaico, solare termico). Garantire l'apertura delle bocchette nelle ore notturne dei mesi estivi.</p>	<p>Integrare nel sistema di facciata tecnologie per la produzione di energia che possano ridurre l'incremento di consumi energetici (fotovoltaico, solare termico)</p>	<p>Integrare nel sistema di facciata tecnologie per la produzione di energia che possano ridurre l'incremento di consumi energetici (fotovoltaico, solare termico)</p>

Tab. 3-4: Analisi delle prestazioni di sistemi di facciata doppia pelle in relazione alle modalità di ventilazione dell'intercapedine con emissione dall'alto. Per la valutazione dei vantaggi e svantaggi di questo sistema si sono considerate solo soluzioni di facciata del tipo box windows, perché per intercapedine con altezza maggiore a 5,00 si avrebbe la necessità di incrementare la ventilazione con sistemi elettrici e maggiormente energivori.

che permette sia la quasi completa prefabbricazione dell'intero involucro che la semplice e diretta ispezionabilità dell'intercapedine.

- Corridor façades; la struttura di supporto della facciata esterna identifica, attraverso la sua conformazione fisica, dei canali di intercapedine orizzontali o verticali; ad esempio, nel caso (più frequente) di canali orizzontali, corrispondente generalmente allo sviluppo dell'interpiano, si avrà un numero di canali equivalente al numero dei livelli dell'edificio. Le dimensioni (profondità e larghezza) del canale di intercapedine dipendono dal tipo di supporto di facciata adottato e dalle caratteristiche dimensionali del telaio portante dell'edificio. Rispetto ai sistemi a tutta superficie, quelli a canali non creano una facciata esterna completamente separata dal fabbricato: l'involucro esterno viene fissato a quello interno, solidale alla struttura portante dell'edificio, attraverso un telaio comune o a elementi puntuali di collegamento. Lo spessore dell'intercapedine varia dai 20 a 50 cm, riducendo in parte l'effetto architettonico della doppia parete.

La facciata interna, di tipo continuo, e quella esterna, continua o strutturale, possono essere sostenute dal medesimo telaio portante che si fissa alla struttura dell'edificio e identifica i canali di intercapedine.

I sistemi di supporto delle due facciate possono essere anche indipendenti tra loro, permettendo maggiore autonomia architettonica tra le due facciate, ma la necessità di creare delle intercapedini canalizzate, impone l'inserimento di profili metallici di partizione che si fissano alla prima e alla seconda pelle.

La facciata interna si compone di serramenti apribili, parzialmente o completamente, ad anta o scorrevoli utilizzabili per le operazioni di manutenzione; se realizzate, le parti fisse dell'involucro interno possono essere costituite da pannelli sandwich isolanti opachi (rivestiti in legno, metallo, cotto o materiale lapideo) o da vetrate fisse. Tali elementi possono essere applicati in ogni tipologia di facciata.

La facciata esterna, in funzione delle caratteristiche tecniche delle vetrate che la costituiscono e del telaio con cui è realizzata può essere anche apribile verso l'interno. Sulla parete esterna dell'involucro, caratterizzata, come nelle altre tipologie, da un vetro singolo, vengono posizionate, nelle vicinanze del pavimento e del soffitto, le bocchette per l'immissione e l'estrazione dell'aria; per evitare che l'aria esausta proveniente dal piano inferiore possa penetrare attraverso una nuova bocchetta nel piano superiore, queste vengono posizionate in modo alternato.

Poiché il corridoio compreso tra due pelli è fruibile, in fase di progetto è utile prevedere sistemi che riducano la possibile trasmissione dei rumori tra questo spazio e quelli interni adiacenti; inoltre è bene ipotizzare strutture di sicurezza quali balauste interne, posizionate subito dopo la facciata vetrata esterna.

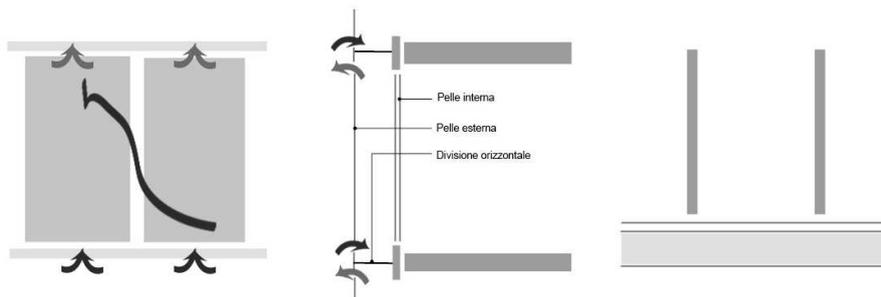


Fig. 3.8: Sistema di ventilazione nelle "corridor facades"

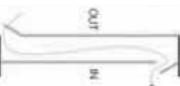
MODALITÀ DI VENTILAZIONE CON EMISSIONE DAL BASSO



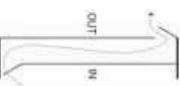
Ventilazione con aria esterna



Ventilazione con aria interna



Aria immessa dall'esterno e recuperta all'interno dell'edificio



Aria esausta



Aria in quiete

VANTAGGI	SVANTAGGI
<p>Possibilità di controllare la temperatura all'interno dell'intercapedine</p>	<p>Poiché l'aria è estratta dalla bocchetta in basso sarà necessario dotarla di sistemi meccanici di aspirazione. Avere la pelle interna sempre chiusa comporta la necessità di dotare l'edificio di un sistema di condizionamento meccanico</p>
<p>Maggiore isolamento termico nei mesi invernali. Possibilità di collegare il sistema di facciata ad un recuperatore di calore per ridurre il carico termico dell'edificio. Riduzione dei consumi energetici</p>	<p>Poiché l'aria è estratta dalla bocchetta in basso sarà necessario dotarla di sistemi meccanici di aspirazione. Avere la pelle esterna sempre chiusa comporta la necessità di dotare l'edificio di un sistema di condizionamento meccanico</p>
<p>Permette la ventilazione dell'intercapedine. Possibilità di collegare il sistema di facciata ad un recuperatore di calore per ridurre il carico termico dell'edificio. Riduzione dei consumi energetici</p>	<p>Poiché l'aria è estratta dalla bocchetta in basso sarà necessario dotarla di sistemi meccanici di aspirazione. D'estate il sistema non può essere adottato a causa della temperatura che l'aria raggiunge nelle ore diurne all'interno dell'intercapedine.</p>
<p>Permette la ventilazione dell'intercapedine. Possibilità di collegare il sistema di facciata ad un recuperatore di calore per ridurre il carico termico dell'edificio. Riduzione dei consumi energetici</p>	<p>Poiché l'aria è estratta dalla bocchetta in basso sarà necessario dotarla di sistemi meccanici di aspirazione.</p>
<p>Maggiore isolamento termico nei mesi invernali</p>	<p>È sempre necessario avere un sistema di condizionamento e ventilazione meccanica dell'edificio con un aumento dei consumi energetici</p>
<p>Integrare nel sistema di facciata tecnologie per la produzione di energia che possano ridurre l'incremento di consumi energetici (fotovoltaico, solare termico)</p>	<p>Integrare nel sistema di facciata tecnologie per la produzione di energia che possano ridurre l'incremento di consumi energetici (fotovoltaico, solare termico). Garantire l'apertura delle bocchette nelle ore notturne dei mesi estivi.</p>
<p>Integrare nel sistema di facciata tecnologie per la produzione di energia che possano ridurre l'incremento di consumi energetici (fotovoltaico, solare termico)</p>	<p>Integrare nel sistema di facciata tecnologie per la produzione di energia che possano ridurre l'incremento di consumi energetici (fotovoltaico, solare termico)</p>

Tab. 3.5: Analisi delle prestazioni di sistemi di facciata doppia pelle in relazione alle modalità di ventilazione dell'intercapedine con emissione dal basso. Per la valutazione dei vantaggi e svantaggi di questo sistema si sono considerate solo soluzioni di facciata del tipo box windows, perché per intercapedine con altezza maggiore a 5,00 si avrebbe la necessità di incrementare la ventilazione con sistemi elettrici e maggiormente energivori

Talvolta, per favorire l'isolamento acustico, la protezione dal fuoco e la ventilazione sono previsti degli elementi divisorii trasversali che tagliano il corridoio in corrispondenza degli spigoli degli edifici e delle aperture interne, dove si possono formare fenomeni di pressione interna che ne compromettono il funzionamento. Rispetto ai sistemi a tutta superficie quelli a canali risultano economicamente più vantaggiosi, soprattutto in fase costruttiva, grazie al maggiore livello di prefabbricazione degli elementi costituenti le due facciate.

Anche in fase di esercizio, nelle operazioni di pulizia e manutenzione (sostituzione e ripristino), i costi risultano contenuti in quanto si ha la possibilità di agire su entrambe le facciate direttamente da ogni livello di solaio e riducendo al minimo l'uso di ponteggi.

- Multistory facades; lo spazio compreso tra strato interno e strato esterno avvolge l'intero edificio, senza elementi divisorii intermedi. La ventilazione all'interno delle superfici di contenimento viene garantita attraverso grosse aperture poste nella parte bassa e sulla sommità dell'edificio; queste possono essere chiuse in alcuni periodi dell'anno per ottimizzare il guadagno di energia termica ed azionate elettronicamente in concomitanza a dei rilevatori di temperatura che permettono di gestirle in relazione alle condizioni climatiche esterne.

La pelle interna in vetro viene fissata direttamente alla struttura portante del fabbricato per mezzo di montanti e traversi assicurati ai solai, secondo un sistema continuo di facciata. La pelle esterna viene sostenuta da elementi di supporto indipendenti dall'involucro interno; essa è costituita, generalmente, da una facciata strutturale o continua; sotto il profilo statico, può essere sorretta attraverso un telaio indipendente dalla struttura portante dell'edificio oppure fissata ad essa per mezzo di opportuni elementi di collegamento; nel caso di sostegni puntuali, posizionati in modo diffuso lungo tutta la facciata, la componente orizzontale del vento viene direttamente trasferita alla struttura portante dell'edificio; nel caso in cui, invece, la facciata sia completamente svincolata dal corpo retrostante e poggiante direttamente al terreno o appesa alla sommità dell'edificio verranno predisposti elementi di controventamento. Date le caratteristiche fisiche di tali sistemi le intercapedini possono essere dimensionate con spessori tali (80-90 cm.) così da assumere l'aspetto e la funzione di serre, con la possibilità di contenere percorsi grigliati ai vari livelli dell'edificio. I serramenti della facciata interna, completamente apribili, possono esser sia ad anta che scorrevoli, permettendo la ventilazione naturale degli ambienti attraverso l'intercapedine e l'accesso diretto a quest'ultima attraverso i percorsi esterni. La facciata esterna può essere costituita da pannelli fissi o da elementi apribili (frangisole in vetro, serramenti) in funzione delle caratteristiche tecniche e strutturali che la definiscono.

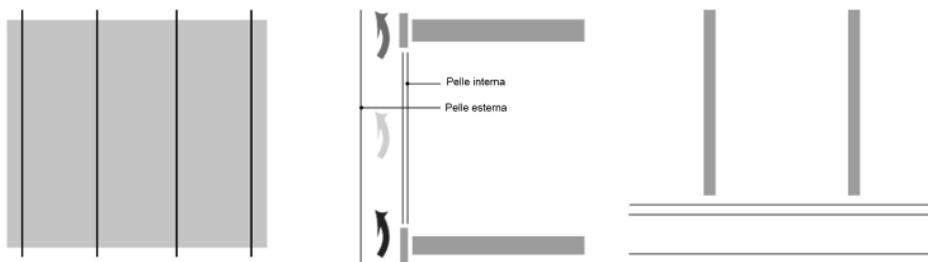


Figura 3.9: Sistema di ventilazione nelle "multistory facades"

I costi, in fase di realizzazione, risultano di conseguenza più elevati rispetto alle altre tipologie di facciata a causa della maggiore complessità del sistema costruttivo; ciò comporta un minore livello di prefabbricazione degli elementi che compongono le due pelli (soprattutto quella esterna), deferendo gran parte delle opere di montaggio dall'azienda produttrice al cantiere.

In fase di gestione, la presenza di percorsi interni all'intercapedine e la completa ispezionabilità di entrambe le facciate semplifica le operazioni di manutenzione evitando anche l'onere di eventuali ponteggi esterni. La notevole distanza tra le due facciate può però agevolare l'ingresso nell'intercapedine di agenti inquinanti, con il conseguente aumento dei costi per la pulizia delle superfici interne.

Questo tipo di facciata è consigliabile per quegli edifici nei quali è necessario garantire un elevato isolamento acustico rispetto ai rumori dell'esterno, poiché non presenta aperture sulla pelle esterna, questa caratteristica obbliga inoltre a dotare l'edificio di un sistema di ventilazione meccanica. Il sistema della doppia facciata viene quindi sviluppato esclusivamente per regolare i flussi termici derivanti da condizioni climatiche differenti.

I sistemi di facciata a tutta superficie offrono un elevato grado di autonomia progettuale, sia architettonica che costruttiva, grazie alla ridotta presenza di vincoli dimensionali ed alla possibilità di definire la quinta architettonica esterna secondo logiche indipendenti dalla struttura dell'edificio retrostante.

A queste tipologie di involucro appartengono anche le facciate in vetro applicate nelle ristrutturazioni di edifici esistenti; la nuova pelle, grazie alla sua struttura completamente separata dalla tradizionale chiusura verticale, esterna, si adatta con semplicità al fabbricato, migliorando le prestazioni complessive dell'involucro senza vincolare le aperture e le caratteristiche architettoniche esistenti.

Uno dei principi fondamentali di cui si deve avere cura in relazione alla scelta del sistema di facciata rispetto alle caratteristiche geometriche è quello di sviluppare una determinata idea-guida alla progettazione, che permetta la totale integrazione tra



Fig. 3.10, a sinistra: Esempio di intercapedine in una "Multistory façades"

Fig. 3.11, a destra: "Multistory façades" nell'edificio per uffici di Steidle+Partner, Monaco, 1997

involucro ed edificio. Come è possibile osservare, ad ogni tipologia sopra descritta devono esser associati sistemi meccanici o impiantistici da prevedere in fase di progetto, che possano implementare il soddisfacimento delle prestazioni richieste al “sistema involucro” che deve, inoltre, garantire requisiti di privacy e/o di isolamento termico-acustico richiesti dagli utenti in relazione alle funzioni lavorative da svolgere all’interno dell’edificio oppure in relazione alle condizioni climatiche esterne. Le “box windows” sono preferibili quando si sceglie di realizzare facciate compatte che favoriscano la privacy tra gli ambienti confinati, mentre le “shaft-box facades” sono consigliate, grazie alle poche aperture sulla superficie esterna, quando si richiedono alti valori di isolamento acustico. Le “corridor facades” sono ottimali quando si vuole ottenere un buon volume di ventilazione, mentre le “multistory facades” vengono preferite quando c’è bisogno di una ventilazione meccanica oppure quando è richiesta una facciata con poche aperture.

	BOX WINDOW	SHAFT BOX FACADE	CORRIDOR FACADE	MULTI-STOREY FACADE
				
Isolamento acustico	Usata quando ci sono delle fonti di rumore esterno o quando è necessario isolare acusticamente i vari ambienti confinati	La presenza di meno aperture (rispetto alle facciate Box Window) garantisce un buon isolamento rispetto ai rumori esterni	Danno problemi in merito alla trasmissione del suono da un ambiente ad un altro	Adatta quando i rumori esterni sono molto alti, anche se possono causare problemi di trasmissione del rumore tra un ambiente e l'altro
Protezione al fuoco	Fattore di rischio basso (l'intercapedine permette di isolare gli ambienti adiacenti).	Fattore di rischio basso. Gli ambienti sono comunicanti solo attraverso le aperture di ventilazione.	Fattore di rischio medio. (Gli ambienti dello stesso corridoio sono collegate tra loro)	Fattore di rischio alto. (Tutti gli ambienti si aprono sulla stessa buffer zone)
Ventilazione naturale	Finestre apribili, dedicate alla ventilazione naturale.	Deve essere posta attenzione in modo che le correnti d'aria in uscita all'interno di intercapedini di facciata collocate in un'unica zona.	Deve essere posta attenzione affinché l'aria esausta di un ambiente non passi all'ambiente adiacente. Il problema può essere risolto con una configurazione diagonale delle aperture.	Non può esserci ventilazione naturale, gli ambienti dell'edificio devono essere climatizzati in modo artificiale.

Tab. 3.6: Valutazione delle caratteristiche dei vari tipi di facciata. Da: POIRAZIS H., Double Skin facades for office buildings, Division of Energy and Building Design, Department of Construction and Architecture, Lund Institute of Technology, Lund University, 2004

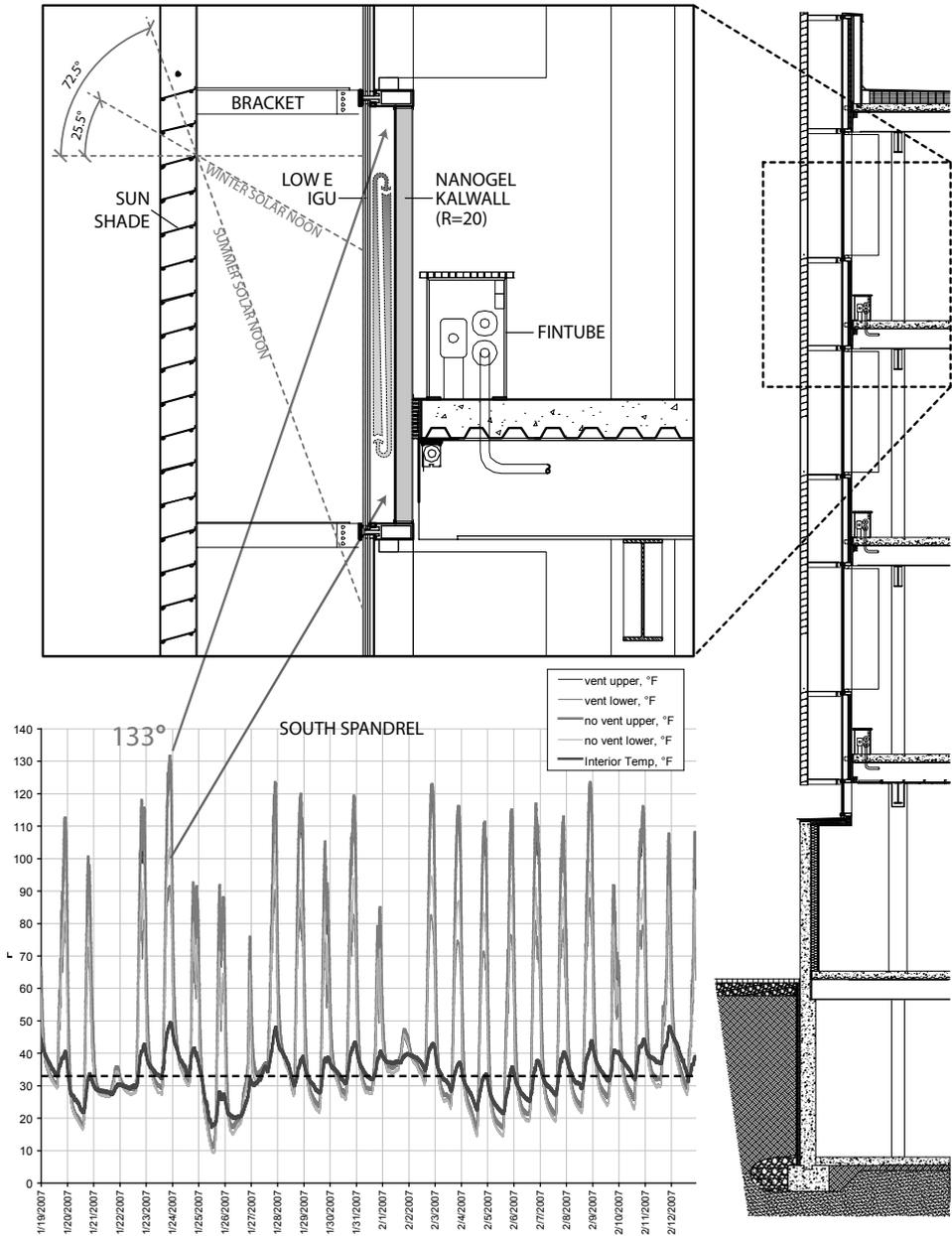


Fig. 3.12 Sculpture Building and School of Art Gallery, Kieran Timberlake, Yale University, New Haven, CT. L'involucro è stato progettato come una doppia pelle trasparente che coniuga la trasparenza di una facciata in vetro con le prestazioni energetiche in termini di isolamento termico di una muratura tradizionale. Per raggiungere questo obiettivo le chiusure verticali sono state concepite come delle facciate intelligenti, e attraverso l'utilizzo di materiali a cambiamento di fase e scambiatori di calore sono state trasformate in sistemi tecnologici capaci di gestire i flussi di energia passante durante tutto l'arco dell'anno garantendo ottime condizioni di comfort interno.

3.3 Struttura, connessioni e tecniche di montaggio delle facciate ventilate trasparenti

L'elemento architettonico verticale che delimita lo spazio, sia interno che esterno, è anche denominato 'parete' può avere funzione strutturale (parete portante) o solo distributiva, di separazione e di tamponamento. Nella costruzione tradizionale, la chiusura perimetrale ha spesso assunto un ruolo strutturale, mentre in quella contemporanea il termine è utilizzato soprattutto per indicare gli elementi leggeri che costituiscono il tamponamento esterno di edifici a struttura intelaiata, in acciaio o conglomerato cementizio armato, alludendo quindi ad una parete effettivamente separabile dall'intera costruzione.¹⁶

Il sistema involucro deve essere progettato per sopportare e compensare le deformazioni della struttura principale dell'edificio, i pesi propri o accidentali su di esso gravanti, gli spostamenti dinamici causati dal vento o dai terremoti, e le variazioni dimensionali legate alla dilatazione termica dei componenti metallici.

La facciata deve sostenere in assoluta sicurezza i carichi che agiscono su di essa e trasmetterli alla struttura portante (definita struttura primaria). Tutte le strutture di facciata, anche quelle non portanti, vanno considerate e dimensionate come strutture portanti secondarie, soggette alle seguenti sollecitazioni:

- carichi verticali: peso proprio, carichi straordinari (ad esempio schermature solari, piante, ponteggi provvisori);
- carichi accidentali (ad esempio persone), carico della neve e del ghiaccio, urti;
- carichi orizzontali: carico del vento (pressione e depressione sono in genere in rapporto di 8:5; nelle zone di bordo talvolta si riscontrano carichi di depressione sensibilmente più elevati);
- sollecitazioni prodotte da variazioni di volume per cause termiche o igrometriche.¹⁷

Coerentemente con la loro natura di rivestimento che racchiude lo spazio, i componenti piani sono l'elemento centrale di qualsiasi struttura di facciata: a seconda del tipo di struttura portante essi vengono sollecitati solo da carichi normali al loro piano di giacitura (trazione e/o compressione), o anche a flessione in direzione perpendicolare al piano. Agli elementi piani possono essere integrate o subordinate strutture portanti lineari come tiranti, irrigidimenti alla flessione, ecc...

Gli elementi piani e lineari funzionano come un'unità costruttiva (ad esempio travi a T, pannelli con controventamento a tiranti) o sono separati in alcuni punti per favorire la sostituzione e/o la manutenzione dei pannelli di tamponamento.

La parete vetrata deve essere progettata in modo da garantire dei minimi spostamenti e adeguamenti rispetto alla struttura portante e all'intelaiatura di supporto. Questo è possibile grazie all'uso di manicotti, attacchi fissi, attacchi scorrevoli.

I sistemi a 'montanti e traversi' rappresentano il sistema costruttivo più diffuso, caratterizzato da grandi elementi prefabbricati, premontati in fabbrica, che assicurano un controllo dell'assemblaggio e delle tolleranze superiore al tradizionale montaggio in cantiere, caratteristico delle facciate leggere.

PARETE PORTANTE: Soluzione costruttiva caratterizzata dalla presenza di un elemento portante appartenente all'intero edificio. Dalla NORMA UNI 8369-2:1987. Edilizia. Pareti perimetrali verticali. Classificazione e terminologia.

PARETE PORTATA: Soluzione costruttiva caratterizzata dall'assenza di un elemento o strato portante appartenente all'intero edificio. Dalla NORMA UNI 8369-2:1987. Edilizia. Pareti perimetrali verticali. Classificazione e terminologia.

I montanti¹⁸ sono collegati alla struttura portante mediante dispositivi di fissaggio che comprendono tre elementi:

- Un ancoraggio che forma il collegamento primario con la struttura portante;
- Un attacco metallico (acciaio o alluminio fuso), che può essere composto da più pezzi;
- Dei bulloni tra attacco (staffa) e montante.

I fissaggi possono essere posti sulla soletta (in corrispondenza del bordo) e sulla parte anteriore della soletta. Le tolleranze ammissibili della struttura portante sono compensate con la posa in opera di spessori, le cui dimensioni consentono la trasmissione delle forze di sollecitazione dell'attacco. Le regolazioni si ottengono con l'uso di fori ovalizzati.¹⁹

In genere i montanti sono fissati nella parte superiore e liberi in quella inferiore, la continuità tra le parti è assicurata da una giunzione con spezzoni di manicotto. È interessante ricordare che i profili di serraggio e di copertura sono interrotti in modo sfalsato in corrispondenza delle lunghezze dei montanti, garantendo tuttavia la continuità tra gli elementi con piastre di giunzione.

I traversi²⁰ sono collegati ai montanti in due modi:

- Mediante blocco di collegamento, in questo caso il sistema è reso stagno applicando un sigillante elastomerico del tipo a rifiuto oppure disponendo delle guarnizioni in gomma;
- Mediante penetrazione del montante, in cui la tenuta è garantita da un elemento in gomma interposto tra le due parti.

Dal punto di vista del funzionamento statico, i pannelli sono appesi alla struttura orizzontale, piuttosto che appoggiati, in modo tale da essere sollecitati, coerentemente alle caratteristiche del materiale, solamente a sforzi di trazione e di flessione, ma non di compressione.

Un elemento da valutare nella fase di progettazione di questi componenti di facciata trasparenti sono i sistemi di drenaggio dell'acqua, che devono garantire l'assenza di

Sicurezza	Benessere	Fruibilità	Aspetto	Gestione
Assenza di emissione di sostanze nocive	Controllo della condensazione interstiziale	Attrezzabilità	Regolarità delle finiture	Resistenza agli agenti aggressivi chimici
Reazione al fuoco	Controllo della condensazione superficiale		Controllo della regolarità geotermica	Resistenza agli attacchi biologici
Resistenza al fuoco	Controllo dell'inerzia termica			Resistenza al gelo
Resistenza meccanica	Isolamento termico			Resistenza ai carichi sospesi
Resistenza agli urti	Tenuta all'acqua			Resistenza agli urti degli strati superficiali
Resistenza al vento	Permeabilità all'aria			Resistenza a strappo degli strati superficiali
Limitazione delle temperature superficiali	Isolamento acustico ai rumori			Resistenza all'acqua

Tab. 3.7: La norma UNI 7959 definisce i requisiti che interessano le pareti verticali perimetrali verticali nel loro complesso, in cui sono compresi tutti gli strati funzionali, individuati in base alle classi di esigenza. Da FRANCO G., *L'involucro edilizio. Guida alla progettazione e manutenzione delle chiusure verticali portanti e portate*, EPC LIBRI, Roma, 2003

accumuli di liquido stagnante che potrebbero causare il danneggiamento anche strutturale del sistema.

Per ovviare a questo problema si adottano traversi stagni alle estremità che presentano dei fori in fondo alla battuta utilizzati per fare defluire l'eventuale acqua di accumulo e consentono di equilibrare le pressioni. Sistemi in cui il liquido defluisce attraverso le estremità del traverso attraverso dei montanti stagni (anche in questo caso sono comunque necessari dei fori lungo il montante per equilibrare le pressioni).

In presenza di qualsiasi altro grado di inclinazione rispetto alla verticale, in particolare nel caso di aggetti e arretramenti in superfici fortemente inclinate e di grande dimensione bisognerà prestare particolare attenzione alla progettazione di sistemi di drenaggio soprattutto prevedendo le problematiche si possono riscontrare in occasione di piogge o neviccate. In questo caso si dovrà avere particolare cura nella progettazione dei giunti, che se dovrebbero essere disposti parallelamente allo scorrimento delle acque meteoriche e di percolatura per evitare sollecitazioni dannose al loro funzionamento.

Particolare attenzione deve essere data alla progettazione delle forme di connessione dell'involucro con la struttura portante.

In generale, gli elementi di connessione devono:

- essere in grado di trasferire in maniera ottimale i carichi;
- garantire sufficiente gioco per facilitare le fasi di montaggio e per compensare le eventuali tolleranze di produzione;
- poter essere ispezionate e sostituite.

È importante stabilire, in fase di progettazione, precise gerarchie che definiscano quali siano gli elementi portati e quelli portanti più adatti a convogliare e trasmettere le sollecitazioni. Forme e modalità di fissaggio vengono poi definiti in funzione del materiale, della tipologia di prodotto e del numero di strati funzionali di cui il sistema involucro si compone.

In relazione alla soluzione costruttiva scelta in merito alla reazione ai carichi gravanti sull'involucro ed alla loro capacità di sopportare tali carichi con o senza l'ausilio di una struttura di sostegno principale possiamo distinguere tra:

- Sistemi di facciata Appesi, in cui gli elementi costruttivi devono essere calcolati per resistere a trazione e flessione;
- Sistemi di facciata Auto-portanti, in cui gli elementi costruttivi devono essere calcolati per resistere a compressione e flessione (e quindi anche a presso-flessione, con i conseguenti problemi di stabilità).

Nell'architettura contemporanea sono stati sviluppati numerosi progetti in cui si registra una totale integrazione tra involucro architettonico tecnologicamente avanzato e struttura esterna dell'edificio: il National Swimming Center di Pechino (Studio PTW),

CONCETTO	ESEMPIO
Sistema	Edificio
Sottosistema	Involucro: copertura, facciata, struttura portante, linee di alimentazione e di scarico, suddivisione interna, accessi
Componente	Anta della finestra nel telaio
Elemento	Profili, vetro isolante, accessori, tenute
Materiale	Lamiera, vetro

Tab. 3.8: Concetti fondamentali della classificazione dei sistemi di schermatura. Da HERZOG T., KRIPPNER R., LANG W., Atlante delle facciate, Utet, Torino, 2005

ad esempio, rappresenta un caso emblematico di perfetta sintesi tra “struttura” e “rivestimento”. Il concept progettuale trae spunto dalle ricerche matematiche sulle forme di aggregazione della materia allo stato schiumoso e utilizza come modulo costruttivo base un elemento reticolare metallico (in quattro varianti) con una particolare forma geometrica dodecaedrica non simmetrica (per uno spessore complessivo dell’involucro di 3,6 metri lungo il perimetro e di 7,2 metri al soffitto): l’intelaiatura metallica è stata poi rivestita esternamente da membrane in ETFE, che creano una sorta di “cuscino schiumoso”, filtro tra interno ed esterno. La facciata in questo caso è caratterizzata dall’uso dell’EFTE che tuttavia è utilizzato come materiale di riempimento delle due pelli interna ed esterna con camera d’aria interposta; l’involucro è quindi concepito come un sistema perfettamente integrato tra struttura, tamponamento ed impianto e garantisce di limitare notevolmente il fabbisogno energetico dell’edificio sportivo che racchiude al suo interno riducendo i consumi per il condizionamento e l’illuminazione naturale.

L’installazione dei singoli elementi dell’involucro può essere progettata seguendo due approcci differenti:

- Imponendo una successione pre-ordinata di azioni di montaggio e smontaggio.
- Prevedendo interventi puntuali estesi all’intera area dell’elemento tecnologico (si pensi ad una guarnizione, ad un profilo di chiusura, ecc.) ideati in modo da non coinvolgere altri componenti limitrofi.

Il secondo approccio è adatto a quegli elementi dell’involucro che richiedono (per via della facile usura o di altre necessità manutentive) interventi frequenti e meno specialistici.

I vantaggi del sistema prefabbricato, o “unit system”, consistono principalmente nell’ottimizzare i tempi di posa in opera, procedendo dal basso in alto di pari passo con l’elevazione delle strutture dell’edificio. Generalmente gli elementi modulari prefabbricati di facciata, chiamati “cellule”, non vengono issati al piano da costose

SOLLECITAZIONI DELL’ELEMENTO	SISTEMA PORTANTE
Solo compressione	Principio del peso proprio
Compressione e trazione	Struttura sagomata
Compressione ed eventuale trazione	Guscio
Solo trazione	Struttura pneumatica Struttura a membrana
Flessione e sollecitazione normale	
Flessione e compressione	Pannello appoggiato
Flessione e trazione	Pannello appeso

Tab. 3.9: Sollecitazioni negli elementi piani di facciata in corrispondenza dei carichi orizzontali e verticali. Da: HERZOG T., KRIPPNER R., LANG W., Atlante delle facciate, Utet, Torino, 2005

Umidità	Acque meteoriche/Acque di percolatura in facciata. Acqua assorbita capillarmente. Vapore acqueo/condensazione. Formazione di ghiaccio e neve
Pressione del vento	Protezione dall'aria e dal vento. Abbattimento della pressione/depressione. Bocchette di immissione/estrazione dell'aria
Suono	Suono estrinseco Suono intrinseco
Luce	Illuminazione. Materiali per giunti resistente ai raggi UV
Trasmissione delle sollecitazioni	Elemento - elemento. Sottostruttura elemento
Compensazione delle tolleranze	Tolleranza di produzione Tolleranza di montaggio Tolleranza di movimento
Montaggio	Regolabilità, fissaggio Sequenza Condizionamenti del tempo atmosferico
Manutenzione	Necessità Possibilità/Accessibilità
Smontaggio	Asportabilità Riciclaggio Possibilità di riutilizzo
Aspetto dei giunti	Sovrapposizione Fuga Sottosquadro Profilatura Variazione dei materiali Colore

Tab. 3.10: Aspetti da considerare nella realizzazione dei giunti. Da HERZOG T., KRIPPNER R., LANG W., Atlante delle facciate, Utet, Torino, 2005

gru ma sono posizionate agendo dall'interno, con speciali sistemi di sollevamento meccanici: non sono quindi necessari ponteggi provvisori e la semplicità del sistema consente di ridurre considerevolmente i tempi di permanenza in cantiere ed i fattori di rischio che ne derivano. L'impiego di sistemi di aggancio maschio-femmina tra gli elementi "cellula" (che non richiede quindi ulteriori sigillature in opera) elimina completamente le attività esposte all'esterno.

Altri vantaggi legati alla prefabbricazione degli elementi d'involucro sono i maggiori livelli di tenuta all'acqua ed all'aria, grazie al preventivo assemblaggio e controllo in officina; i moduli in facciata sono strutturalmente indipendenti e collegati tra loro con giunti telescopici tali da consentire nel montaggio maggiore tolleranza e minor dilatazione termica.

In questi sistemi la tenuta all'acqua non è solo di tipo 'passivo', basata sulla sigillatura dei giunti, ma anche di tipo "attivo", con giunti dotati di intercapedine d'aria in cui realizzare l'equalizzazione di pressione tra esterno ed interno, attraverso un innesto telescopico fornito di coprigiunto di continuità, che permette di convogliare l'acqua verso l'esterno.



Fig. 3.13: Homo Lumens, Lánchíd 19 hotel, Budapest. László Benczúr, Péter Sugár, László Kara. Si tratta di un progetto di ristrutturazione architettonica di questo vecchio edificio in cui i progettisti hanno scelto di realizzare questo sistema di facciata doppia pelle costituito da 150 lamelle verticali di vetro serigrafato, che attraverso un sistema di controllo garantiscono diverse conformazioni geometriche in relazione alle stagioni dell'anno, creando una buffer zone davanti alla facciata esistente della struttura alberghiera. La scelta tecnologica ha permesso di ridurre i tempi della messa in opera del nuovo sistema d'involucro e dell'intero cantiere di riqualificazione, concluso in sei mesi.

A questi vantaggi si affiancano dei fattori negativi dovuti all'osservanza di precauzioni nel trasporto, nello stoccaggio e nella movimentazione degli elementi prefabbricati, per non compromettere con urti, rotture o danneggiamenti la loro conformità dimensionale.

Nella fase di progettazione di dettaglio dell'involucro è necessario che siano realizzati specifici manuali tecnico operativi (nel caso dell'azienda Permasteelisa questi sono definiti come 'Site Activity Manual' per la realizzazione di curtain-wall) con lo scopo di definire le linee guida di gestione e controllo per la posa dell'involucro, descrivendo nel dettaglio principi e azioni di cantiere finalizzati ad una corretta gestione del processo, individuando ruoli e strumenti con cui operare per rispettare le attese della Committenza.

L'importanza della programmazione ha portato la tecnologia delle facciate a svilupparsi verso :

- Un alto grado di prefabbricazione
- Una notevole riduzione dei tempi di messa in opera sul cantiere.

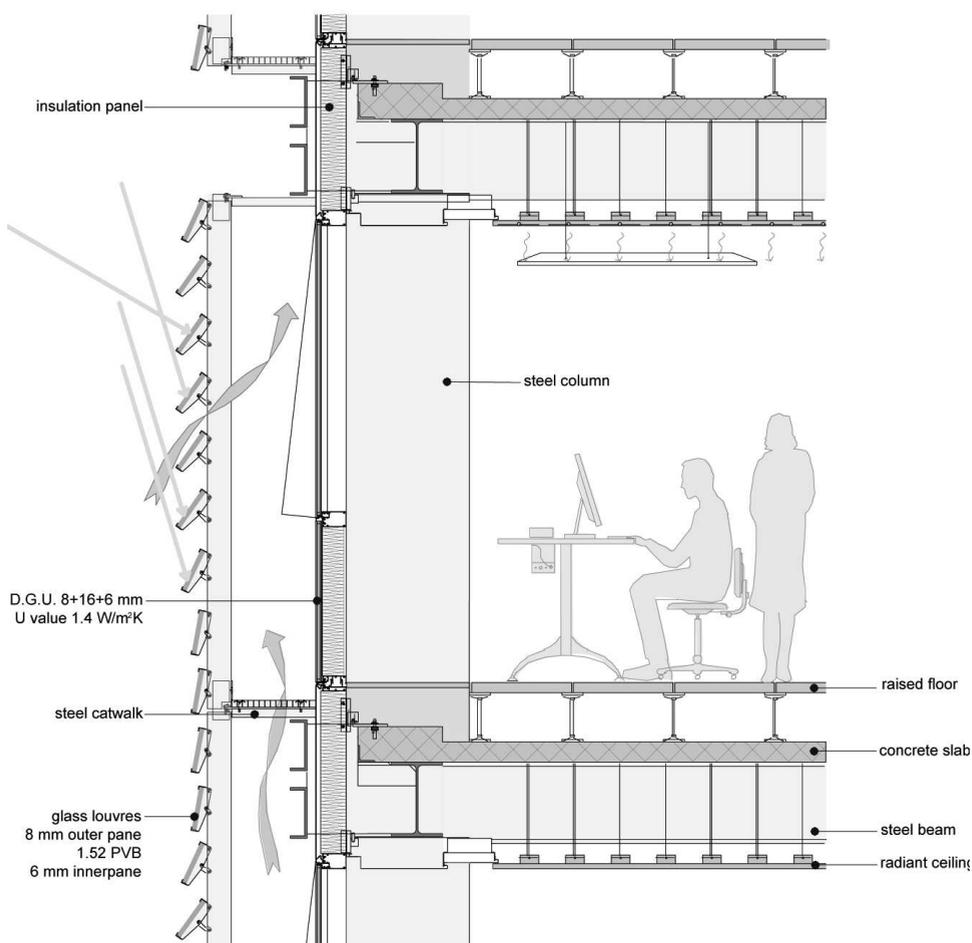


Fig. 3.14: SIEEB, Mario Cucinella, Beijing, 2006. Particolare della facciata orientata a sud con sistema di schermature orientabili.

3.4 La ventilazione naturale

L'architettura contemporanea fa un larghissimo uso, negli edifici del terziario, di facciate continue interamente vetrate. Tale soluzione, indubbiamente molto attraente dal punto di vista estetico e funzionale, presenta diverse criticità dal punto di vista energetico e del comfort. I componenti vetrati, infatti, hanno generalmente valori di trasmittanza termica notevolmente inferiori alle pareti opache, per cui possono causare un incremento inaccettabile delle dispersioni di calore in inverno, ad eccezione di quei casi in cui si adottino soluzioni con materiali innovativi quali TIM, PCM, vetri isolanti, ecc...La bassa resistenza termica comporta inoltre che la temperatura superficiale interna, nella stagione fredda, possa essere notevolmente inferiore rispetto alla temperatura dell'aria: come noto, questo fatto incide negativamente sulle condizioni di comfort ambientale, poiché diminuisce la temperatura operante e determina asimmetrie nello scambio termico radiativo tra superficie corporea e ambiente.

I componenti vetrati, proprio a causa della loro trasparenza, sono inoltre caratterizzati da apporti solari elevati. Questo fatto può talvolta costituire un'opportunità di risparmio energetico, in quanto l'apporto gratuito di energia solare diminuisce il fabbisogno termico di riscaldamento e l'apporto di luce naturale riduce la necessità di illuminazione artificiale, ma rappresenta anche un problema rispetto al comfort visivo (necessità di controllare l'abbagliamento causato dall'elevata luminanza di tali superfici) e al surriscaldamento in condizioni di forte irradiazione solare.

Per evitare i problemi sopra elencati, la tecnologia dei serramenti e delle facciate continue mette oggi a disposizione numerose soluzioni costruttive, alcune delle quali appartengono alla tipologia delle "facciate ventilate".



Fig. 3.15: Torre Agbar, Jean Nouvell, Barcellona, 2007. L'edificio è caratterizzato da un sistema di facciata doppia pelle in cui il layer esterno è stato realizzato come un brise-soleil in vetro con vari gradi di trasparenza. Il sistema a lamelle esterne regolabili garantisce la ventilazione naturale nell'intercapedine soprattutto nei mesi estivi quando la temperatura esterna è molto elevata.

Come abbiamo ricordato precedentemente, una facciata ventilata è un componente di involucro esterno, vetrato oppure opaco, dotato di un'intercapedine percorsa da aria in movimento. L'aria può provenire dall'esterno oppure dall'interno dell'edificio ed il suo movimento può essere puramente naturale oppure può essere attivato meccanicamente: in quest'ultimo caso la facciata ventilata viene in genere integrata funzionalmente con l'impianto di climatizzazione.

Il pacchetto tecnologico costituito da pelle esterna, pelle interna, intercapedine e relativi strati accessori rappresenta in sintesi un sistema di facciata multiplo, nel quale grande importanza ricoprono la velocità e il flusso dell'aria che si registrano all'interno della cavità. Questi due parametri dipendono da più fattori:

- Parametri costruttivi della cavità e delle aperture;
- La differenza di pressione causata del vento sulla pelle dell'edificio;
- La differenza di pressione derivante dall'effetto camino;
- La differenza di pressione dovuta a sistemi meccanici di aspirazione.

La ventilazione degli edifici deve essere assicurata indipendentemente dall'azione degli occupanti in relazione all'apertura più o meno frequente degli infissi, ai fini igienici (odori, muffe, ecc.) e della qualità dell'aria (I.A.Q.). Se in un involucro edilizio si praticano delle aperture ad altezze diverse, quando la temperatura interna è maggiore di quella esterna, nella zona superiore del vano si crea una pressione superiore, rispetto a quella esterna, che porta l'aria a fuoriuscire dalle aperture poste superiormente.

Nella zona inferiore del vano si crea invece una depressione rispetto all'esterno, che produce la penetrazione dell'aria esterna attraverso le aperture poste inferiormente. Se la temperatura interna è inferiore a quella esterna, la situazione risulta invertita e si avrà immissione di aria dalle aperture superiori e fuoriuscita da quelle inferiori.

La differenza di pressione fra le aperture crea, pertanto, un flusso d'aria, o tiraggio, che tende a riequilibrare la temperatura fra esterno ed interno.

In caso di vento, la circolazione dell'aria è molto più vorticosa, per l'aumento delle differenze di pressione, e l'azione del vento si somma a quella del tiraggio naturale. In assenza assoluta di vento, per ottenere una corrente attiva che generi una ventilazione naturale, è necessaria una differenza di temperatura fra interno ed esterno di almeno 18°C.

Dal punto di vista fisico, l'aumento di pressione dell'aria all'interno dell'intercapedine (P_s) può essere misurata in relazione all'altezza e corrisponde a:

$$P_s = P_o - \rho g y$$

Dove:

- P_o è la pressione ad una data altezza h_o ;
- ρ è la densità dell'aria (Kg/m³);
- g è l'accelerazione di gravità (m/s²);
- y è l'altezza misurata a partire da h_o ;

La variante verticale della pressione è data da:

$$dP/dy = \rho g = -\rho_o g T_o / T$$

Dove:

- T_o è la temperatura dell'aria di riferimento;
- T è la temperatura dell'aria;
- ρ_o è la densità dell'aria alla temperatura di riferimento T_o .

Pertanto, usando quest'ultima equazione, la differenza di pressione dovuta all'effetto camino tra due punti dell'intercapedine posti ad una distanza h misurata verticalmente vale:

$$P_s = \rho_o g T_o h (1/T_e - 1/T_i)$$

La ventilazione naturale è, quindi, più efficace durante la stagione estiva, poiché asporta la notevole energia calorica accumulata dalle superfici esposte all'irraggiamento solare e, comunque, è più intensa sulle parti dell'edificio più fortemente irradiate, ovvero esposte a sud, sud-est, sud-ovest.

La regolazione dei flussi d'aria attraverso l'involucro è gestita attraverso serrande manuali o motorizzate; in quest'ultimo caso il funzionamento del componente può essere legato alla presenza di un sistema di controllo informatico.

L'aria esterna entra nello spazio intermedio della facciata attraverso le bocchette di ventilazione, che sono solitamente più piccole, in dimensioni, della profondità del corridoio; affinché si generi un picco di velocità seguito da un corrispondente abbassamento di pressione all'interno dell'intercapedine.

In tal senso, al fine di migliorare il fenomeno di tiraggio all'interno dell'intercapedine, è necessario che l'area di apertura superiore del "camino" sia più grande di quella inferiore d'ingresso, secondo un rapporto mediamente di due a uno.

Il dimensionamento in larghezza dell'intercapedine può essere realizzato, conformemente alle modalità di impiego ed alle prestazioni volute, senza particolari vincoli dimensionali.

La distanza tra la facciata esterna ed interna dell'intercapedine può, pertanto, essere anche di dimensioni notevoli.

All'aumento dello spessore dell'intercapedine corrispondono teoricamente una diminuzione della temperatura dell'aria, tuttavia la differenza è talmente minima da risultare quasi del tutto trascurabile, rendendo ininfluyente tale dimensione in riferimento alla dinamica dei flussi.

In molte soluzioni di facciate a doppia pelle c'è bisogno di un forte abbassamento di pressione nelle vicinanze delle bocchette estrattive. L'accelerazione dell'aria che attraversa queste aperture non è sostanzialmente diversa da quella che si registra nelle vicinanze delle bocchette in entrata, anche se spesso sistemi deflettori quali tendine, griglie ed altro generano una riduzione di pressione interna e quindi un malfunzionamento del sistema. La diminuzione di pressione è anche spesso relazionata alla formazione di turbolenze, che riducono l'effettiva dimensione della bocchetta²¹. Per ovviare a questo problema sono usate, nelle vicinanze delle bocchette di espulsione, delle lamelle deflettrici in grado di smorzare la potenza delle turbolenze.

Dal punto di vista costruttivo le facciate doppie con ventilazione naturale, sono le meno impegnative ed anche le meno costose, in quanto non richiedono né un'alta ermeticità dei giunti di chiusura dell'involucro esterno, né l'integrazione nella facciata di costose valvole e sofisticati meccanismi di ventilazione.

La conformazione di una facciata doppia pelle trasparente caratterizzata da ventilazione naturale risulta essere la seguente:

- Facciata esterna di pannelli di vetro semplice monolitico o frangisole orientabili;
- Intercapedine delle dimensioni comprese tra i 50,00 e i 90,00 cm dove trovano alloggio anche i dispositivi di controllo solare;
- Facciata interna in vetro camera a telaio (si trovano soluzioni in cui la facciata interna è costituita da involucro opaco massivo e coibentato).

L'intercapedine ininterrotta per tutta l'altezza della costruzione comporta difficoltà di gestione della portata d'aria in relazione alla variabilità della pressione dell'aria e problematiche legate alla corretta ventilazione degli ambienti interni, dato il rischio di commistione fra l'aria espulsa dai locali inferiori e quella immessa in quelli superiori, in edifici plurifunzionali. Come abbiamo visto nel paragrafo precedente per evitare questi problemi è possibile compartimentare l'intercapedine a livello dei piani ed

assialmente a divisione delle singole unità funzionali, creando doppi canali. In questo caso si alternano cellule orizzontali, in corrispondenza di ogni interpiano, e dotate di dispositivi per l'immissione di aria esterna, con fasce a tutta altezza, caratterizzate da sistemi di immissione dell'aria esterna alla base, di espulsione di quella viziata alla sommità e di raccolta dell'aria espulsa dalle cellule adiacenti attraverso bocchette laterali.

3.5 Sistemi meccanici di ventilazione dell'intercapedine

Solitamente, i sistemi più semplici che garantiscono uno spostamento artificiale dell'aria all'interno dell'intercapedine sono delle ventole azionate attraverso l'energia elettrica. Il sistema ad aspirazione consiste in un insieme di ventilatori che si muovono in tempi e con potenza differenziati, che permettono di "aspirare" aria all'interno della buffer zone.

Il flusso d'aria che viene spinto all'interno può avere direzioni differenti; l'importante è che riesca a sviluppare la compressione dell'aria sulla parete dell'edificio e quindi determinare una condizione di pressione positiva all'esterno della pelle attraverso la creazione di moti convettivi che permettono di stemperare la superficie interessata dallo scambio termico.

Un determinato volume d'aria viene quindi immesso all'interno dell'intercapedine riportando una condizione di equilibrio tra interno ed esterno. Il fenomeno del "risucchio" d'aria è molto simile a quello che è possibile osservare quando si chiude o si apre velocemente una porta, anche se in questo caso l'effetto risulta esser così breve da venir percepito solo in maniera indiretta. In funzione della velocità dell'aria, si possono registrare noiosi fischi nelle vicinanze delle bocchette di aspirazione.



Fig. 3.16: Particolare di bocchetta di ventilazione da applicare all'interno dell'intercapedine

La ventilazione meccanica dell'intercapedine è facilmente controllabile e graduabile e, quindi, entro i limiti derivanti dalle caratteristiche dell'impianto e della sua taratura, è possibile variare con assoluta discrezionalità le prestazioni offerte dal sistema, in conformità alle sollecitazioni estreme e alle esigenze richieste dall'ambiente interno, ottimizzando le prestazioni fornite durante tutto l'arco della giornata e secondo il clima stagionale.

I sistemi di ventilazione meccanica maggiormente diffusi sono i ventilatori a potenza variabile, capaci di compensare le differenze di pressione all'interno dell'intercapedine e di generare moti convettivi per l'espulsione dell'aria.

Esistono molteplici tipologie di ventilatori installabili all'interno dei sistemi di facciata doppia pelle, i più diffusi in commercio sono gli assiali e i centrifughi, che si distinguono in relazione del tipo di pale ed alla direzione del flusso in uscita. Se devono servire un singolo ambiente, sono di dimensioni ridotte e sono provvisti di proprie griglie di protezione e supporti per l'ancoraggio; possono essere posizionati nella muratura, nei serramenti o nelle bocchette di aerazione. I ventilatori che si inseriscono nelle condutture necessitano di dimensioni e potenza maggiori poiché devono servire più ambienti contemporaneamente e vincere le forze di attrito distribuite lungo l'intero circuito. La procedura per il dimensionamento è analoga a quella che si usa nel condizionamento meccanico.

In edifici collocati in aree particolarmente inquinate, può essere necessario installare dei depuratori elettrostatici, si tratta di un sistema tecnologico costituito da due grandi piastre caricate con un'elevata differenza di potenziale elettrico (in modo simile ai condensatori); tale carica attira le particelle di polvere verso le piastre senza intralciare in alcun modo il flusso d'aria passante attraverso la bocchetta.

Si può raggiungere una resa ottimale dotando l'impianto di sensori che regolino automaticamente la funzione meccanica e l'apporto fornito in virtù della portata d'aria presente nell'intercapedine, della temperatura dell'aria o di particolari condizioni che si vogliono creare.

La circolazione dell'aria è costante per tutta l'altezza dell'intercapedine, evitando un inconveniente non del tutto trascurabile che si registra nei sistemi a circolazione naturale, costituito dalla diminuzione dell'intensità del flusso ascendente man mano che esso sale.

A questi aspetti positivi si contrappongono alcuni inconvenienti costituiti essenzialmente dalla totale dipendenza da un impianto di tipo meccanico, con tutti i possibili problemi derivanti: dal mancato funzionamento in assenza di energia elettrica,

Tipologia di facciata	Trasmissione luminosa	Fattore solare	Trasmittanza termica	Isolamento acustico
	τ_{vis}	SHGC ²	U-value (W/m ² K)	Rw (dB)
Passiva completamente vetrata (vetri selettivi)	0,50-0,60	0,30-0,40	2.0	32-36
A ventilazione naturale	0,60-0,70	0,10-0,20	1.4	38-44
Active Wall	0,60-0,70	0,15-0,25	1.0	38-44
Interactive Wall	0,60-0,70	0,10-0,20	1.3	38-44

Tab. 3.11: Performance globali indicative delle facciate. Da: COLOMBARI M., Permasteelisa Group

ad eventuali guasti, ai maggiori consumi energetici, con conseguente incremento di emissioni inquinanti in atmosfera, fino a giungere all'inconveniente maggiore, rappresentato dall'impossibilità di avere alcuna comunicazione diretta o indiretta fra l'intercapedine e l'ambiente interno.

La mancanza di finestre apribili può generare, come è risaputo, la cosiddetta "sindrome da edificio malato", tipica degli edifici completamente climatizzati, in cui non è possibile soddisfare il fabbisogno di aria fresca da parte degli utenti, creando in esse problemi non trascurabili di ordine sia psicologico sia fisico che, talvolta, possono assumere la rilevanza di vere e proprie patologie.

Adottando sistemi di ventilazione ibrida, che sfruttano l'azione sia della ventilazione naturale, sia di quella meccanica, si possono ottenere i risultati migliori. Questi sistemi, infatti, riescono a compendiare l'efficienza di entrambi, risultando estremamente efficienti.

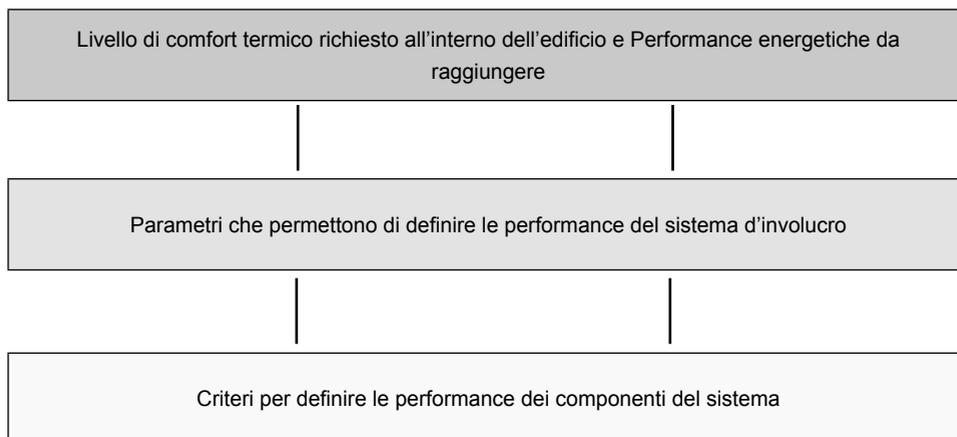
Quando la circolazione naturale dell'intercapedine diventa insufficiente, entra in funzione automaticamente, ad opera di appositi sensori, l'impianto di ventilazione, il quale ristabilisce una corretta intensità circolatoria dell'aria.

Accumulando il più possibile calore sulle pareti interne dell'intercapedine, attraverso la scelta di superfici trasparenti con alto valore di solare, caratterizzate, cioè, da un coefficiente di assorbimento molto alto, oltre ad incrementare la circolazione dell'aria nella stagione più calda, è possibile scaldare l'aria dell'intercapedine anche nella stagione invernale, per poi inviarla all'impianto di condizionamento interno, riuscendo ad ottenere, in tal modo, cospicui risparmi energetici e di gestione (pari al 60-70%).

L'aria riscaldata all'interno degli ambienti, inoltre, può essere nuovamente espulsa nell'intercapedine.

La comunicazione tra ambiente interno ed intercapedine avviene, in questo caso, soltanto tramite l'integrazione impiantistica, creando un flusso continuo intercapedine-impianto, impianto-intercapedine.

In estate l'aria che fluisce nell'intercapedine viene dispersa all'esterno, realizzando condizioni simili a quelle che si determinano con la ventilazione di tipo naturale.



Tab. 3.12: Individuazione delle fasi di analisi che caratterizzano il progetto e la valutazione delle performance energetiche di un sistema di Facciata Trasparente Doppia Pelle. Da: DOEBBER I., MCCLINTOCK M., Analysis Process For Designing Double Skin Facades And Associated Case Study, Proceedings of SimBuild 2006, held at MIT in Cambridge, Mass., August 2-4, 2006

Un ultimo schema di funzionamento, relativo alle caratteristiche di ventilazione dell'intercapedine tra i due involucri, frutto delle sperimentazioni più recenti e molto promettente dal punto di vista dei risultati, è quello cosiddetto a funzionamento integrato.

Il sistema prevede una relazione diretta fra ambiente interno e intercapedine: attraverso l'intercapedine viene espulsa l'aria di rifiuto dell'ambiente interno; ciò permette di controllare la temperatura superficiale del vetro interno e di diminuire le dispersioni termiche verso l'esterno, nonché la creazione di condense.

Inoltre la comunicazione diretta tra ambiente e intercapedine consente di ventilare naturalmente gli ambienti attraverso l'intercapedine stessa.

Generalmente in questi sistemi la circolazione dell'aria avviene tramite schemi di funzionamento misto: il flusso naturale può venire, cioè, incrementato, all'occorrenza, da un impianto meccanico che ne ottimizza il rendimento.

Le proprietà di isolamento della doppia partizione perimetrale che forma la camera d'aria, le cui superfici interagiscono in modo diretto a determinare le caratteristiche dei flussi, dipendono prevalentemente dalla posizione del vetro isolante, ovvero dalla particolarità che esso sia predisposto sulla frontiera esterna o su quella interna.

Nelle soluzioni in cui il vetro isolante è posto all'esterno l'intercapedine risulta essere ottimamente coibentata, la temperatura dell'aria in essa presente è più vicina a quella interna piuttosto che a quella esterna. Ne deriva una dinamica dei flussi ascensionali relativamente modesta che apporta un buon contributo soprattutto invernale, evitando l'insorgenza di fenomeni di condensa superficiale sulle vetrazioni interne. Questo avviene in virtù del fatto che la temperatura superficiale della vetratura interna è incrementata dalla circolazione dell'aria interna all'intercapedine, a temperatura sempre superiore rispetto a quella esterna.

Per ottimizzare il confort termico, soprattutto in estate, è necessaria una ventilazione di tipo meccanico e, nella maggioranza dei casi, onde evitare che lo scambio di temperatura fra l'aria contenuta nell'intercapedine e la superficie vetrata interna sia inefficace, è preferibile che l'altezza dell'intercapedine non superi quella dell'interpiano e, parimenti, che la larghezza stessa sia abbastanza contenuta.

La limitata altezza dell'intercapedine evita ogni problema concernente la sicurezza antincendio e l'incomunicabilità in senso verticale tra i diversi ambienti, unita alla presenza esterna del vetrocamera, contribuisce a garantire ottimi livelli di prestazioni acustiche.²²

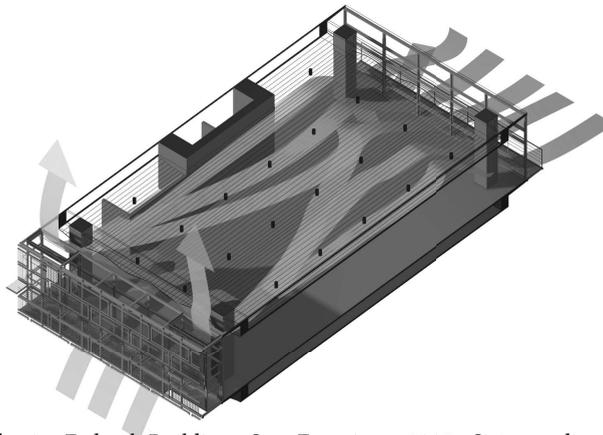


Fig. 3.17: Morphosis, Federal Building, San Francisco, 2007. Sistema di ventilazione naturale dell'edificio attraverso l'involucro.

3.6 Isolamento termico

La qualità tecnologica che meglio si coniuga con l'utilizzo della facciata doppia pelle è senza dubbio l'isolamento termico. Le prestazioni, in termini di contenimento dei consumi energetici, di questi elementi di chiusura verticale dovrebbero garantire la riduzione al ricorso ad impianti per la climatizzazione artificiale degli ambienti.

Una facciata doppia pelle riesce ad implementare le prestazioni termiche dell'edificio sia durante la stagione invernale che in quella estiva:

- in inverno ha la capacità di ridurre le perdite di calore e quindi incrementa il guadagno termico dell'edificio;
- in estate offre vantaggi al livello energetico grazie alla possibilità di ventilare l'intercapedine riuscendo a contenere i fenomeni di surriscaldamento relativi alla superficie trasparente interna. Durante questa stagione dell'anno, inoltre regolando il funzionamento delle aperture permette di effettuare ventilazione notturna, riducendo il carico energetico gravante sull'impianto di condizionamento durante il giorno.

Le performance termiche di una facciata doppia pelle sono definite dagli stessi parametri che si utilizzano per le superfici trasparenti:

- Coefficiente di trasmittanza termica (K); indica l'isolamento termico della facciata e permette di valutarne il comportamento nella stagione invernale.
- Coefficiente di trasmissione luminosa (tL); indica quanta luce solare arriva direttamente all'interno dell'ambiente costruito²³.
- Coefficiente di trasmissione d'energia totale (g); indica la parte di energia solare che giunge complessivamente all'interno dell'edificio e a differenza della trasmissione luminosa comprende anche la radiazione UV e ad infrarossi e l'emissione di calore della facciata verso l'ambiente interno. Tale coefficiente g è anche il parametro principale per lo studio dell'andamento delle temperature estive e permette di capire se la facciata scelta è in grado di proteggere gli ambienti interni dall'eccessivo irraggiamento estivo.

Prestazioni da garantire in una doppia pelle trasparente per incrementare l'efficienza energetica dell'edificio nei mesi INVERNALI: trasmittanza termica; ventilazione per evitare fenomeni di condensa; riscaldamento radiante in prossimità della superficie trasparente interna per evitare l'effetto parete fredda.

Prestazioni da garantire in una doppia pelle trasparente per incrementare l'efficienza energetica dell'edificio nei mesi ESTIVI: controllo della radiazione solare incidente (vetri assorbenti, schermature posizionamento e caratteristiche); ventilazione notturna.

Sistema di schermatura solare	Colore	Coefficiente di riduzione di energia (Fc)
Sistema di schermatura esterno	Chiaro	0,13-0,20
Sistema di schermatura esterno	Scuro	0,20-0,30
Sistema di schermatura interno	Chiaro	0,45-0,55
Vetro riflettente	-	0,20-0,55

Tab. 3.13: Coefficiente di riduzione di energia rispetto ad un sistema di schermatura interno ed esterno. Da: Eicker U., Fuxa V., Bauer U., Mei L., Infield D., Facades and summer performance of buildings, Energy and Buildings 40, 2008, 600-611

• Selettività (s) che é data dal rapporto tra coefficiente di trasmissione luminosa e coefficiente di trasmissione d'energia totale. Una selettività elevata indica che la facciata é in grado di fornire sia una protezione dal calore che un'elevata luminosità. Inoltre si devono valutare i seguenti parametri per definire il comportamento termico/fluidi della cavità del componente di facciata ventilato:

- Movimento d'aria della cavità
- Temperatura dell'aria

Questi due parametri descrivono bene come una Doppia Superficie Trasparente assorbe la radiazione solare durante i mesi estivi e come può contribuire alla ventilazione naturale degli spazi adiacenti.

Un altro importante parametro che influenza il benessere degli utenti e la temperatura interna del vetro. In accordo con ASHARE 55, la temperatura superficiale interna in un ambiente destinato ad attività sedentarie deve aggirarsi intorno a 5-10° F.²⁴

Anche nel caso dell'involucro trasparente si devono analizzare i fenomeni fisici di trasmissione del calore per:

- Conduzione; quando lo scambio di calore/energia avviene tra corpi solidi che si trovano a temperature differenti in contatto tra loro. In questo caso il calore viene scambiato generando un flusso termico che va dal corpo più caldo a quello più freddo; il fenomeno cessa quando entrambi i corpi raggiungono condizioni di equilibrio termico
- Convezione, che si registra quando abbiamo corpi allo stato fluido e gassoso che lambiscono una superficie a differente temperatura, scambiando con questa una determinata quantità di calore. Il fenomeno può essere naturale oppure forzato.
- Irraggiamento, che si basa sulla capacità di emettere radiazioni, proprio di ogni corpo caldo verso un corpo ad una temperatura inferiore.

Anche la pressione del vapore acqueo²⁵, deve essere valutata con attenzione nella fase di analisi delle prestazioni di un componente di facciata, poiché può provocare il formarsi di fenomeni di condensa sulle superfici vetrate con disagi per l'utenza. Per evitare il formarsi di vapore acqueo in corrispondenza della pelle interna è buona norma seguire i seguenti accorgimenti:

	U (W/m ² K)	Coefficiente Solare (SC)	g	Spessore (mm)	Trasmis- sione (%)	Riflessione (%)	Assorbi- mento (%)
Proprietà del vetro esterno							
Vetro pulito	5.6	0.85	0.87	10	73	7	20
Superficie colorata di verde	5.6	0.59	0.51	10	35	5	60
Vetro riflettente blu	5.6	0.27	0.42	10	21	12	67
Proprietà del vetro interno							
Vetro pulito	5.6	0.95	0.82	6	79	7	14
Vetro singolo							
Vetro pulito	5.6	0.95	0.82	6	79	7	14
Vetro riflettente	5.6	0.60	0.47	6	37	5	58

Tab. 3.14 : Caratteristiche dei vetri della superficie esterna di una facciata doppia pelle. Da: HAMZA N., Double versus single skin facades in hot arid areas, Energy and Buildings 40 (2008) 240–248

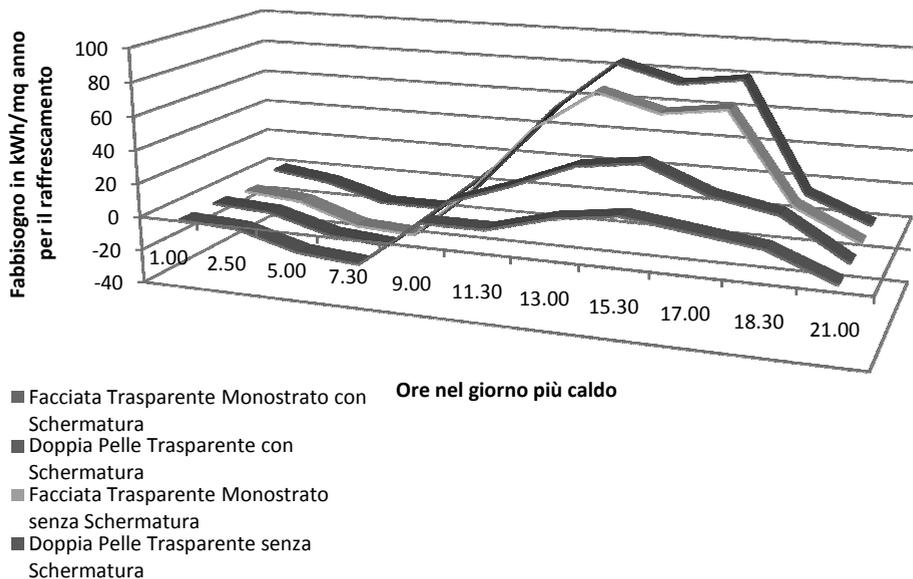


Fig. 3.18: Analisi del fabbisogno energetico per il raffrescamento un edificio per uffici a Stuttgart (sud Germania) in relazione al tipo di involucro trasparente scelto come tamponamento verticale evidenzia che si ha una riduzione dei consumi per la climatizzazione nel caso di facciata trasparente monostrato con schermatura esterna. DATI ELABORATI DA: EICKER U., FUXA V., BAUER U., MEI L., INFELD D., Facades and summer performance of buildings Buildings 40, 2008, 600–611

	Vetro singolo	Vetro singolo + schermatura esterna	Doppio vetro	Doppio vetro + sistema di schermatura nell'intercapedine
Fattore g	0,64	0,15	0,51	0,12
Trasmissione vetro interno	0,52	0,52	0,52	0,52
Trasmissione vetro esterno	-	-	0,80	0,80
Trasmissione totale	0,52	0,09	0,41	0,07
QI/G	0,12	0,06	0,10	0,05
Temperatura della superficie esterna (°C)	-	21,3	27,4	27,7
Temperatura del sistema di schermatura (°C)	-	-	-	30,3
Differenza tra la temperatura delle superfici (°C)	-	-	30,6	25,8
Temperatura superficiale interna	25,3	21,3	28,9	22,6
Temperatura dell'aria in ingresso (°C)	-	-	24,3	22,4
Temperatura dell'aria in uscita (°C)	-	-	28,4	26,8
Temperatura dell'intercapedine (°C)	20,6	19,9	24,0	21,0
Temperatura ambiente	19,6	21,9	22,9	21,4
Irraggiamento medio (W/mq)	430	535	451	464

Tab. 3.15: Analisi delle caratteristiche di trasmissione dell'energia di superfici trasparenti singole e doppie con o senza schermature. E' stata considerata una facciata in cui la superficie d'ingresso dell'aria è pari al 14% del totale della superficie trasparente.

- Per il clima europeo (temperato), la superficie interna deve garantire una tenuta al vapore superiore a quella esterna;
- Per le aree geografiche caratterizzate da clima caldo umido, al contrario, è la superficie esterna che deve avere una tenuta superiore a quella della superficie interna.

Poiché la radiazione solare è l'elemento che determina le prestazioni energetiche di grandi superfici vetrate, la progettazione di doppie pelli trasparenti non può prescindere dall'analisi dei fattori che permettono di descrivere e quantificare il suo contributo in termini di apporto energetico, è quindi sempre buona norma analizzare nel dettaglio l'irraggiamento sulla superficie trasparente in termini di W/m^2 ; irraggiamento determinato dalle caratteristiche geografiche del luogo e definito anche mediante il percorso e l'altezza sull'orizzonte del sole nei vari periodi dell'anno e nelle ore del giorno.

Come ricordato precedentemente l'analisi delle prestazioni in termini di isolamento termico di una doppia pelle trasparente può essere ricondotta ai vari periodi dell'anno, valutando attentamente le performance che si vogliono garantire nei mesi invernali ed in quelli estivi.

Nei sistemi a doppia pelle trasparente, durante i periodi freddi, la facciata esterna rappresenta un organismo capace di proteggere contro la pioggia e il vento l'involucro interno. La buffer zone tra le due superfici si trasforma in un sistema solare passivo, capace di trattenere l'energia termica, riducendo le perdite di calore dall'interno all'esterno dell'edificio. La possibilità di regolare l'aria in entrata all'interno dell'intercapedine, attraverso l'apertura e la chiusura delle bocchette di ventilazione, permette, con la chiusura di entrambe le aperture, di creare un'intercapedine isolata tra le due superfici e aumenta la resistenza termica dell'intero componente. All'interno di questo spazio, tuttavia, è necessario garantire, anche nella stagione invernale, un minimo ricambio d'aria attraverso l'apertura controllata delle bocchette, per evitare la formazione di condensa sul vetro esterno, che si trova sempre ad una temperatura superficiale più bassa di quella dell'aria dell'intercapedine. La condensa, oltre ad alterare le prestazioni della facciata, crea una condizione di discomfort anche per l'utente dell'edificio in quanto ne limita la visibilità verso l'esterno.

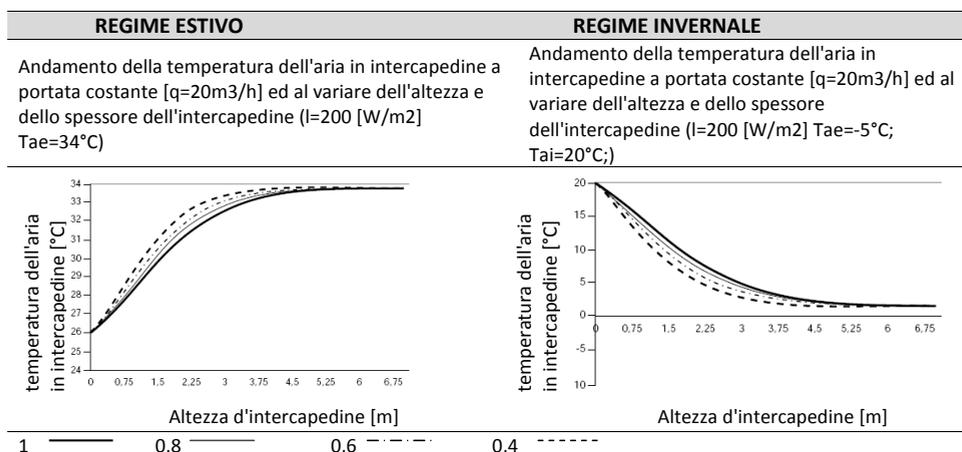


Fig. 3.19: Influenza dello spessore dell'intercapedine nelle prestazioni di un componente di facciata doppia pelle trasparente. Da: ALIOTTI E., BIANCHI L., RIGONE P., Le facciate a doppia pelle, Quad-
ra tecnica 8/98

Per ottimizzare l'isolamento termico della facciata è necessario agire sull'insieme dei telai, delle detrazioni e delle zone non trasparenti adottando vari accorgimenti per ridurre la conduzione termica, la convezione e lo scambio di radiazioni a onde lunghe. A questo scopo si impiegano strutture a telaio più o meno isolate, materiali isolanti non trasparenti/traslucidi o lastre di vetro isolante trasparenti/traslucide con strato di gas isolante interposto e/o rivestimento superficiale. I punti deboli termici caratteristici si trovano in corrispondenza dei giunti, del collegamento perimetrale dei vetri e dei pannelli e in prossimità dei sistemi di fissaggio, e sono dovuti a ponti termici lineari o puntiformi e/o a scarsa tenuta.

Particolarmente critici si rilevano nella pratica gli angoli esterni e interni orizzontali e verticali, gli aggetti degli strati di isolamento o di tenuta, in particolare nei punti di transizione tra diverse tipologie e strutture di facciata. I ponti termici sono di norma un punto debole anche per quanto riguarda l'umidità, poiché quando si trovano lungo le superfici perimetrali e talvolta all'interno delle facciate producono un rischio elevato di condensa. Lo stesso accade in corrispondenza di particolari di facciata nei quali lo sviluppo della superficie interna è minore rispetto a quella esterna, ad esempio nel caso di angoli esterni di ampiezza ridotta o di profili collocati all'esterno che si comportano come vere e proprie alette di raffreddamento.

In questa stagione dell'anno si deve avere inoltre cura di evitare che la temperatura della superficie trasparente interna risulta inferiore a quella dell'ambiente interno; numerosi studi condotti in questi anni hanno infatti dimostrato che un abbassamento localizzato della temperatura di parete determina condizioni di malessere generalizzato, di gran lunga superiori all'abbassamento di qualche grado della temperatura dell'aria all'interno di un ambiente. Questo significa che il corpo umano reagisce meglio in un ambiente a temperatura interna più bassa ma con una temperatura di parete costante e relativamente alta.

Per evitare questo fenomeno sarà cura del progettista realizzare superfici interne con doppi vetri baso emissivi e profilati di sostegno in alluminio a taglio termico e prevedere

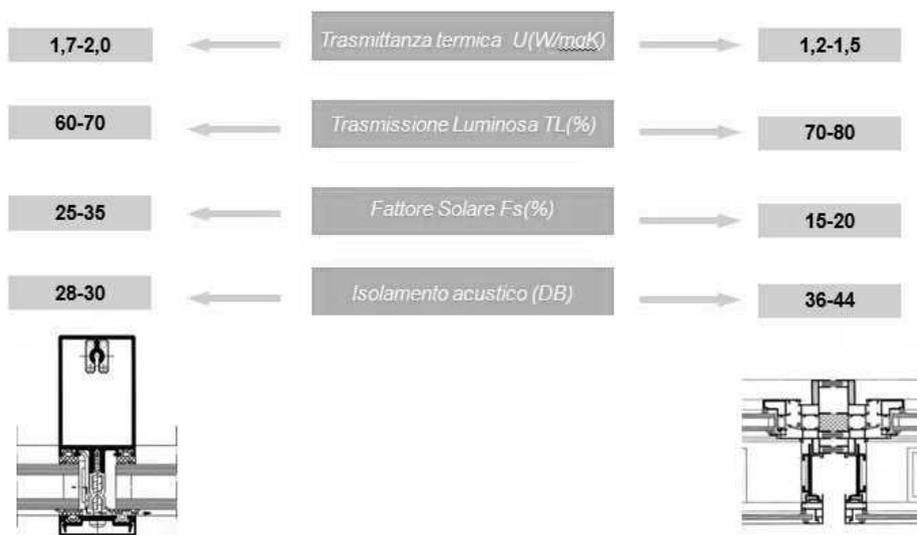


Fig. 3.20: Confronto delle prestazioni tra una facciata standard ed una facciata doppia pelle. Il valore di trasmittanza è riferito alle caratteristiche della facciata interna e non al sistema tecnologico complessivo.

impianti di riscaldamento con terminali di erogazione del calore collocati in prossimità della superficie disperdente, quali sistemi radianti a pavimento, serpentine radianti o scambiatori di calore con bocchette di ventilazione alloggiati nei controsoffitti. L'aria calda che si crea all'interno dell'intercapedine può inoltre essere convogliata in scambiatori di calore posti in prossimità della facciata che la utilizzano per riscaldare l'aria utilizzata per la ventilazione meccanica degli ambienti, riducendo il fabbisogno energetico dell'edificio.

In estate bisognerà invece ridurre la trasmissione termica verso l'interno attraverso l'adozione di opportuni sistemi di schermatura. Solitamente le schermature sono collocate all'interno della buffer zone, anche se la posizione migliore rimane sempre quella all'esterno della superficie trasparente esterna, poiché solo in questo modo si riescono ad evitare fenomeni di surriscaldamento dell'intercapedine dovuti alla riflessione della luce al suo interno, con conseguente incremento dell'effetto serra.

Un sistema di ombreggiamento collocato in modo casuale all'interno dello spazio tampone può inoltre ostacolare la ventilazione di questo volume proprio nei mesi in cui tale fenomeno è necessario per ridurre il carico termico verso la superficie interna, per questo bisogna avere cura di collare le schermature solari non troppo vicine alla pelle interna ed in posizione decentrata rispetto alle bocchette per la ventilazione orizzontale, e sceglierle di colori chiari per incrementare la riflessione della radiazione solare verso l'esterno.

Anche la dimensione dell'intercapedine può incidere positivamente o negativamente sulle performance del componente di facciata nei vari periodi dell'anno, la sua profondità può influenzare la temperatura dell'aria e di conseguenza i moti ascensionali che si creano al suo interno. Numerose ricerche hanno, infatti, dimostrato che a parità di portata d'aria e di sollecitazioni esterne, nella stagione estiva (temperatura aria interna=26°C; Irraggiamento=350 W/m²°C; portata d'aria=20 m³/h), all'aumentare dello spessore dell'intercapedine si ha una diminuzione della temperatura dell'aria nell'intercapedine. Tuttavia la differenza tra le diverse configurazioni è limitata, dato che ad un metro di altezza dell'intercapedine si ha una differenza delle temperature del flusso di solo 1,01°C, mentre a 3 metri è di 0,78° C e quindi del tutto trascurabile. A portata costante, lo spessore dell'intercapedine ha un'influenza limitata per quanto riguarda la velocità con cui l'aria all'interno dell'intercapedine raggiunge la temperatura di equilibrio.

In regime invernale (temperatura aria interna=20°C; Irraggiamento=200 W/m²°C; portata d'aria=20 m³/h) si ha invece un aumento della temperatura dell'aria nell'intercapedine, con conseguente incremento della trasmittanza termica dell'intera facciata.

Alcune ricerche condotte nell'ultimo decennio²⁶ sostengono che l'adozione di doppie pelli trasparenti caratterizzate da ventilazione meccanica dell'intercapedine e dall'uso di vetri riflettenti per la pelle esterna, in climi caldi e caldo-umidi, contribuiscono a ridurre il fabbisogno energetico per il raffrescamento, poiché l'aria all'interno della buffer zone serve a ridurre la temperatura della superficie trasparente interna. Altri studi (OESTERLE²⁷, HAMZA²⁸, etc...) sottolineano tuttavia come avere una doppia facciata trasparente non riduca eccessivamente il fabbisogno energetico per il raffrescamento in aree geografiche con temperature estive molto elevate, se non in quei casi in cui si adottano opportuni sistemi di schermatura esterna o si scelgono superfici vetrate trattate con pellicole assorbenti e riflettenti che riducono il carico termico nell'intercapedine.

La temperatura della superficie interna risulta essere la stessa sia in una facciata a vetro singolo che in una a doppia pelle; in relazione alle caratteristiche della schermatura solare interposta o del tipo di vetro adottato, il fabbisogno energetico per il raffrescamento risulta essere addirittura superiore nei sistemi a doppia pelle.

In aree geografiche caratterizzate da clima temperato o caldo, è consigliabile quindi adottare sistemi di facciata trasparente che garantiscano la possibilità di muovere la superficie trasparente esterna, aprendo totalmente l'intercapedine, e sovrapponendo alla superficie interna un sistema di schermatura regolabile, al fine di poter controllare l'irraggiamento e conseguentemente il carico termico che grava sull'involucro dell'edificio, riducendo i consumi per la climatizzazione estiva.

Durante l'estate inoltre, una facciata doppia pelle dà la possibilità di sviluppare una ventilazione trasversale notturna anche quando le condizioni atmosferiche esterne sono relativamente sfavorevoli. Questa ventilazione, riducendo anche di poco la temperatura degli ambienti confinati, evita l'accensione dell'impianto di climatizzazione durante la notte. Dati sperimentali rivelano, infatti, che, nonostante nel periodo notturno l'edificio rimanga deserto, la sospensione del funzionamento impiantistico crea condizioni di discomfort la mattina seguente. E' preferibile quindi diminuire la temperatura interna sfruttando un fenomeno naturale invece che azionare impianti meccanici a consumo energetico.

Altre strategie per incrementare l'efficienza energetica dei sistemi di chiusura trasparente nei mesi estivi sono quelle di seguito elencate:

- Trasformare in elementi di accumulo termico i confini interni degli ambienti, quali solai e pareti, al fine di immagazzinare l'energia solare incidente durante le ore diurne per rilasciarla nelle ore notturne abbassando il fabbisogno energetico per il riscaldamento;



Messa in opera della struttura di supporto



Installazione della pelle interna



Montanti e traversi della pelle esterna



Montanti e traversi della pelle esterna



Struttura di supporto alla facciata vista interna



Messa in opera della seconda pelle

Fig. 3.21: Cambridge Public Library, William Rawn Associates, Architects, Inc., Cambridge, 2009.

- Utilizzare sistemi di deumidificazione naturale dell'aria in entrata nell'intercapedine, come delle vasche d'acqua collocate in prossimità delle bocchette d'ingresso dell'aria;
- Integrare in facciata tecnologie finalizzate alla trasformazione dell'energia solare in energia elettrica (pannelli fotovoltaici) ed energia termica (pannelli solari termici).

3.6.1 Normativa tecnica di riferimento

Gli elementi di involucro verticale trasparente doppia pelle devono soddisfare le seguenti caratteristiche ambientali e tecnologiche:

- Requisiti ambientali:
 1. Mantenimento della temperatura dell'aria negli spazi abitativi nelle stagioni di esercizio degli impianti di riscaldamento entro i limiti di legge di 20 – 22 °C ;
 2. Mantenimento delle condizioni di comfort termico negli ambienti interni nel periodo estivo.
- Requisiti tecnologici:
 1. Controllo dei fenomeni di condensa superficiale e interstiziale;
 2. Controllo della combinazione “Temperatura – Umidità – Ventilazione”;
 3. Resistenza termica e inerzia termica ai fini del risparmio energetico e del comfort ambientale interno.

Le prestazioni termo-igrometriche dell'involucro edilizio trasparente sono normate in Italia attraverso la legislazione nazionale e la normativa tecnica di riferimento (norme UNI e ISO).

In merito alla legislazione nazionale si fa riferimento al DLgs 195/2005 (emanato a seguito della direttiva europea 2002/91/CE Energy Performance Directive in Building) e successive integrazioni e modifiche:

Zona climatica	Dal 1° gennaio 2006 U (W/mqK)	Dal 1° gennaio 2008 U (W/mqK)	Dal 1° gennaio 2011 U (W/mqK)
A	5,0	4,5	3,7
B	4,0	3,4	2,7
C	3,0	2,3	2,1
D	2,6	2,1	1,9
E	2,4	1,9	1,7
F	2,3	1,7	1,3

Tab. 3.16: dal DPR 59/2009, tab. 4b. Valori limite di trasmittanza centrale termica U dei vetri espressa in W/m2K

Zona climatica	Dal 1° gennaio 2006 U (W/mqK)	Dal 1° gennaio 2008 U (W/mqK)	Dal 1° gennaio 2011 U (W/mqK)
A	5,5	5,0	4,6
B	4,0	3,6	3,0
C	3,3	3,0	2,6
D	3,1	2,8	2,4
E	2,8	2,4	2,2
F	2,4	2,2	2,0

Tab. 3.17: dal DPR 59/2009, tab. 4b. Valori limite di trasmittanza termica U delle chiusure trasparenti comprensive degli infissi espressa in W/m2K

- DLgs 311/2006
- DPR 59/2009
- DM 26/06/2009, Linee guida per la certificazione energetica

Nei provvedimenti normativi emanati dal 1995 ad oggi il significato e il ruolo dell'involucro edilizio sono stati sottolineati quali elemento chiave per l'architettura sostenibile, orientata alla riduzione dei consumi energetici, alla diminuzione delle emissioni di gas nocivi e alla massimizzazione dell'efficienza ecologica ed ambientale. Il decreto DLgs 192/2005 stabiliva i criteri, le condizioni e le modalità per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici al fine di favorire lo sviluppo, la valorizzazione e l'integrazione delle fonti rinnovabili, contribuire a conseguire gli obiettivi nazionali di limitazione delle emissioni di gas a effetto serra posti dal protocollo di Kyoto, promuovere la competitività dei comparti più avanzati attraverso lo sviluppo tecnologico.

La normativa italiana favorisce soluzioni d'involucro massive, in quanto prescrive che nei casi in cui l'irradianza sul piano orizzontale (esclusa la zona climatica F) sia $\geq 290\text{W/mq}$, la massa superficiale (Ms) delle pareti opache verticali, orizzontali ed inclinate debba essere maggiore o uguale a 230 kg/mq .

Il DLgs 192/2005 così come integrato dal 311/2006 stabilisce le prestazioni che devono essere rispettate dai componenti trasparenti degli edifici, indicando le modalità per il controllo tecnico delle soluzioni di chiusura al fine di contenere le dispersioni termiche e favorire buone condizioni di comfort ambientale, fornendo per altro specifiche soluzioni per le superfici vetrate.

La normativa italiana, infatti, indica limiti e prestazioni delle chiusure trasparenti (solo vetri e vetri più infissi)²⁹, ma non definisce prestazioni specifiche per i componenti di facciata trasparente doppia pelle, per i quali attualmente non esiste nessuna norma di prodotto specifica né l'obbligo di Marcatura CE.

Con il recente DPR 59/2009, che indica nuove modalità di calcolo per il fabbisogno energetico dell'edificio dipendenti anche dai consumi per il condizionamento estivo, sono finalmente introdotte anche a livello normativo delle indicazioni prescrittive per limitare l'apporto solare negativo che si può avere alle nostre latitudini attraverso le superfici trasparenti. Gli elementi a cui il Decreto Attuativo fa riferimento sono:

- le schermature solari; in particolare si stabilisce che gli edifici realizzati ex novo o quelli oggetto di ristrutturazione (ad eccezione degli edifici destinati ad attività industriali o ad attività sportive), debbano essere dotati di schermature solari per parti vetrate definendo il rapporto tra schermature e superfici vetrate (normativa

Normativa tecnica:

- prEN 13947
- UNI EN ISO 6946
- UNI EN ISO 10077-1
- UNI EN ISO 10077-2
- UNI EN 12412-2
- EN ISO 12567-1
- UNI EN 673
- UNI EN 674
- UNI EN 675
- UNI EN 13363-1
- UNI EN 13363-1

Mancano indicazioni specifiche per le doppie pelli trasparenti

tecnica di calcolo UNI EN 13363.01). Su questo punto la normativa consente di collocare indifferentemente i frangisole all'esterno o all'interno dell'elemento vetrato, omettendo che solo le schermature poste all'esterno evitano l'eccesso di carico termico bloccando la radiazione solare prima che attraversi il vetro.

- le pellicole assorbenti, che devono essere utilizzate, ove non sia possibile installare schermature esterne, vetri dotati di pellicole capaci di ridurre il fattore solare delle superfici trasparenti a valori uguali o minori a 0,50 (UNI 410).³⁰

In merito alle modalità di calcolo delle prestazioni energetiche di componenti trasparenti la legislazione nazionale indica le norme UNI come strumenti di valutazione da adottare per i componenti costituenti il serramento.

Le norme UNI a cui si può attingere per il computo delle performance termigrometriche di facciate ventilate trasparenti sono le seguenti:

- Facciate continue
 - Pr EN 13947 – Appendice D riguardante il metodo di calcolo semplificato per la valutazione della trasmittanza termica delle facciate continue. Se in uno stesso serramento sono presenti tamponamenti trasparenti in combinazione con pannelli opachi, nella formula di calcolo sono inseriti valori descrittivi inerenti i pannelli; invece per i serramenti doppi (Uwd costituiti cioè da telai fissi separati), entra in gioco la resistenza termica superficiale interna per il serramento esterno, ed esterna per quello interno, nonché dello spazio compreso fra le detrazioni. Stesso caso per i serramenti accoppiati (caratterizzati cioè dalla presenza di un telaio fisso unico).
 - UNI EN ISO 6946 Componenti ed elementi per edilizia – Resistenza termica e trasmittanza termica – Metodo di calcolo
- Telai metallici:
 - Calcolo agli elementi finiti secondo la UNI EN ISO 10077-2;
 - Prova in laboratorio per il calcolo della trasmittanza termica in camera calda secondo la metodologia descritta dalla norma UNI EN 12412-2;
 - Metodo semplificato per il calcolo della trasmittanza termica contenuto nella UNI EN ISO 10077-1. In questo caso la stima della trasmittanza termica U_w dei serramenti nel loro complesso (telaio e vetratura) tiene conto della trasmittanza termica di entrambi i componenti e, in caso di vetrocamera, anche di quella del distanziatore tra le due lastre, secondo una formula data dal rapporto tra la somma dei prodotti delle vetrate e dei telai per le rispettive trasmittanze, del perimetro vetrato per la sua trasmittanza lineare dovuta alla presenza del distanziatore, e la somma delle aree complessive, il tutto espresso in W/m^2K .
- Vetrature:

Normativa nazionale di riferimento:

- DLgs 192/2005
- DLgs 311/2006
- DPR 59/2009
- DM 26/06/2009, Linee guida per la certificazione energetica.

Definiscono la trasmittanza termica limite per chiusure trasparenti comprensive di infissi e per le sole parti vetrate.

Obbligano all'uso di schermature solari e pellicole ad assorbimento solare.

Mancano indicazioni specifiche per le doppie pelli trasparenti

- Prova in laboratorio in camera calda secondo le metodologie descritte dalle norme UNI EN 674 e 675;
- Metodo semplificato descritto dalle norme UNI EN ISO 10077-1 e UNI EN 673;
- Serramenti completi (telaio + vetrate):
 - Prova in laboratorio in camera calda secondo la metodologia descritta dalla norma EN ISO 12567-1;
 - Metodo semplificato ai sensi UNI EN ISO 10077-1.
- Schermature
 - UNI EN 13363-1:2004 Dispositivi di protezione solare in combinazione con vetrate - Calcolo della trasmittanza solare e luminosa - Parte 1: Metodo semplificato;
 - UNI EN 13363-2:2006 Dispositivi di protezione solare in combinazione con vetrate - Calcolo della trasmittanza solare e luminosa - Parte 2: Metodo di calcolo dettagliato.

Non rilevando attualmente una normativa di riferimento per il calcolo delle prestazioni termo-igrometriche delle doppie pelli trasparenti è buona norma richiamare le norme tecniche relative all'analisi delle facciate continue e degli infissi trasparenti, rispetto ai quali come abbiamo visto precedentemente, esistono metodologie di calcolo semplificato in merito alle prestazioni dei singoli componenti che li costituiscono (telai, vetri e schermature).

Attualmente i produttori di facciate trasparenti verificano le prestazioni termiche della pelle interna, assimilata ad una facciata continua, in merito ai requisiti indicati dalla normativa italiana con la conseguenza che non è facilmente valutabile il contributo dato dalla pelle esterna nei mesi invernali o l'incidenza in termini di guadagni solari passivi che questa può avere nei mesi estivi. Per valutare realmente le prestazioni di una doppia pelle trasparente è buona norma ricorrere a software di valutazione della prestazione termica in regime dinamico o a strumenti di simulazione fluido dinamica che permettono di valutare la temperatura e la velocità dell'aria all'interno dell'intercapedine nei vari periodi dell'anno.

In mancanza di questi strumenti complessi si può comunque procedere attraverso un calcolo semplificato che riprende le indicazioni delle norme UNI in materia di prestazioni termo-igrotermiche delle facciate continue e serramenti come indicato di seguito.

In merito alle prestazioni dei telai, le norme: UNI EN ISO 10077-2, UNI EN 12412-2 e UNI EN ISO 10077-1; indicano le modalità di calcolo (non applicabile a telai di serramenti scorrevoli), della trasmittanza termica, definita U_f :

$$U_f = 1 / (R_{si} A_{fi} / A_{di} + R_f + R_{se} A_{fe} / A_{de})$$

Dove:

A_{fi} = Area interna proiettata del telaio

RESISTENZA E DILATAZIONE TERMICA DEI MATERIALI

Ricordando che l'alluminio è uno dei metalli avente i valori di conduttività termica λ tra i più alti, cioè 220 W/mK, secondo solo all'argento e al rame, (almeno tra quelli più comunemente usati nel settore edilizio), è bene tenere presente tale fenomeno quando si progettano oggetti edilizi costituiti da elementi aventi diversi coefficienti di dilatazione, onde evitare l'eventuale insorgenza di sforzi meccanici.

A_{di} = Area interna sviluppata del telaio

A_{fe} = Area esterna proiettata del telaio

A_{de} = Area esterna sviluppata del telaio

R_{si} = resistenza superficiale interna del telaio

R_{se} = resistenza superficiale esterna del telaio

R_f = resistenza termica del telaio

La resistenza termica R_f è uguale a 0 per i telai metallici interi (non isolati), mentre per i telai a taglio termico dipende dalla conduttività termica e dalle larghezze del materiale costituente il ponte termico, che ne costituiscono le limitazioni; infatti la conduttività (λ) espressa in W/mK del materiale del taglio termico deve essere compresa tra i valori 0,2 e 0,3, mentre le caratteristiche dimensionali devono rispettare la condizione che la somma delle larghezze di tali “barrette” (b_1 - b_4) deve essere inferiore o uguale ad un quinto della larghezza del telaio (b_f).

I valori della resistenza R_f espressa in m^2K/W si ricavano dal diagramma di figura 4.4, dove l'asse delle ascisse rappresenta la più piccola distanza tra le parti metalliche (in mm) mentre l'asse delle ordinate la resistenza termica del telaio a taglio termico.

Per stimare la trasmittanza termica U_g delle vetrate, è possibile eseguire delle prove in laboratorio secondo le metodologie riportate nelle norme UNI EN 674 e UNI EN 675.

In assenza però di misure sperimentali, le norme UNI EN ISO 10077-1 e UNI EN 67 propongono una formula di calcolo che stima in termini semplificativi la trasmittanza termica sia per le vetrate costituite da lastre singole che per quelle costituite da più lastre (vetricamera): tale formula prende in considerazione le resistenze termiche superficiali delle vetrate esterne-interne, dell'intercapedine, gli spessori delle lastre, il loro numero, la conduttività termica.

Le resistenze tengono conto anche dell'emissività delle superfici vetrate, intesa come il rapporto tra la radiazione emessa dalla superficie stessa e quella che emetterebbe un corpo nero.

E' inoltre possibile considerare per i serramenti una resistenza termica aggiuntiva che tiene conto della presenza di schermi esterni (tapparelle, persiane, ecc.) e della permeabilità all'aria del serramento stesso: si esprime cioè la prestazione termica dei serramenti a schermi chiusi tramite la cosiddetta trasmittanza termica notturna U_{ws} .

VERIFICA DELLA CONDENZA SUPERFICIALE

In un edificio a Firenze (temperatura esterna di progetto $t_e = 0^\circ C$) in cui si ipotizzi che vengano mantenuti costanti la temperatura a $20^\circ C$ e l'umidità relativa al 70%, che è un valore piuttosto alto, la temperatura delle superfici interne delle pareti perimetrali deve risultare maggiore della temperatura di rugiada di $14,4^\circ C$ affinché non si verifichi condensa.

Per soddisfare tale limite, la trasmittanza termica del telaio metallico e della vetratura di un serramento, non dovrà superare rispettivamente il valore di $1,7 W/m^2K$ e di $1,8$.

Infatti, per il Telaio metallico (superficie opaca rivolta verso l'ambiente interno con $h_i = 7,7 W/m^2K$), si ottiene una trasmittanza pari a $1,7$, valore che può essere ottenuto usando profilati in alluminio a taglio termico, mentre per telai non isolati, che raggiungono una trasmittanza di $7 W/m^2K$, si innescerebbe il fenomeno condensativi poiché la temperatura superficiale risulterebbe di gran lunga inferiore a quella di rugiada.

Per quanto riguarda la vetratura ($h_i = 8 W/m^2K$), essa raggiunge una trasmittanza termica di $1,8 W/m^2K$, valori posseduti da vetrocamera 4-12-4 con lastre basso emissive e intercapedine riempita d'argon, oppure 4-15-4 e intercapedine con aria.

Ad esempio, nel caso di tende interne o esterne la resistenza termica può essere considerata nulla.

La permeabilità all'aria è, invece, definita in funzione delle distanze laterali tra lo schermo ed il vano, che rappresenta lo spazio totale effettivo ai bordi tra la chiusura e il suo contorno.

La trasmittanza termica notturna dei serramenti assume importanza nella valutazione dell'energia termica mensile U_m scambiata dall'involucro, il cui valore finale risulta mediato sulla variazione della trasmittanza termica dei serramenti nel tempo (periodo diurno e notturno) secondo una relazione che tiene conto appunto della trasmittanza termica nei periodi diurno e notturno, a schermi aperti nel primo caso e chiusi nel secondo.

Esistono anche altri parametri legati al comportamento termico dei materiali e alla trasmissione del calore, fra tutti la resistenza termica R , intesa come l'opposizione esercitata da un corpo a lasciarsi attraversare dal calore, espressa in m^2K/W oppure $m^2h^\circ C/Kcal$, essendo l'inverso della trasmittanza termica [$R=1/U$].

Un altro parametro importante è la dilatazione termica, fenomeno che consiste nella variazione delle dimensioni di un corpo conseguente ad una variazione di temperatura. Si possono distinguere in natura tre tipi di dilatazione termica: quella che riguarda i profilati in alluminio dei telai è di tipo lineare, dove una dimensione prevale sulle altre due. Altrettanti sono i coefficienti di dilatazione per ogni sostanza: quello lineare (α) rappresenta l'allungamento unitario per un aumento di temperatura di un grado centigrado, espresso come rapporto tra l'allungamento o accorciamento e il prodotto tra la variazione di temperatura e la lunghezza iniziale del corpo ($mm/m^\circ C$).

In merito alla valutazione del contributo degli apporti solari alla prestazione termica dei serramenti si fa riferimento alla norma UNI 10344 che definisce l'apporto gratuito attraverso i serramenti in relazione:

- All'entità della radiazione solare incidente sulle diverse pareti dell'involucro edilizio;
- Alle caratteristiche geometriche e termofisiche dei componenti edilizi sia opachi che trasparenti, secondo una formula espressa dal prodotto fra due sommatorie (la prima prende in considerazione il numero dei giorni mensili per l'irradiazione globale giornaliera incidente sulla parete avente una certa esposizione; la seconda il numero delle superfici per l'area equivalente della superficie³¹ avente una certa esposizione).

La suddetta norma UNI riconosce che anche le parti cieche contribuiscano alla riduzione delle dispersioni energetiche e pertanto prevede che anche per i componenti opachi possa essere calcolato l'apporto energetico gratuito sulla base dell'area equivalente.

Un altro fenomeno da valutare attentamente nella progettazione di chiusure trasparenti verticali è quello relativo alla formazione di condensa superficiale. Frequentemente l'insorgere del fenomeno sui serramenti è da attribuire ad errori progettuali:

- Livelli di isolamento termico richiesti ai serramenti non correttamente rispondenti alle effettive condizioni igrotermiche degli ambienti abitativi,
- Presenza di ponti termici in corrispondenza dell'interfaccia serramento-vano murario oppure vetratura - profilato,
- Impianto di riscaldamento sotto dimensionato.

E' possibile verificare, seppur indicativamente, la possibilità di formazione di condensa superficiale su una superficie. Tale verifica consiste nel calcolare la temperatura

superficiale interna dell'elemento e confrontarla con la temperatura di rugiada dell'aria (quella cui ha inizio il fenomeno di condensa) conoscendo le condizioni interne di temperatura e di umidità relativa. Se la temperatura di rugiada risulta maggiore o uguale alla temperatura superficiale interna è possibile la formazione di condensa.

La temperatura di rugiada può essere ricavata sulla base di un diagramma dell'aria umida, conoscendo la temperatura e il tasso di umidità relativa dell'ambiente interno mentre la temperatura superficiale interna "ts" di una superficie può essere calcolata con la formula seguente:

$$t_s = t_i - U/h_i (t_i - t_e) \quad [K]$$

Dove:

t_i _ temperatura dell'ambiente interno in Kelvin;

t_e _ temperatura dell'ambiente esterno in Kelvin;

U _ trasmittanza termica in W/m^2K dell'oggetto edilizio di cui si vuole calcolare la temperatura superficiale interna;

h_i _ coefficiente di scambio superficiale in W/m^2K . Per i componenti trasparenti tale valore è funzione dell'emissività della lastra. Per quelli opachi invece la norma UNI 10344 suggerisce di adottare un valore pari a $7,7 W/m^2K$.

3.7 Isolamento acustico

Le onde sonore si propagano nello spazio in maniera pressoché sferica a partire dalle sorgenti passando attraverso il mezzo aereo; vengono inoltre riflesse nello spazio con maggiore o minore intensità da tutte le superfici e dagli oggetti circostanti. Quanto più lisce e dure sono le superfici, tanto più inalterata e completa risulta la riflessione sonora.

Una strategia per contrastare la propagazione dei suoni attraverso l'aria consiste nell'aumentare la massa: quanto più aumenta la massa di un corpo, tanto più aumenta la sua inerzia, perciò un corpo costituito da un materiale ad alta densità è attivato dalle onde sonore soltanto in misura ridotta.

Un secondo accorgimento contro la propagazione estrinseca del suono è quello di ricorrere a chiusure il più possibile ermetiche, che impediscono alle onde sonore di passare direttamente attraverso punti permeabili come i giunti, le fessure e le fenditure.³²

In Italia, attualmente, in merito alla normativa sull'isolamento acustico si fa riferimento a:

- D.P.C.M. 05.12.1997 Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici. Con indicazioni relative all'isolamento acustico standardizzato di facciata in relazione alla destinazione funzionale dell'edificio.
- D.M. 1 marzo 1991 Limiti massimi di esposizione al rumore negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno.
- LEGGE 26 ottobre 1995, n°447 Legge quadro sull'inquinamento acustico

LE NORMATIVE TECNICHE DI RIFERIMENTO SONO:

UNI EN ISO 717-1:2007 Acustica - Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 1: Isolamento acustico per via aerea

UNI EN ISO 140-3:2006 Acustica - Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 3: Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico per via aerea di elementi di edificio

UNI EN ISO 140-5:2000 Acustica - Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Misurazioni in opera dell'isolamento acustico per via aerea degli elementi di facciata e di facciate.

Inoltre esiste la possibilità di attutire la propagazione del suono estrinseco attraverso una struttura a doppio involucro con intercapedine isolata: questo provvedimento si rivela particolarmente efficace se i due involucri differiscono per spessore e peso, e di conseguenza hanno diverse trasparenze naturali. In questo caso l'effetto non viene annullato dall'esistenza di collegamenti rigidi tra i due involucri (principio massa-molla-massa).³³

L'isolamento acustico rappresenta una delle prime ragioni di utilizzo delle facciate a doppia pelle. La presenza, infatti, di un ulteriore schermo riesce a ridurre gli effetti acustici fastidiosi nonché nocivi proveniente dall'esterno. Il ruolo che questo schermo possiede nei confronti del flusso termico è simile a quello nei confronti dei rumori. Risulta però facile osservare che le aperture per la ventilazione poste sulla facciata possono comportare problemi di natura acustica per l'edificio.

La cavità che si trova tra le due pelli può essere considerata come un isolante acustico a differente potenzialità, sullo strato esterno e a quello interno, solo quando è chiusa. Capita spesso, infatti, che la pelle interna rifletta l'onda sonora dentro l'intercapedine trasmettendo con maggior definizione suoni ad alta frequenza, che vengono percepiti dall'orecchio umano come un disturbo maggiore; questo determina l'aumento del disturbo in quanto lo strato intermedio si comporta come una cassa di risonanza.

Il livello di rumore di un ambiente è misurato con L_A , in dB (A). Questa unità di misura permette di relazionare la frequenza del suono con la sensibilità dell'orecchio umano. Poiché la quantità di rumore è variabile nel corso di una giornata tipo, si introduce una nuova grandezza, L_{eq} , che rappresenta il livello di rumore medio. Inoltre, attraverso varie deduzioni, può esser definito il L_p , cioè il livello di rumore esterno rilevante, grandezza cardine per la trattazione della tematica acustica negli edifici a doppia pelle.

Tipo di facciata	Composizione della facciata	Isolamento acustico
Facciata a tutta altezza con buffer zone ventilata meccanicamente	Interno: vetro singolo 6,00 mm Cavità d'aria: 125,00 mm Esterno: doppio vetro 6/12/8	43 dB
Facciata box windows con sistema di ventilazione meccanica	Interno: vetro singolo 7,00 mm Cavità d'aria: 70,00 mm Esterno: doppio vetro 6/12/8	47 dB
Facciata multy-storey con sistema di ventilazione naturale dell'intercapedine	Interno: doppio vetro 6/12/8 Cavità d'aria: 700,00 mm Esterno: doppio vetro 6/12/8	53 dB

Tab. 3.18: Valori di isolamento acustico per tre tipi di facciata doppia pelle. Da: Loncour X., Wouters P., Flamant G., Blasco M.S., Impact of double ventilated facades in buildings, BBRI, 2004

Le normative tecniche di riferimento sono:

ISO 140-10 Acustica - Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Misurazioni di Laboratorio dell'isolamento per via aerea di piccoli elementi di edificio.

UNI EN ISO 140-16:2006 Acustica - Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 16: Misurazione in laboratorio dell'incremento del potere fonoisolante mediante rivestimento addizionale

UNI EN ISO 140-18:2007 Acustica - Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 18: Misurazione in laboratorio del rumore generato da pioggia battente su elementi di edificio

UNI 11143-1 Acustica - Metodo per la stima dell'impatto e del clima acustico per tipologia di sorgenti - Parte 1: Generalità.

Il rumore provoca problemi di salute e concentrazione; per questo motivo si tenta di implementare l'isolamento acustico degli edifici, agendo o su standard e regolamenti relativi ai componenti che separano le aree rumorose da quelle confinate, oppure definendo il livello massimo di rumore ammissibile all'interno degli ambienti.

La percezione del suono non dipende unicamente dalla sua potenza, ma anche da alcune sue caratteristiche: rumori come il vento oppure il traffico stradale possono esser facilmente tollerati, cosa che non capita per rumori prodotti dalla conversazione tra più persone oppure caratterizzati dalla stessa frequenza.

Per avere un valore al quale poter far riferimento, possiamo dire che la nostra soglia di non-benessere è data dalla seguente relazione:

$$DL = L_1 - L_{90}$$

Dove DL rappresenta la differenza, in decibel (dB), tra il picco di rumore che si è verificato per un periodo di tempo superiore all'1% durante la misurazione (L_1), ed il rumore base che si manifesta per un periodo di tempo pari al 90% durante la misurazione (L_{90}). Se il valore calcolato è positivo, significa che il disturbo è più alto del livello di rumore ammissibile.

Accanto a dati più tecnici, esistono, però anche considerazioni empiriche, relativamente al benessere psicofisico: solitamente, se sentiamo rumore all'interno di una stanza, ci viene più spontaneo chiudere la porta e non la finestra, poiché questa ultima rappresenta un contatto con il mondo esterno. Il rapporto con l'ambiente gioca un grande ruolo relativamente al benessere psicofisico; infatti, qualora chiudessimo la finestra, ci renderemmo facilmente conto che seppur il rumore si riduce, il livello di fastidio prodotto non diminuisce della stessa percentuale.

La volontà comune è quella di realizzare uno spazio intermedio che abbia la capacità di ridurre la componente rumorosa esterna, ma questo è possibile solo quando il suo spessore è sufficientemente grande. Quando questo principio non è rispettato, deve esser calcolato il raggio di riverberazione dell'onda sonora, che dipende dal tempo di riverberazione T_N , oppure dall'area A di assorbimento del suono equivalente nell'intercapedine. Attraverso dati sperimentali si perviene alla formula:

$$A = 0,163 V/T_N \text{ (m}^2\text{)}$$

Dove

V è il volume della facciata.

Il tempo di riverberazione e l'area di assorbimento dipendono principalmente dal numero di aperture poste sulla facciata.

Per calcolare il valore dell'isolamento acustico in una facciata si usa solitamente la formula sotto riportata:

Potenza della fonte di rumore	Livello di disturbo	Comprensibilità
10 dB	Elevato	Buona
5 dB	Basso	Sufficiente se il rumore è familiare
0 dB	Scarsamente percepibile	Difficile con rumori familiari
-5 dB	Minimo	Frammentaria con rumori sconosciuti
-10 dB	Assente	Impossibile

Tab. 3.19: Livello di percezione del rumore in relazione alla potenza della fonte di rumore. Fonte: OESTERLE L., LUTZ H., *Double-Skin façades: integrated planning*, Prestel, Munich – London – New York, 2001

$$R_{res} = R_1 - 10 \log (1 + f (100.1R_1 - 1)) \text{ (dB)}$$

Dove

R_{res} è la risultante totale dell'isolamento acustico;

R_1 è l'isolamento dovuto agli elementi chiusi;

f è il rapporto tra la superficie aperta e la superficie totale.

Tale formula, con i dovuti passaggi matematici, mostra l'effettivo potere schermante della pelle esterna, tenendo in considerazione il valore di assorbimento nell'intercapedine:

$$DR = -10 \log ((f (1 - 10^{-0.1R_1}) + 10^{-0.1R_1}) / A) \text{ (dB)}$$

L'equazione su riportata ci permette di calcolare, in maniera semplice e diretta, l'isolamento acustico di una pelle esterna con possibili aperture.

E' importante osservare che si ottengono ottimi livelli di isolamento acustico, anche attraverso la progettazione consapevole: se è possibile aprire finestre laddove non c'è rumorosità esterna ed evitarle laddove il disturbo è più elevato, il problema è pressoché risolto.

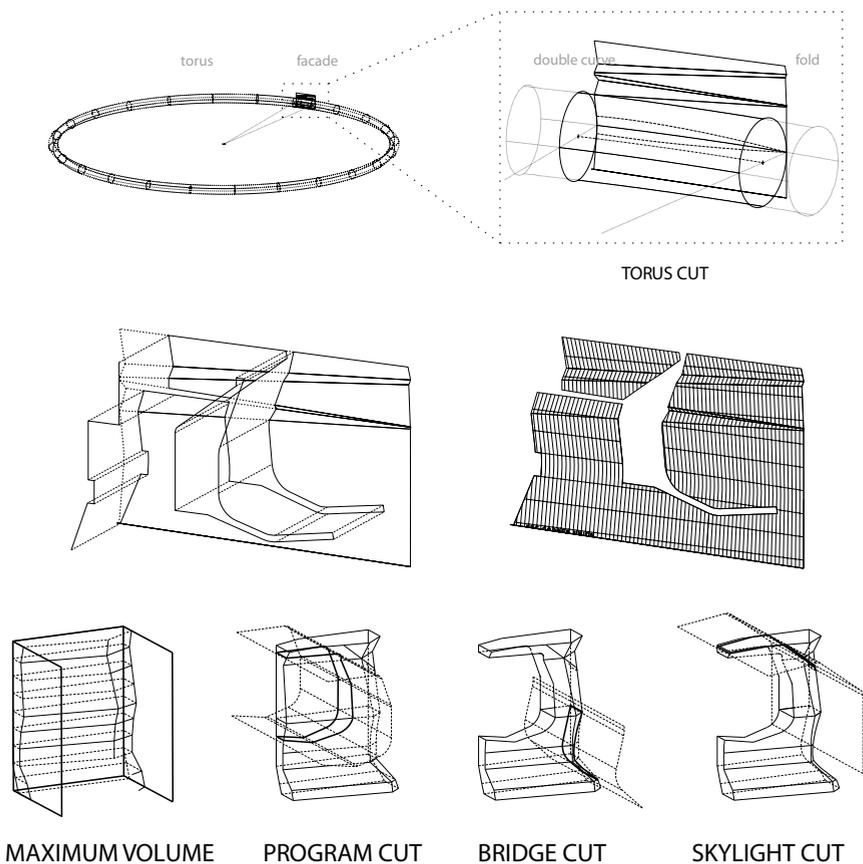


Fig. 3.22: Morphosis, Cooper Union, New York, 2008. Studio geometrico della facciata e dell'atrio.

3.8 Illuminazione naturale

Nell'ambito delle interazioni che l'involucro a doppia pelle pone in essere con i fattori ambientali esterni, legati all'energia solare, una relazione centrale viene stabilita e sviluppata rispetto alla gestione dell'illuminazione naturale.

Illuminare uno spazio confinato con luce naturale, proveniente da grandi superfici trasparenti opportunamente orientate, aiuta a ridurre notevolmente il consumo di energia elettrica per l'illuminazione degli edifici.

Il daylighting si basa sul concetto che, anche in una giornata estremamente piovosa, la luce naturale, sia diretta che diffusa dalla volta celeste, riesce ad illuminare la superficie terrestre; convogliare le radiazioni e modulando l'intensità luminosa in base alle diverse esigenze permette di illuminare un edificio, in orari diurni, riducendo al minimo l'ausilio della luce artificiale.

Il flusso luminoso deve essere controllato attraverso opportune strategie per evitare:

- fenomeni abbagliamento a causa della visione diretta del sole o riflessione sulle superfici lucide;
- surriscaldamento in prossimità delle aperture trasparenti in regime estivo;
- distribuzione non uniforme di luce naturale negli ambienti con una grande quantità di luce concentrata nelle zone prossime alle vetrate, mentre in quelle collocate a distanze maggiori condizioni di scarsa illuminazione con necessità di ricorrere a fonti luminose artificiali.

L'illuminazione naturale di uno spazio confinato destinato ad attività lavorativa contribuisce ad incrementare la sensazione di comfort indoor e la produttività degli utenti, la qualità della luce oltre che la quantità diventano elementi indispensabili per una buona progettazione dello spazio confinato. In questi edifici, dove spesso si ricorre all'utilizzo di grandi superfici trasparenti per le soluzioni d'involucro si deve avere cura di progettare aperture che non incidano sull'illuminazione degli ambienti, scegliendo, ad esempio, superfici colorate o con finiture particolari che ne alterano la trasparenza riducendo il coefficiente d'illuminazione degli spazi confinati.

I fattori che determinano l'intensità della luce passante attraverso l'involucro trasparente sono:

- Caratteristiche e coloritura della superficie esterna, che se fissa determina una riduzione dell'illuminazione interna di almeno il 10%;
- Profondità e caratteristiche dell'intercapedine;
- Presenza di eventuali elementi deflettori e riflettenti.

Per valutare la quantità di luce entrante all'interno degli ambienti confinati si utilizza un importante parametro, chiamato fattore d'illuminazione T_Q , solitamente calcolato nelle condizioni climatiche peggiori, ovvero di cielo coperto. Questo fattore descrive il rapporto tra l'intensità della luce sul piano orizzontale in un ambiente confinato con la stessa intensità calcolata in un ambiente esterno.

Si fa riferimento alla norma:

UNI EN 12464-1:2004 -

Luce e illuminazione - Illuminazione dei posti di lavoro - Parte 1: Posti di lavoro in interni.

La presente norma è la versione ufficiale in lingua italiana della norma europea EN 12464-1 (edizione novembre 2002). La norma specifica i requisiti illuminotecnici per i posti di lavoro in interni, che corrispondono alle esigenze di comfort visivo e di prestazione visiva. Sono considerati tutti i compiti visivi abituali, inclusi quelli che comportano l'utilizzo di attrezzature munite di videoterminali.

Il fattore di luce diurna varia tra l'1% e il 12%, per ambienti che vanno da poco luminosi (<1%) a molto luminosi (>12%).

Il fattore d'illuminazione può essere condizionato dalla presenza di oggetti o corpi orizzontali interni o esterni alla doppia pelle, che intercettando i raggi solari quando il sole è in prossimità dello zenit impediscono l'ingresso nello spazio confinato. Naturalmente anche la profondità della stanza determina la distribuzione della luce naturale all'interno dell'ambiente ed il ricorso più o meno accentuato alla luce artificiale per le superfici che non sono lambite dalla radiazione solare diretta.

Per aumentare la quantità di luce naturale interna bisognerebbe aumentare la superficie finestrata per permettere alla radiazione luminosa di entrare in maggiore quantità e raggiungere gli ambienti più profondi. Questo comporta però un problema a livello termico.

Un'altra soluzione potrebbe essere quella di posizionare dei deflettori di luce all'interno o all'esterno di un doppio vetro, questi sistemi hanno, infatti, la capacità di modificare l'angolo di incidenza luminosa in funzione dei requisiti richiesti dagli utenti, ma allo stesso tempo creano delle situazioni di ombra nelle vicinanze della parete vetrata e molta luce nella parte profonda delle stanze.

Una buona illuminazione naturale dell'ambiente interno - attraverso il dimensionamento, l'orientamento e le caratteristiche delle aperture - deve garantire:

- Una buona visibilità sul piano di lavoro (la norma UNI EN 12464-1:2004, indica i lux minimi necessari a garantire questo parametro in relazione alla destinazione funzionale dello spazio);
- Una buona visibilità dall'interno verso l'esterno, condizione questa che incrementa il comfort psicologico dell'utente;
- Una buona disposizione delle postazioni lavorative così che gli utenti possano avere tutti "il diritto al sole" anche negli ambienti interni;
- Protezione dai raggi solari diretti.

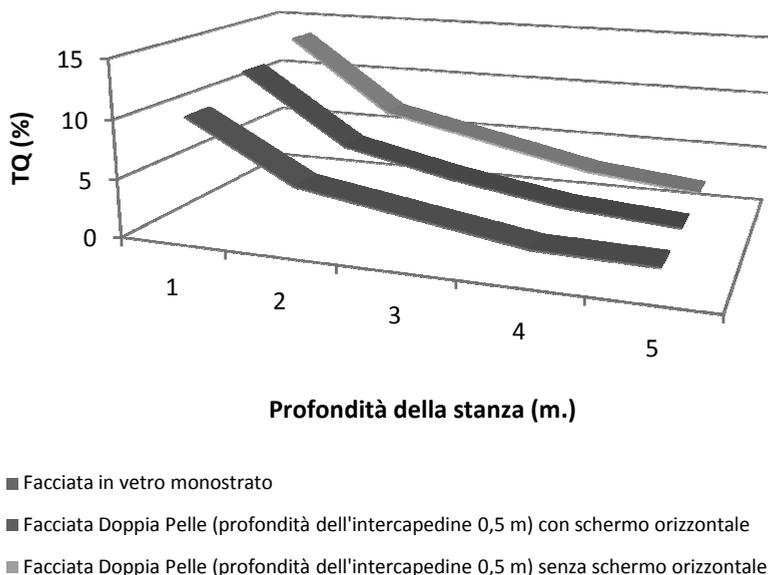


Fig. 3.23: Variazioni del fattore di illuminazione negli ambienti confinati in relazione alle tipologie di facciata.

Le caratteristiche qualitative e quantitative del flusso luminoso naturale dipendono da vari parametri ambientali esterni (ora del giorno, periodo dell'anno, condizioni meteorologiche che locali) che talora non ne garantiscono la presenza costante all'interno degli edifici richiede un'attenta progettazione dei sistemi di illuminazione artificiale che dovrebbero essere dotati di sensori e impianti di regolazione localizzata che ne garantiscano l'accensione sole dove e quando non c'è reale possibilità di intervenire con la luce naturale.

Anche la scelta dei materiali con cui realizzare gli elementi d'involucro e le finiture dello spazio confinato, in relazione alle loro caratteristiche superficiali ed alla coloritura, possono incidere sull'illuminazione naturale dello spazio in modo positivo (incrementandola) o negativo (incrementando fenomeni di abbagliamento e disagio); è sempre, quindi, buona norma valutare anche in questi termini le prestazioni dei materiali scelti.

Come ricordato precedentemente altri elementi che possono aiutare a regolare e "indirizzare" il flusso luminoso sono degli schermi deflettori opportunamente integrati ai sistemi di facciata, capaci di riflettere la luce e regolarne l'intensità all'interno dell'ambiente.

3.9 Protezione dal fuoco

Attualmente in Italia, a differenza di altri paesi Europei non esistono riferimenti precisi alle prestazioni di resistenza al fuoco dei componenti di facciata doppia pelle trasparente.

Questa lacuna normativa ha determina negli anni una grande varietà di soluzioni tecnologiche, dipendenti spesso dalle indicazioni delle autorità preposte a valutare i progetti in relazione ai piani di evacuazione in caso d'incendio.

Nel marzo 2010 è stata pubblicata la Circolare dei Vigili del Fuoco GUIDA TECNICA su: "Requisiti di sicurezza antincendio delle facciate negli edifici civili", che dà indicazioni sulle strategie da adottare per prevenire la propagazione del fuoco in presenza di strutture non portanti come le facciate continue e doppia pelle. Le indicazioni progettuali contenute nella Guida Tecnica, sono riferite solo a edifici che hanno un'altezza superiore ai 12 m. ed hanno carattere volontario fino al 2012.

In Italia, attualmente, in merito alla normativa antincendio si fa riferimento a:

- DECRETO 16 Febbraio 2007 Classificazione di resistenza al fuoco di prodotti ed elementi costruttivi di opere da costruzione
- Decreto 9 Marzo 2007 Prestazioni di resistenza al fuoco delle costruzioni nelle attività soggette al controllo del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco
- Decreto 26 giugno 1984 Classificazione di reazione al fuoco ed omologazione dei materiali ai fini della prevenzione incendi
- DECISIONE della Commissione CEE del 4 ottobre 1996 recante l'elenco di prodotti delle classi A "nessun contributo all'incendio" di cui alla decisione 94/611/CE che attua l'articolo 20 della direttiva 89/106/CEE del Consiglio sui prodotti da costruzione.
- DECRETO 10 marzo 2005 Classi di reazione al fuoco per i prodotti da costruzione da impiegarsi nelle opere per le quali è prescritto il requisito della sicurezza in caso d'incendio.
- DECRETO 15 marzo 2005 Requisiti di reazione al fuoco dei prodotti da costruzione installati in attività disciplinate da specifiche disposizioni tecniche di prevenzione incendi in base al sistema di classificazione europeo.

Per le facciate curtain walls la Guida prevede che in corrispondenza di ogni solaio e di ogni muro trasversale, con funzione di compartimentazione, deve essere prevista una fascia, costituita da uno o più elementi costruttivi di classe di resistenza al fuoco E60-ef.

Per le facciate doppia pelle la Guida dei Vigili del fuoco prevede invece le seguenti strategie in relazione alla tipologia:

- Intercapedine interrotta da elementi di interpiano resistenti al fuoco.

Se l'intercapedine o lo spazio d'aria della facciata a doppia parete è interrotta da solai o setti di compartimentazione E60 per ciascun piano, la parete esterna ovvero la parete interna devono obbedire alle stesse regole delle facciate semplici. Nei solai e setti resistenti al fuoco che interrompono l'intercapedine, possono essere praticate aperture allo scopo di consentire la circolazione di aria all'interno dell'intera intercapedine, a condizione che sia mantenuta salva la continuità della compartimentazione di interpiano attraverso l'intervento, in caso d'incendio, di dispositivi automatici di chiusura aventi requisito di resistenza al fuoco E60.

- Intercapedine ventilata con parete esterna chiusa

Nel caso di facciate a doppia parete ventilata, avente intercapedine priva di interruzioni orizzontali, se la parete esterna è costituita, per oltre il 50 % della sua superficie, da elementi fissi che si rompono a temperature superiori a 100 °C, la parete interna dovrà avere, per l'intera altezza e per tutti i piani, una resistenza al fuoco EW30 da verificare mediante una prova in conformità 5 alla norma EN 1364-1 nel caso in cui la parete interna poggi direttamente sui solai e in conformità alla norma EN 1364-3 nel caso in cui la parete interna sia di tipo Curtain Walls. In questo secondo caso 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.

PARAMETRI	DESCRIZIONE	RISCHIO	
Tipo di facciata	A1 Stanza singola con divisioni periferiche verticali e orizzontali	Facciata Box-window. Bocchette di ventilazione entrata uscita distinte	Basso
	A2	Connessione tra le box window attraverso un canale di ventilazione comune	Basso
	B	Corridor facade; presenta divisioni orizzontali ad ogni piano, le stanze sono connesse attraverso l'intercapedine	Medio
	C	Multi-storey facade, non sono presenti elementi di divisione orizzontale e verticale, tutti gli ambienti sono comunicanti	Alto
Altezza dell'edificio	I	Edificio basso (fino a 3 piani)	Basso
	II	Edificio con altezza media (da 3 a 10 piani)	Medio
	III	Edifici alti (oltre i 10 piani)	Alto
Destinazione funzionale dell'edificio	a	Uffici	Basso
	b	Residenziale	Medio
	c	Usi speciali: scuole, ospedali, casi di cura, ecc..	Alto

Tab.3.20: Fattori di rischio riferiti alla tipologia di doppia facciata trasparente, altezza dell'edificio e destinazione funzionale. Da: OESTERLE L., LUTZ H., Double-Skin facades: integrated planning, Prestel, Munich – London – New York, 2001

- Intercapedine ventilata con parete esterna aperta.

Nel caso di facciate a doppia parete ventilata, con intercapedine priva di interruzioni, se la parete esterna è costituita, per almeno il 50 % della sua superficie da elementi provvisti di lamelle mobili di aerazione che si aprono automaticamente in caso di incendio (apertura almeno 30 gradi rispetto all'orizzontale) o di grate fisse distribuite con uniformità, o infine, di pannelli costituiti da materiali che a temperature inferiori a 100 °C fondono, la parete interna dovrà presentare analoghi requisiti di resistenza al fuoco delle facciate semplici.

- Presenza di impianto automatico di spegnimento nell'intercapedine.

In presenza di un sistema automatico di spegnimento ad acqua, posizionato all'interno delle due pareti e dimensionato in modo da garantire una densità di scarica non inferiore a 10 l/min•m² sulle pareti interne dell'intero perimetro delimitante il compartimento, non sono richiesti specifici requisiti di resistenza al fuoco se la parete interna è in vetro temperato con trattamento HST (Heat Soak Test). La portata dell'impianto, da considerarsi aggiuntiva alla portata destinata ad altri impianti di spegnimento previsti per l'edificio, deve essere tale da garantire il funzionamento contemporaneo, in erogazione, degli ugelli del piano immediatamente superiore a quello interessato dall'incendio, mentre la durata di scarica degli erogatori dovrà essere almeno pari a 60 minuti. L'impianto deve essere comandato da apposito sistema di rivelazione incendi a servizio di ciascun piano dell'edificio e i dispositivi di erogazione, posti al di sopra di ciascun piano, devono essere orientati verso la parete interna. Lo spazio intermedio o "corridoio d'aria", inoltre, dovrà essere provvisto di idoneo sistema di evacuazione dei fumi, orientativamente individuabile attraverso una superficie di

TIPO FACCIATA		UTILIZZO EDIFICIO			
		UFFICI	APPARTAMENTI	ALTRO	
ALTEZZA EDIFICIO	Fino a 7,00 m	Facciata a celle	1	1	1
		Facciata a canali	1	1	1
		Facciata a tutta sup	2	2+4	2+4
	Fino a 22,00 m.	Facciata a celle	1	1	1
		Oltre 22,00 m.	1	2	2+4
		Facciata a tutta sup.	2	2+4	2+4
	Oltre 22,00 m.	Facciata a celle	3	3	3
		Facciata a canali	3+4	3+4	3+4
		Facciata a tutta sup.	3+4	3+4+5	3+4+5

1=nessun accorgimento 2=rivelatore automatico d'incendio nell'intercapedine. 3=rivelatore nelle stanze 4=Ventilatori nell'intercapedine 5=Protezione stanza con sprinkler

Tab. 3.21: Analisi degli accorgimenti da adottare negli edifici in relazione al tipo di facciata, dell'altezza dell'edificio e della destinazione funzionale.

ventilazione naturale, realizzata sia nella parte bassa che nella parte alta della facciata, di area pari al 10 % della sezione orizzontale dell'intercapedine stessa.

Considerando però che ogni materiale ha particolari caratteristiche ignifughe, spesso, anche per la realizzazione di involucri trasparenti, si utilizzano materiali di classe A (materiale non combustibile) per gli strati esterni e per gli elementi separatori orizzontali e verticali, mentre materiali di classe B (materiali combustibili) vengono impiegati per la pelle interna.

Da un esame teorico sono deducibili i seguenti problemi in merito alla sicurezza delle facciate a doppia pelle in caso d'incendio:

- Dall'esterno è praticamente impossibile percepire l'incendio e le persone in pericolo;
- I pompieri non possono intervenire attraverso la facciata (per il soccorso e l'intervento), in particolare durante la fase iniziale dell'incendio;
- La distruzione termica della facciata esterna avviene molto tardi o non avviene (secondo il tipo di costruzione e di vetro);
- La caduta di parti della costruzione, quali vetro, profilati metallici ecc. può mettere in pericolo le squadre di intervento, in particolare in caso di incendio completamente sviluppato;
- Nelle facciate a doppia pelle le cui intercapedini (zone tampone) non sono compartimentate da sbarramenti antincendio adeguati resistenti al fuoco, gli incendi e i gas di combustione possono propagarsi liberamente, cortocircuitando e rendendo inefficaci i compartimenti tagliafuoco orizzontali (separazioni dei piani) e verticali (separazioni sullo stesso piano), con conseguente rapida propagazione degli incendi ai piani superiori e ai compartimenti tagliafuoco adiacenti;
- I materiali combustibili che si trovano nelle intercapedini (elementi delle pareti, tende di stoffa ecc.) contribuiscono all'intensificazione e alla rapida propagazione dell'incendio.

Se non sono adottate misure adeguate, in caso di incendi consistenti sarà pressoché inevitabile una rapida propagazione ad altri compartimenti tagliafuoco e piani. Anche gli incendi a scarso sviluppo di energia, soprattutto se le finestre sono aperte, riempiono di fumo interi edifici o almeno parte degli stessi. In simili condizioni, se non vengono prese speciali precauzioni, le vie di fuga formate da compartimenti tagliafuoco (corridoi, vani scale) in brevissimo tempo possono diventare impraticabili.

Il livello di sicurezza è calcolato in funzione della possibilità di poter, in caso di incendio, evacuare al più presto le persone all'interno dell'edificio. Ogni edificio possiede un grado di sicurezza, strettamente correlato alla sua altezza ed alla sua destinazione funzionale:

- in relazione all'altezza, più un edificio è alto più presenterà una pericolosità in caso di incendio;
- in relazione alla destinazione funzionale, edifici molto frequentati come scuole, sale conferenze, teatri ecc., devono essere considerati ambienti ad alto rischio.

Le facciate ventilate dovranno essere progettate e collocate opportunamente:

- Sistemi di rilevamento dei fumi, da realizzarsi sia all'interno degli ambienti confinati che nell'intercapedine tra le due pelli;
- Sistemi di attivazione meccanica di bocchette estrattive, da realizzarsi sulla pelle esterna in modo tale da permettere la fuoriuscita del fumo;
- Sistemi per lo spegnimento automatico del fuoco, anche questi da prevedere all'interno delle stanze e nell'intercapedine.

Ogni tipologia di facciata a doppia pelle risponde in maniera differente ai pericoli

correlati ad un possibile incendio; come è facile intuire, infatti, le 'box windows' sono dei sistemi compartimentati, che impediscono il passaggio di fumo e fiamme da un ambiente ad un altro attiguo; cosa diversa capita nelle "multistory facades", che non possedendo separazioni interne, non riescono a confinare gli effetti di un incendio dentro uno spazio predefinito.

3.9.2 Normativa tecnica di riferimento

In relazione alla resistenza al fuoco delle facciate doppie trasparenti, la normativa tecnica esistente indica di valutare la resistenza al fuoco di ogni singolo elemento adottato per la realizzazione della facciata.

Nella norma EN 13830 (Curtain walling – product standard), sono indicati tre aspetti in relazione alla resistenza al fuoco delle facciate continue:

- Reazione al fuoco: NBN EN 13501-1:2002 (Classificazione di resistenza al fuoco dei prodotti dei materiali da costruzione – Parte 1. Classificazione usando dati provenienti da test sulla reazione al fuoco). Questa norma indica le procedure che devono essere seguite per valutare la resistenza al fuoco dei prodotti. In relazione al comportamento alle fiamme è stato sviluppato uno specifico test per le facciate.
- Resistenza al fuoco: prEN 13501-2:2000 (Classificazione di resistenza al fuoco dei prodotti dei materiali da costruzione – Parte 2. Classificazione usando dati provenienti da test sulla resistenza al fuoco). La classificazione delle facciate e dei muri esterni è stata fatta testando le facciate continue in accordo con la norma EN 1364 (Parte 3 e Parte 4)
- Propagazione delle fiamme: la norma indica le precauzioni che devono essere prese per prevenire la diffusione di fuoco e fumo attraverso le intercapedini delle facciate continue. Rilevatori di fumo e sistemi tagliafuoco dovrebbero essere previsti in corrispondenza di ogni attacco alla struttura orizzontale dell'edificio. Attualmente mancano degli standard e delle norme di riferimento precise.

In Italia la direttiva Europea è stata ripresa dalle seguenti norme UNI:

- UNI EN 1364-3 Prove di resistenza al fuoco per elementi non portanti - Parte 3: Facciate continue - Configurazione in grandezza reale (assemblaggio completo); indica le modalità attraverso cui devono essere fatti i test di resistenza al fuoco delle facciate continue.
- UNI EN 1364-4 Prove di resistenza al fuoco per elementi non portanti - Parte 4: Facciate continue - Configurazione parziale; indica le modalità attraverso cui devono essere fatti i test di resistenza al fuoco di alcune parti di facciata continua.
- UNI EN 13501-1 Classificazione al fuoco dei prodotti e degli elementi da costruzione - Parte 1: Classificazione in base ai risultati delle prove di reazione al fuoco è di riferimento per la classificazione della reazione al fuoco dei componenti di facciata.

Conclusioni

L'analisi delle caratteristiche tecnologiche e la definizione delle prestazioni delle facciate doppia pelle trasparente è stata necessaria per individuare un modello di riferimento per lo sviluppo del concept di facciata e la realizzazione del prototipo, affrontate nella fase propositiva della tesi di dottorato. La classificazione relativa alle caratteristiche geometriche del sistema, del tipo di ventilazione e delle peculiarità dell'intercapedine, oltre all'indagine relativa alla definizione delle performance in termini di comfort

termoigrometrico, visivo, acustico, ci ha inoltre permesso di rilevare dei dati quantitativi che ci sono serviti nella fase di stesura meta-progettuale. In particolare modo, è stato possibile comprendere quali elementi adottare e come combinarli declinandoli sistematicamente nell'area di applicazione del Sud Europa, per promuovere l'efficienza energetica di un sistema tecnologico, quale quello della facciata trasparente doppia pelle, che comporta numerose problematiche in relazione alla climatizzazione estiva.

Tra gli elementi individuati in questa fase, riproposti poi nell'ambito di elaborazione del componente dinamico di facciata, ricordiamo quelli relativi a:

- Conformazione geometrica: abbiamo deciso di sviluppare un componente del tipo box facade perché in grado di garantirci facilità di messa in opera, maggiori prestazioni acustiche e minori rischi in caso d'incendio;
- Ventilazione dell'intercapedine: abbiamo adottando un sistema di ventilazione naturale, la cui efficienza è garantita dall'altezza del modulo di facciata e dalla profondità dell'intercapedine;
- Sistema schermante mobile, capace di ottimizzare l'illuminamento dello spazio confinato, ma soprattutto di limitare gli apporti energetici nei mesi estivi: abbiamo integrato nel componente un pannello schermante mobile. Rispetto al tema della schermatura è stato determinante valutare, attraverso l'analisi di ricerche condotte in Germania, come la schermatura incida maggiormente sul bilancio energetico estivo se collocata all'interno di due superfici trasparenti e come invece il fabbisogno di energia primaria per il condizionamento decresca se l'elemento oscurante viene posto all'esterno di una superficie vetrata monostato.

Queste riflessioni ci hanno condotto a sviluppare un sistema di facciata, che attraverso la possibilità di muovere i layer che lo costituiscono, garantisca una conformazione:

- a doppia pelle nei mesi invernali, quando i guadagni solari passivi possono limitare, alle nostre latitudini, i consumi per il riscaldamento;
- a vetro singolo e schermatura esterna nei mesi estivi così da ridurre le problematiche legate al surriscaldamento dell'intercapedine.

Note

¹ HERZOG, T., KRIPPNER, R., LANG, W., *Atlante delle facciate*, Utet, Torino, 2005

² Nel 1903 uno dei primi esempi di facciata ad intercapedine è quella eretta nel 1903 nella fabbrica Steiff a Giengen an der Brenz, che riesce a strutturare al massimo la luce naturale con una pelle esterna continua in vetro che ha la funzione di migliorare le proprietà termoisolanti del rivestimento esterno. Da HERZOG, T., KRIPPNER, R., LANG, W., *Atlante delle facciate*, Utet, Torino, 2005

Una doppia pelle può essere definita come un sistema di due vetri separato da un corridoio d'aria. L'aria tra le due superfici trasparenti si comporta come isolante termico e acustico. Le schermature solari sono solitamente collocate all'interno di questa intercapedine. Tutti gli elementi del sistema sono progettati per poter assumere varie configurazioni e combinazioni, anche attraverso l'uso di materiali e membrane mutevoli. HARRISON K. & MEYER-BOAKE T., *The Tectonics of the Environmental Skin*, University of Waterloo, School of Architecture, 2003

³ Sono anche del XIX secolo il Palazzo di Cristallo di Londra e il primo brevetto sul vetro isolante depositato negli Stati Uniti a fine secolo

⁴ Cfr. TUCCI F., *Involucro ben temperato. Efficienza energetica ed ecologica in architettura attraverso la pelle degli edifici*, Alinea Editrice, Firenze, 2006

⁵ Nel 1930 sono adottati per la prima volta sistemi di condizionamento estivo

⁶ «Il telaio di supporto è collegato alla struttura del solaio tramite elementi che permettono la regolazione nelle tre dimensioni, per assorbire le tolleranze dimensionali proprie sia dell'edificio, sia della tecnologia degli infissi, sia della tecnologia di assemblaggio. Gli ancoraggi al solaio possono a loro volta essere sul fronte dell'edificio, all'estradosso o all'intradosso. Se i pannelli sono ubicati sul filo esterno della struttura portante, il sistema di chiusura si definisce 'a cortina'. Se invece la parete è inserita tra due muri o pilastri ed è passante solo rispetto ai solai, si definisce "facciata a cortina inserita verticalmente". La parete "semi inserita", o "semi-passante" o a "semi-cortina" è quella parete che ha una parte dello spessore esterna alla struttura portante». Da: FRANCO G., *L'involucro edilizio. Guida alla progettazione e manutenzione delle chiusure verticali portanti e portate*, EPC LIBRI, Roma, 2003

⁷ PAGANIN G., *Facciate leggere*, Sistemi Editoriali, Napoli, 2009

⁸ TUCCI F., *Involucro ben temperato. Efficienza energetica ed ecologica in architettura attraverso la pelle degli edifici*, Alinea Editrice, Firenze, 2006

⁹ Questo tipo di facciate viene brevettato nel 1983 dall'ingegner Peter Rice in occasione del progetto e della realizzazione Museo della Scienza e dell'Industria. Da TUCCI F., *Involucro ben temperato. Efficienza energetica ed ecologica in architettura attraverso la pelle degli edifici*, Alinea Editrice, Firenze, 2006

¹⁰ TUCCI F., *Involucro ben temperato. Efficienza energetica ed ecologica in architettura attraverso la pelle degli edifici*, Alinea Editrice, Firenze, 2006

¹¹ WIGGINTON M., HARRIS J., *Intelligent Skins*, Architectural Press, Oxford, 2002

¹² KRAGH M., *Building Envelopes and Environmental Systems*, Paper presented at Modern Facades of Office Building Delft Technical University, Netherlands, 2000

¹³ La modalità di ventilazione è indipendente dal tipo di ventilazione applicata

¹⁴ OESTERLE L., LUTZ H., *Double-Skin facades: integrated planning*, Prestel, Munich – London – New York, 2001

¹⁵ La prima azienda a fornire il brevetto per questa tipologia di facciata è stata la compagnia tedesca Alco, con sede a Monaco di Baviera

¹⁶ FRANCO G., *L'involucro edilizio. Guida alla progettazione e manutenzione delle chiusure verticali portanti e portate*, EPC LIBRI, Roma, 2003

¹⁷ HERZOG T., KRIPPNER R., LANG W., *Atlante delle facciate*, Utet, Torino, 2005

¹⁸ MONTANTE: Componente della sottostruttura costituito da un profilato metallico

montato verticalmente. Dalla Norma UNI 11018:2003

¹⁹ PAGANIN G., *Facciate leggere*, Sistemi Editoriali, Napoli, 2009

²⁰ TRAVERSO: Componente della sottostruttura costituito da un profilato metallico montato orizzontalmente. Dalla Norma UNI 11018:2003

²¹ Dati sperimentali dimostrano che ostruzioni nell'ordine del 10% generano un abbassamento di pressione di circa il 20%.

²² Le facciate attive ed interattive della Permasteelisa possono essere considerate tra i primi sistemi di facciata doppia pelle a ventilazione integrata che attraverso la gestione meccanica della ventilazione dell'intercapedine incrementano la trasmittanza termica della superficie trasparente in relazione alle fasce climatiche in cui sono applicate. In particolare l'Interactive Wall è consigliato per aree geografiche con clima caldo umido o temperato quando è necessario controllare che la temperatura dell'aria dell'intercapedine non superi mai la temperatura dell'aria esterna provocando il surriscaldamento della superficie vetrata interna.

²³ Negli edifici moderni adibiti ad uffici si tende sempre più a schermare la luce solare, sia per motivi economici sia per il benessere igrotermico.

²⁴ DOEBBER I., MCCLINTOCK M., *Analysis Process For Designing Double Skin Facades And Associated Case Study*, Proceedings of SimBuild 2006, held at MIT in Cambridge, Mass., August 2-4, 2006

²⁵ Il vapore acqueo si sposta dalla facciata a maggior pressione di vapore (pressione parziale) a quella a minor pressione. Se contemporaneamente, a causa di un improvviso calo di temperatura, la temperatura dell'aria scende sotto il punto di rugiada, insorgono fenomeni di condensa (con il rischio di formazione di rugiada e muffe).

²⁶ HAASE M., AMATO A., *Ventilated façade design in hot and humid climate*, PLEA2006 - The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland, 6-8 September 2006

²⁷ OESTERLE L., LUTZ H., *Double-Skin facades: integrated planning*, Prestel, Munich – London – New York, 2001

²⁸ HAMZA N., *Double versus single skin facades in hot arid areas*, Energy and Buildings 40, 2008

²⁹ DLgs 192/2005, Art.4, Criteri generali e requisiti delle prestazioni energetiche degli edifici e degli impianti, comma 4 c: "...Per tutte le categorie di edifici, così come classificati in base alla destinazione d'uso all'articolo 3 del decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412, ad eccezione della categoria E.8, il valore massimo della trasmittanza (U) delle chiusure apribili ed assimilabili, quali porte, finestre e vetrine anche se non apribili, comprensive degli infissi, considerando le parti trasparenti e/o opache che le compongono, deve rispettare i limiti riportati nelle tabelle 4.a e 4.b al punto 4 dell'allegato C al decreto legislativo. Restano esclusi dal rispetto di

detti requisiti gli ingressi pedonali automatizzati, da considerare solo ai fini dei ricambi di aria in relazione alle dimensioni, tempi e frequenze di apertura, conformazione e differenze di pressione tra l'ambiente interno ed esterno.”

³⁰ DPR 59/2009, Art.4, Criteri generali e requisiti delle prestazioni energetiche degli edifici e degli impianti, Comma 19: “..Per tutte le categorie di edifici, così come classificati in base alla destinazione d'uso all'articolo 3 del decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412, ad eccezione delle categorie E.6 ed E.8, al fine di limitare i fabbisogni energetici per la climatizzazione estiva e di contenere la temperatura interna degli ambienti, nel caso di edifici di nuova costruzione e nel caso di ristrutturazioni di edifici esistenti di cui all'articolo 3, comma 2, lettere a), b) e c), numero 1), questo ultimo limitatamente alle ristrutturazioni totali, del decreto legislativo, e' resa obbligatoria la presenza di sistemi schermanti esterni. Qualora se ne dimostri la non convenienza in termini tecnico-economici, detti sistemi possono essere omessi in presenza di superfici vetrate con fattore solare (UNI EN 410) minore o uguale a 0,5. Tale valutazione deve essere evidenziata nella relazione tecnica di cui al comma 25”. Comma 20: Nel caso di ristrutturazione di edifici esistenti di cui all'articolo 3, comma 2, lettera c), numeri 1) e 2), del decreto legislativo, per tutte le categorie di edifici, così come classificati in base alla destinazione d'uso all'articolo 3, del decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412, ad eccezione delle categoria E.6 ed E.8, il progettista, al fine di limitare i fabbisogni energetici per la climatizzazione estiva e di contenere la temperatura interna degli ambienti, valuta puntualmente e documenta l'efficacia dei sistemi filtranti o schermanti delle superfici vetrate, tali da ridurre l'apporto di calore per irraggiamento solare. Gli eventuali impedimenti di natura tecnica ed economica all'utilizzo dei predetti sistemi devono essere evidenziati nella relazione tecnica di cui al comma 25. La predetta valutazione può essere omessa in presenza di superfici vetrate con fattore solare (UNI EN 410) minore o uguale a 0,5.

³¹ Tale superficie rappresenta quella porzione di serramento che è in grado di trasformare l'irraggiamento solare in energia utile all'ambiente interno per mantenere la temperatura di comfort necessaria.

³² HERZOG T., KRIPPNER R., LANG W., *Atlante delle facciate*, Utet, Torino, 2005

³³ *Supra*

Capitolo 4

Superfici trasparenti innovative

La necessità di relazionare dal punto di vista percettivo e fisico l'edificio e l'ambiente circostante ha da sempre costituito una tematica di ricerca fondamentale per sviluppare sistemi di facciata innovativi.

L'involucro opaco all'interno del quale l'uomo ha realizzato la sua abitazione, il suo rifugio dalle intemperie, sin dallo sviluppo degli archetipi architettonici è stato caratterizzato da aperture che permettessero il passaggio di aria e luce nello spazio circoscritto dalle pareti dell'edificio.

La necessità di adeguare queste aperture alle trasformazioni estetiche e tecnologiche a cui l'edificio è stato soggetto nel corso degli anni ha condotto all'evoluzione del sistema facciata nel suo complesso e all'elemento finestra nel particolare. L'evoluzione tecnologica del componente trasparente è stata caratterizzata da innovazioni relative alle sue parti costitutive permettendo di aumentarne le dimensioni sino a farle coincidere con l'intera superficie di chiusura dell'edificio stesso.

Senza alcun dubbio, nessuno più dei maestri del movimento moderno (Mies van der Rohe, Le Corbusier, Walter Gropius e Frank Lloyd Wright) ha contribuito in modo così determinante all'affermazione del vetro in architettura. Con il movimento moderno si assiste alla realizzazione di edifici caratterizzati dalla separazione tra struttura portante ed involucro esterno; soluzione tecnologica che permette di realizzare volumi che si sviluppano in altezza quali i primi edifici a scheletro di acciaio della Scuola di Chicago.

Negli che precedono e seguono il secondo conflitto mondiale la trasparenza è quindi sinonimo di innovazione, astrazione assoluta, progresso, e, nel contrasto con la materia opaca tradizionale, rende manifesta l'ansia del rinnovamento di un'intera generazione. Qualche anno dopo, con la diffusione dell'uso del cemento armato ed il progressivo smaterializzarsi dell'involucro a favore delle qualità intrinseche del vetro, si avvia quel processo di smaterializzazione dell'involucro opaco, con il passaggio repentino dall'apertura finestra all'apertura della facciata trasparente.¹ In quegli anni la trasparenza mutò la percezione dello spazio. L'architettura esplorò nuovi percorsi, e così prevalse l'uso di svuotare gli angoli degli edifici per distruggere la massività del volume a mostrare la successione dei piani sospesi; di realizzare corpi scala vetrati e denunciare l'indipendenza programmatica tra telaio strutturale ed involucro; di annullare il confine tra interno ed esterno con superfici continue di cristallo, che lasciavano intravedere il contenuto della nuova architettura: la rinnovata spazialità, la costruzione, l'organizzazione libera di uno spazio inondato dalla luce naturale.² L'architettura moderna nell'estremizzare l'uso del vetro, interpretava la trasparenza in termini totali ed assoluti; la idealizzava fino ad assumerla a simbolo del proprio rinnovamento in nome dei principi di onestà costruttiva, continuità visiva e profondità spaziale, a volte, anche a discapito delle ragioni pratiche o delle esigenze di abitabilità. «Nell'architettura di vetro – osserva Purini – si realizza il sogno di conciliare l'essere con l'apparire. La casa non ha più segreti, non ha più opache facciate che possano nascondere

(...), ma in questa estrema coincidenza consiste il massimo di ambiguità: la casa di vetro, censurando le guerriglie della vita quotidiana, normalmente occultata da muri impenetrabili agli sguardi, le demonizza rilanciandole nel chiuso delle coscienze».³

Dopo aver assunto, dunque, il vetro come entità programmabile dalla luce, ed aver affiancato ad esso i nuovi materiali plastici, la sperimentazione sulle 'modulazioni di trasparenza' lavora sulle relative qualità fisiche; ne indaga la densità; gioca su specializzazione funzionale e stratificazione multipla. Più spesso, il controllo del fenomeno della rifrazione si realizza per mezzo delle tecniche di trattamento delle superfici: serigrafia, incisione, acidatura, saldatura.⁴

La ricerca della luce e della trasparenza, la necessità di osservare gli accadimenti esterni, hanno portato allo sviluppo tecnologico del vetro, ai curtain walls, alle vetrate appese, all'uso sempre più diffuso di coperture e spazi trasparenti (facciate interne, atri, corti, gallerie e cupole), volumi architettonici le cui strutture metalliche e sfaccettature vitree definiscono una complessa permeabilità regolata ai raggi del sole.

L'evoluzione della finestra in facciata vetrata ha comportato la necessità di introdurre nuovi parametri valutativi rispetto alle prestazioni generali del sistema, che consentissero di controllare gli apporti luminosi e termici delle radiazioni solari, garantendo condizioni di confort indoor adeguate.

Dalla causticità e perentorietà del messaggio moderno, si è approdati all'enigmaticità ed indeterminazione di quello contemporaneo, espressione di un'architettura che vuole trasmettere la intenzionale vaghezza e la tendenziale mutevolezza della propria immagine, continuamente valutabile in funzione delle proprietà ottiche dei materiali adottati, della microstruttura delle superfici di rivestimento, della scala e dell'angolo visuale, del tipo d'illuminazione, nonché della posizione dell'osservatore rispetto alla fonte di luce.

Se Mies Van Der Rohe celebrava la trasparenza letterale del vetro e la sincerità della costruzione, sia nell'utilizzo dei materiali, sia nell'analitica scomposizione dell'organismo edilizio, ora si preferisce la trasparenza fenomenica di involucri stratificati nei quali le virtù dei materiali sono esplorate con il proposito di velare più che rivelare, di confondere più che rendere evidente. Alla totale permeabilità visiva del vetro, quindi,



Fig. 4.1 e Fig. 4.2: Caixa Forum Museo della Scienza, Terradas Arquitectos Barcellona, Spagna, 2004

si sostituisce quello che Jean Nouvel definisce lo spessore della trasparenza, realizzato attraverso l'essfoliazione dell'involucro in un palinsesto funzionale e compositivo in cui l'indipendenza e la simultanea riconoscibilità degli strati sovrapposti rendono indefinita la percezione della linea di margine dell'edificio.⁵

«Raramente un altro materiale edile ha vissuto nel più recente passato un'implementazione simile al vetro. In soli tre decenni da materia fragile e frangibile si è trasformato in un materiale da costruzione ad elevate prestazioni che se necessario porta carichi, permette di costruire strutture esili e se dotato di rivestimenti superficiali raffinati, non visibili, assume diverse funzioni di controllo climatico. Il vetro in esili gusci reticolari, intelaiato in facciate o non intelaiato in strutture completamente trasparenti, è un materiale con un potenziale innovativo molto vasto».⁶

L'analisi condotta non poteva prescindere dallo studio delle caratteristiche delle componenti trasparenti in funzione delle innovazioni tecnologiche, introdotte di recente sul mercato, relative alle proprietà fisiche del vetro, per passare, infine alle valutazioni delle prestazioni energetiche del sistema di facciata trasparente, inteso come l'evoluzione ultima del componente finestra esteso a tutto l'involucro dell'edificio. Lo studio condotto ha permesso di valutare i benefici e i rischi dell'adozione di superfici vetrate, considerando i parametri applicativi che possono incidere sul benessere degli utilizzatori e il bilancio energetico dell'intero edificio.

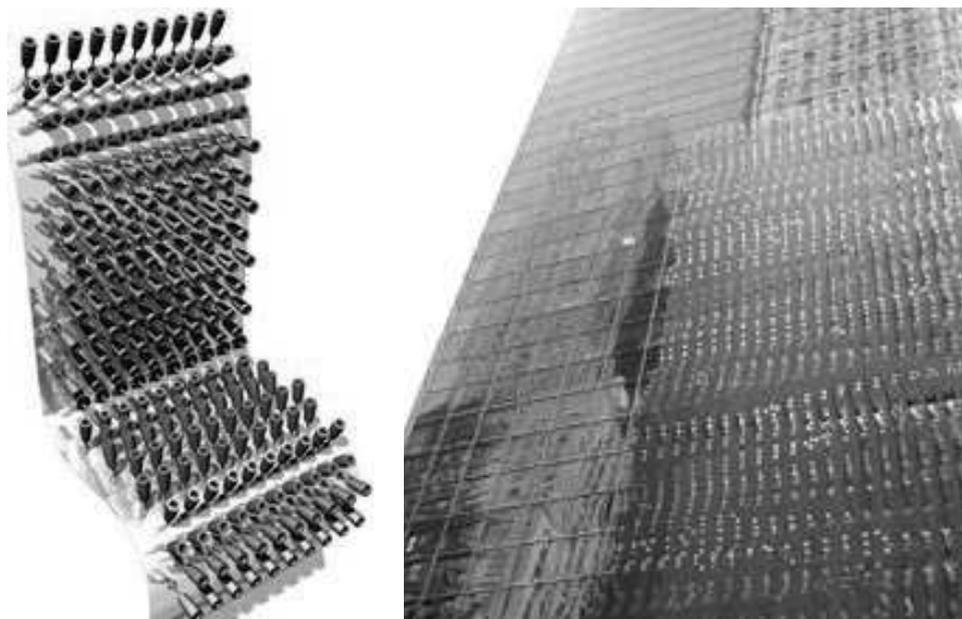


Fig. 4.3 e Fig. 4.4: Super Cilia Skin. Studiata dal MIT, è un sistema costruttivo di facciata interconnesso ispirato alla bellezza dell'erba soffiata dal vento. Composta da una serie di interruttori di attivazione controllati da computer, agganciati a una membrana elastica, Super Cilia Skin è una rete sensibile che funziona come dispositivo visivo e tattile di emissione dati, per varie tipologie di informazione.

Il sistema è progettato per dispositivi come la generazione di energia eolica o la visualizzazione su ampia scala di informazioni temporali. Realizzata in metal silicone non volatile (PDMS) la pelle può risuonare e comunicare movimenti passati per lungo tempo. A causa della sua omnidirezionalità può essere adattato ad oggetti di ogni dimensione.

Da BROWELL B., *Materiali complessi nell'architettura*, in *Materia* n. 58, Giugno 2008

Nell'ultima parte della trattazione interessata da questo capitolo abbiamo presentato materiali innovativi che pur potendo essere annoverati tra le superfici trasparenti garantiscono prestazioni tecnologiche in termini di efficienza energetica elevata. Si tratta di materiali che vengono da settori estranei all'edilizia ma che per le loro caratteristiche fisiche e grazie al trasferimento tecnologico tra settori produttivi trasversali hanno interessato le sperimentazioni architettoniche relative alle facciate trasparenti nell'ultimo decennio. Abbiamo scelto prodotti che propongono soluzioni interessanti sia in merito al processo di innovazione tecnologica che li ha interessati, sia in merito all'obiettivo di ridurre, attraverso la loro applicazione, i consumi energetici degli edifici.

Una nuova specie di materiali possiede la capacità di reagire a particolari condizioni ambientali. L'impulso reattivo deriva dalla volontà di ottenere un feedback sulle informazioni non tangibili che riguardano l'ambiente, di alterare le caratteristiche fisiche, di attivare meccanismi di protezione o di generare ulteriori risposte dinamiche. Come nella vita, i materiali che mostrano una complessità reattiva sono composti da tanti complessi sotto-materiali e componenti che lavorano insieme come in un sistema integrato.

Il Living's Kinetic Glass (vetro cinetico vivo), per esempio, è una superficie sensibile cinetica composta da gomma trattata con uretano e lega a memoria di forma che cambia conformazione quando una serie di flabelli, in grado di captare la presenza di CO₂ in eccesso nell'atmosfera, si arricciano o si aprono e chiudono. Il Kinetic Glass non ha motori o parti meccaniche. La superficie è sottile, leggera e trasparente. Quando gli squilibri atmosferici sono percepiti dal sistema, la superficie comincia a respirare, provocando un movimento di aria come segnale di problema.⁷

TIM, Aereogel, materiali a cambiamento di fase permettono di filtrare la radiazione solare incrementando i benefici legati alla sua componente luminosa ed a quella termica, garantendo quindi buone prestazioni anche in climi caratterizzati da una rilevante differenza di temperatura tra la stagione invernale e quella estiva, ovvero in quelle località geografiche caratterizzate da un clima mediterraneo dove grandi superfici trasparenti possono creare gravi situazioni di discomfort dovuto al carico termico proprio nei mesi con temperature più elevate.



Fig. 4.5 : Living Glass, immagine del prototipo

4.1 La ricerca e l'evoluzione dei componenti vetrati

«Nell'evoluzione del comfort termico domestico, grande importanza è riservata agli elementi in vetro; questi hanno rappresentato la discontinuità tecnologica più importante nell'evoluzione della vita domestica umana, che ha permesso di migliorare sensibilmente la qualità della vita all'interno delle costruzioni, rendendo possibili le ulteriori innovazioni che hanno caratterizzato l'evoluzione dell'architettura. Senza il vetro la 'casa' sarebbe rimasta una semplice tana da usare come rifugio, mentre gran parte della vita si sarebbe svolta all'esterno di questa. Secondo quanto descrive Plinio il Vecchio, il vetro fu scoperto per caso intorno al 5000 a.C. da mercanti Fenici che, sulla spiaggia di Belo, fusero soda e sabbia, generando delle perline di vetro. Il vetro, quindi, era noto anche nell'antichità, ma i suoi utilizzi erano confinati alla realizzazione di ornamenti e contenitori. Furono i romani ad utilizzare la prima volta lastre di vetro opache come finestre; le temperature raggiungibili allora erano troppo basse per avere vetro senza bolle d'aria o altre impurezze ed inoltre non si conosceva il modo per smerigliarlo e lucidarlo. Alla caduta dell'impero romano la tecnologia del vetro fu quasi dimenticata e ripresa soltanto durante il medioevo quando venne utilizzata per la realizzazione di vetrate colorate nelle cattedrali: queste erano costituite da piccoli frammenti di pasta vetrosa uniti tra loro da un'intelaiatura di piombo. Verso la fine del 300 iniziarono a diffondersi in tutta Europa le finestre impannate, caratterizzate da un'intelaiatura lignea che sosteneva una tela di lino impregnata di olio o cera: in questo modo si impediva al vento di entrare ma era anche preclusa la visione dell'esterno. Le finestre con i vetri cominciano a comparire nelle case borghesi delle principali città italiane soltanto nel '400, mentre nel '500 compare il vetro bianco. Tra le città che ebbero il primato nella lavorazione del vetro c'è Venezia; a partire dal 1291, infatti, si assiste alla produzione del vetro piano attraverso la tecnica 'del cilindro'.

Questa tecnica rimase la sola per parecchio tempo, fino a quando, nel 1700, venne inventato un sistema alternativo per la produzione di vetro piano. La fabbricazione per colata fu realizzata per la prima volta in Francia nel 1688, anni in cui si stava costruendo la reggia di Versailles, da una società che se ne assicurò il monopolio per il mercato interno; il successo fu tale che la fabbrica da Parigi venne trasferita a Saint-Gobain, dov'era disponibile una grande quantità di legname da utilizzare nei forni. Il processo consisteva nel versare vetro fuso su una tavola di metallo, distribuirlo uniformemente con rulli, cuocerlo e successivamente molarlo e lucidarlo. Era un processo che richiedeva una grande quantità di manodopera e il prodotto che ne risultava non presentava la brillantezza del vetro, così come noi la conosciamo; per la fabbricazione di vetro sottile, chiaro, trasparente lucido si usavano invece le tecniche cosiddette 'della corona' e 'del cilindro'.

La prima consisteva nel far ruotare velocemente una verga di ferro alla cui estremità era appesa una massa di vetro viscoso che, per effetto centrifugo, si assottigliava dilatandosi

Composizione del vetro		
Diossido di silicio	(SiO ₂)	69-74%
Ossido di calcio	(CaO)	5-12%
Ossido di sodio	(Na ₂ O)	12-16%
Ossido di magnesio	(MgO)	0-6%
Ossido di alluminio	(Al ₂ O ₃)	0-3%

Tab. 4.1 - -Composizione indicata dalla norma EN 572, parte 1

orizzontalmente. Il metodo ‘del cilindro’, usato a Venezia, consisteva invece nella formazione di grandi cilindri di vetro soffiato, tagliati lungo la generatrice e riportati in forno per la ricottura. Fino alla metà dell’800, la produzione del vetro piano per colata consisteva in sei fasi: preparazione della miscela, fusione, colata, cottura, molatura e lucidatura. Si trattava di un procedimento lungo, flessibile ma con costi di produzione molto alti. Le sei fasi prima descritte vennero per la prima volta unificate nel 1952 con l’introduzione del procedimento “float glass”. L’innovazione, apportata da tecnici della Pilkington, consisteva nella unificazione di tutte le fasi, adagiando il nastro continuo di vetro su un bagno di stagno fuso. Questo processo, grazie alle sue qualità, è quello oggi universalmente utilizzato per la produzione di lastre in vetro per l’edilizia.»⁸

Nel 1900 il vetro comincia ad essere prodotto per lavorazione a cilindro e sono immesse nel mercato edilizio lastre di 3,00 m x 12,00 m che permettono di tamponare grandi luci e di realizzare le prime facciate interamente trasparenti. Con la lavorazione attraverso il metodo float, che si diffonde a partire dagli anni ’50, il vetro è prodotto con processi industriali sempre più economici e veloci che permettono di utilizzare lastre di dimensioni notevoli (da 6,00 m x 19,00 m) che non hanno bisogno di altri processi di levigatura superficiale e di un’ulteriore ricottura, esso può subire delle trasformazioni che gli conferiscono quelle prestazioni meccaniche, termiche, acustiche ed estetiche richieste dall’architettura moderna e dal mondo del design.

Il vetro è un materiale isotropo, solido e amorfo, costituito da una miscela omogenea di varie sostanze a base di silicati. Assume una consistenza pastosa se riscaldato a una temperatura variabile fra i 1300 e i 1400 °C e diventa lavorabile intorno ai 1500 °C. Il processo di solidificazione che segue la lavorazione della massa fusa è lento e graduale al fine di evitare la formazione di tracce di cristallizzazione. Il componente essenziale della miscela è la silice, impiegata nella forma di sabbia silicea in percentuale pari o di poco superiore al 99,5%; altre sostanze, in percentuale dello 0,5%, vengono aggiunte per facilitare la fusione (fondenti), per rendere stabile la struttura del vetro, cioè per impedire la cosiddetta ‘devetrificazione’ (stabilizzanti), e per conferire particolari caratteristiche al materiale stesso (affinanti, coloranti, opacizzanti). Il fondente usato per il vetro comune è l’ossido di sodio, nella forma di carbonato; questo permette una



Fig. 4.6 (a sinistra): Galleria Mazzini, Genova, 1870 - 1880

Fig. 4.7 (a destra): Galleria Subalpina, Pietro Carrera, Torino, 1874

migliore fusibilità anche se peggiora la resistenza chimica data dalla silice. Per i vetri di maggior pregio, più brillanti, si usa il carbonato di potassio, anch'esso nella forma di carbonato, mentre per il 'vetro al piombo', conosciuto in tutto il mondo come cristallo, famoso per la sua brillantezza ed utilizzato spesso per la produzione di oggetti artistici, al carbonato di potassio si aggiunge ossido di piombo, nella forma di litargirio o di minio. Gli stabilizzanti usati sono ossidi di alluminio, di bario o di calcio.

Poiché tutti i componenti della miscela, e specialmente gli ossidi di ferro, presentano delle impurità, il vetro non si caratterizza quasi mai con un colore neutro e trasparente, ma possiede spesso una colorazione verde più o meno intensa; per attenuarlo si aggiunge alla miscela un decolorante (fra i più usati, il biossido di manganese, l'ossido di cobalto e l'ossido di selenio). Con l'aggiunta di quantità minime di talune sostanze si conferisce a tutta la massa vetrosa un colore omogeneo.

Le superfici trasparenti fanno da sempre rappresentato un elemento estetico fortemente connotante le architetture di tutti i secoli, il colore del vetro ha permesso, infatti, di utilizzare questo materiale per realizzare superfici artistiche che spesso hanno caratterizzato anche formalmente gli edifici a cui sono state applicate. In passato le vetrate colorate in pasta venivano utilizzate come schermo solare; anche se, causa l'elevato valore di assorbimento, i vetri colorati in pasta si riscaldano nella massa più intensamente rispetto ai vetri a controllo solare.

Il processo di cromatura più diffuso per le superfici trasparenti è il metodo di colorazione in spessore, che consiste nella colorazione in pasta della massa vetrosa in cui vengono incorporati gli ossidi di metallo. La tecnica della 'vetrofusione' consente di accoppiare un vetro colorato in pasta ad una lastra di vetro. Vetri di diversi colori vengono applicati a lastre di grandi dimensioni e 'fusi' in forni a 1500°C.

La pressofusione è una tecnica che trova applicazione sia nel settore delle vetrate per finestre che nel vetro ornamentale ma non nel settore dei vetri float. Infatti, risulta impossibile ad esempio lavorare una lastra sottoposta a vetrofusione come vetro di sicurezza per il fatto che, tramite il processo di fusione, la superficie soprattutto nei punti di cucitura non è sufficientemente piana. Le lastre ricavate da pressofusione trovano applicazione nel settore delle facciate sostanzialmente nelle intercapedini di vetrate isolanti. Al contrario, il vetro float se colorato in pasta può essere lavorato come lastra

Proprietà	Simbolo	Coefficiente numerico con rispettiva unità
Peso specifico a 18°C	r	2500 kg/mc
Durezza		6 unità secondo la scala di Mohs
Modulo elastico	E	7 x 10 ¹⁰ Pa
Modulo di Poisson	m	0,2
Calore specifico	c	0,72 x 10 ³ J/kg K
Coefficiente termico medio di dilatazione	a	9 x 10 ⁻⁶ K ⁻¹
Conducibilità termica	l	1 W/mK
Indice di rifrazione medio nel campo della lunghezza d'onda visibile da 380 a 780 nm	n	1,5

Tab. 4.2 - Produzione di componenti in vetro per le facciate. Fonte: HERZOG, T., KRIPPNER, R., LANG, W., Atlante delle facciate, Utet, Torino, 2005

monolitica di sicurezza, vetro temprato o stratificato di sicurezza. Durante il processo di raffinamento del prodotto non ci sono limitazioni nei confronti del vetrofloat neutro o senza colorazioni.

Accanto al vetro realizzato in vetrofusione e al vetro float, si produce industrialmente anche vetro colorato in pasta in 24 diverse colorazioni.¹⁰



Fig. 4.8: Innsbruck Town Hall, Dominique Perrault, Innsbruck, Austria, 2002

4.1.1 Isolamento termico

Dal punto di vista energetico, un edificio può essere considerato un sistema termodinamico nel quale si assiste alla trasformazione di energia, in particolare energia termica.

Le superfici trasparenti assolvono numerose funzioni, tra le quali:

- Permettono l'ingresso della luce naturale all'interno degli edifici garantendo migliori condizioni di illuminazione e notevoli risparmi energetici;
- Aumentano, grazie all'effetto serra, i guadagni solari all'interno degli ambienti, dando la possibilità di sviluppare applicazioni 'passive' ed 'attive';
- Permettono una migliore relazione tra utenti e ambiente esterno.

Attraverso i vetri non si hanno, quindi, solo perdite di calore ma anche dei flussi positivi dovuti all'irraggiamento solare (diretto, indiretto, riflesso). Infatti, con il termine di apporto 'gratuito' o 'passivo' dell'energia solare si intende normalmente il fatto che l'irraggiamento solare permette di ridurre il consumo di energia per riscaldamento e per l'illuminazione artificiale degli ambienti. Dalla radiazione solare che colpisce una vetrata, una quota parte passa direttamente attraverso il vetro stesso (trasmissione), mentre un'altra parte viene riflessa e la rimanente assorbita. La quantità di energia assorbita viene, quindi, in parte trasmessa verso l'interno (per irraggiamento nell'infrarosso o per convezione) e la restante parte viene dispersa verso l'esterno.

Normalmente per valutare la quantità di irraggiamento solare che penetra attraverso una lastra di vetro si ricorre al fattore solare (g) definito come il rapporto tra l'energia totale trasmessa dalla lastra di vetro e l'energia solare incidente sulla lastra stessa e a questa normale. Pertanto più il fattore solare di un vetro è basso (ad esempio del 25%) minore risulta la quantità di energia solare che passerà attraverso il vetro stesso. Al contrario ad un fattore solare elevato (ad esempio 85%) corrisponde una maggiore quantità di energia che filtra attraverso il vetro.

L'apporto solare non ha solo aspetti positivi, ma può al contrario generare situazioni di malessere igrotermico aumentando eccessivamente la temperatura interna dell'aria, oppure dando luogo a fenomeni di abbagliamento che modificano le condizioni di benessere ottico-luminoso.¹¹

Il vetro è trasparente alle radiazioni caratterizzate da una lunghezza d'onda molto bassa, mentre risulta essere opaco per radiazioni emesse con lunghezza d'onda elevata; questo fenomeno, noto come effetto serra, causa l'aumento della temperatura all'interno di ambienti confinati con grandi superfici trasparenti. Durante le stagioni fredde questi apporti energetici possono risultare utili mentre, nelle stagioni calde, possono determinare un eccessivo surriscaldamento interno.

Il vetro è inoltre soggetto a scambi di calore di notevole entità dovuti sia alla differenza di temperatura tra l'aria interna e quella esterna, sia a causa del ridotto spessore delle lastre. Un vetro singolo, a parità di differenza di temperatura, lascia passare una quantità di calore maggiore da cinque a dieci volte maggiore di una parete opaca dotata di isolamento medio.

Anche nel caso delle superfici trasparenti il parametro che permette di misurare l'efficienza in termini energetici di trasmissione del calore è la **trasmissione termica "U"**, cioè quel parametro che esprime la quantità di calore che attraversa un metro quadrato di superficie, per differenza di un grado, nel tempo unitario. Ad un basso valore di trasmissione corrisponde una minore quantità di calore che passa attraverso una superficie di scambio termico.

Le modalità secondo le quali avviene il passaggio di calore attraverso una lastra di vetro singolo sono sostanzialmente tre:

- Per irraggiamento (lunghezza d'onda lunga, campo dell'infrarosso) tra faccia interna del vetro, oggetti e corpi scaldanti (elementi riscaldanti, macchinari, corpo umano) e superficie delimitanti l'ambiente interno (pareti perimetrali, partizioni interne e pavimento),

Vetrata		Trasmissione luminosa	Sud U_{eq}	Est/Ovest U_{eq}	Nord U_{eq}
Isolante monocamera	Ug= 1,8 g = 0,70	0,81	0,12	0,540	0,960
Isolante monocamera	Ug= 1,3 g = 0,62	0,77	-0,188	0,184	0,556
Isolante monocamera	Ug= 1,1 g = 0,58	0,76	-0,292	0,056	0,404
Isolante bicamera	Ug= 0,7 g = 0,40	0,60	-0,260	-0,020	-0,020
Isolante tricamera	Ug= 0,3 g = 0,38	0,59	-0,612	-0,384	-0,156

Tab. 4.3 - Valore U dinamico per vetrate di vario tipo e orientamento

- Per convenzione con passaggio di calore tra la superficie trasparente e l'aria che la lambisce;
- Per conduzione attraverso lo spessore della lastra;

Il vetro presenta una conducibilità termica pari ad $1 \text{ W/m}^2\text{K}$ ed una resistenza termica (l'inverso della trasmittanza) che equivale praticamente allo spessore in metri della lastra. E' dunque evidente che per migliorare la resistenza termica del vetro è inutile aumentarne lo spessore, è invece determinante aggiungere una seconda lastra di vetro separata dalla prima da un'intercapedine d'aria, la quale presenta livelli di conducibilità relativamente più bassi rispetto a quelli del vetro, mentre la seconda lastra garantisce una maggiore resistenza termica allo scambio radiativo.

L'introduzione delle vetrate isolanti o 'vetri camera' risale all'inizio degli anni '70, dopo questa data l'industria legata alla lavorazione del vetro ed alla produzione di facciate trasparenti registra numerose innovazioni tecnologiche prevalentemente orientate ad incrementare le caratteristiche di isolamento termico del vetro.

Risulta fondamentale ridurre lo scambio di calore lungo il perimetro del vetro (bordo freddo), in prossimità del distanziatore che delimita e sigilla l'intercapedine d'aria tra esterno e interno. A tal proposito l'industria ha sviluppato e messo in commercio particolari intercalari 'caldi' per vetrate isolanti realizzati dall'unione di un sottilissimo foglio metallico, necessario per assicurare l'assoluta tenuta ai gas, ed un materiale sintetico plastico, il polipropilene, noto per la sua bassa conduzione del calore, utile sia come materiale di rinforzo sia per un migliore isolamento termico

Il flusso termico attraverso il vetro isolante viene determinato dai seguenti fenomeni:

- scambio di radiazioni tra le lastre a seguito di un potere di emissione della superficie della lastra per le termo radiazioni
- conduzione termica del gas nell'intercapedine
- convezione del gas nell'intercapedine
- conduzione termica aderenza sui margini

Tipo di vetrata	Trattamenti	Gas di riempimento	Trasmittanza termica (W/mqK)
Lastra semplice da 4 mm	-	-	5,9
Vetrocamera 4-15-4 basso emissivo + aria	-	Aria	2,7
Vetrocamera 4-15-4 basso emissivo + aria	Bassa remissività su una lastra	Aria	1,4
Vetrocamera 4-15-4 basso emissivo + gas	Bassa remissività su una lastra	Argon	1,1
Vetrocamera 4-15-4 basso emissivo + gas	Bassa remissività su una lastra	Kripton	1,0
Vetrocamera con tripla lastra 4-12-4 -12-4	Bassa remissività su due lastre	Aria	1,0
Vetrocamera con tripla lastra 4-12-4 -12-4	Bassa remissività su due lastre	Argon	0,8
Vetrocamera con tripla lastra 4-12-4 -12-4	Bassa remissività su due lastre	Kripton	0,5

Tab. 4.4 - Trasmittanza termica di alcuni tipi di vetro-camera basso emissivi. Da: CLAUDI DE SAINT MICHAEL A., Normative trasparenti, in Modulo 341, maggio 2008.

Attualmente le tecniche di controllo delle prestazioni termiche delle superfici trasparenti sono riassumibili in:

- Aumento dello spessore dell'intercapedine: l'ampiezza dell'intercapedine può essere portata fino a circa 15-16 mm, oltre questo valore l'eccessivo aumento degli scambi convettivi all'interno dell'intercapedine annulla la miglior resistenza termica offerta dall'aria;
- Introduzione di rivestimenti basso-emissivi: l'uso di rivestimenti basso-emissivi (depositi molecolari di metalli e/o ossidi metallici) sulla faccia interna della prima lastra o su quella esterna della seconda lastra permette di ridurre sensibilmente gli scambi per irraggiamento che avvengono tra le due lastre di vetro. All'interno dell'intercapedine di un "doppio vetro" gli scambi di calore possono essere imputati per il 60% a fenomeni di irraggiamento su lunghezze d'onda lunghe. L'introduzione di un rivestimento basso-emissivo (emissività in genere di 0,2) permette di ridurre lo scambio radiativi del 75%;
- Introduzione di gas inerti con bassa conducibilità: l'intercapedine dei vetri isolanti può essere riempita con argon od altri gas inerti che garantiscono valori di resistenza termica superiore;

Elementi trasparenti		Valore di U secondo EN 673	Trasmissione di luce diurna	Valore g secondo EN 410
Vetrata semplice	Vetro float	5,8	0,90	0,85
	Vetro float con rivestimento Low-E	3,8	0,67	0,62
	Vetro chiaro	5,8	0,92	0,92
	Vetro stratificato con deposito di protezione solare	5,8	0,75	0,52
Vetrata monocamera	Vetrata isolante, camera con aria	1,4	0,80	0,63
	Vetrata isolante, camera con argo	1,1	0,80	0,63
	Vetrata neutra a controllo solare, camera con argo	1,1	0,70	0,41
	Vetrata neutra a controllo solare, camera con argon	1,1	0,62	0,34
	Vetrata neutra a controllo solare, camera con argon	1,1	0,51	0,28
	Vetrata neutra a controllo solare, camera con argon	1,1	0,40	0,24
	Vetrata neutra a controllo solare, camera con argo	1,1	0,30	0,19
Vetrata bicamera	Vetrata isolante con 2 rivestimenti, camera con argon	0,7	0,72	0,50
	Vetrata isolante con 2 rivestimenti, camera con cripton	0,50	0,72	0,50
Vetrata tricamera	Vetrata isolante con 4 rivestimenti, camera con cripton	0,3*	0,59*	0,38*
Lastra nervata	Policarbonato	1,5*	0,70	0,60*

Tab. 4.5 - Valori di riferimento per alcuni elementi costruttivi trasparenti. Da: HEGGER M., FUCHS M., STARK T., ZEUMER M., Atlante della sostenibilità e della efficienza energetica degli edifici, UTET, 2008

- Realizzazione del vuoto all'interno dell'intercapedine: l'intercapedine può essere completamente o parzialmente svuotata del suo contenuto d'aria al fine di aumentare la resistenza termica.

Nel corso degli ultimi 10-15 anni l'industria del vetro ha sviluppato una serie di prodotti in grado di controllare efficacemente l'apporto energetico e luminoso dovuto al sole. E' dunque oggi possibile ricorrere a vetri colorati nella loro massa (assorbenti) e a vetri con depositi superficiali (riflettenti), entrambi selettivi alla luce solare.

Il particolare i vetri riflettenti¹² a controllo solare hanno la peculiarità di riflettere in modo selettivo l'irraggiamento solare, cioè di selezionare la radiazione solare, riuscendo a rifletterne verso l'esterno la componente energetica e lasciando filtrante quella luminosa. Il vetro riflettente trova quindi impiego dove è prioritario il controllo della radiazione solare. È colorato (argento, blu, verde), e prodotto con differenti gradi di riflessione, sia in lastra monolitica che in vetrate isolanti (vetrocamera).

La scelta tra un vetro colorato assorbente (generalmente tra 35-75% della radiazione incidente) e uno riflettente, non può e non deve essere dettata da ragioni estetiche come spesso accade. Le conseguenze, non facilmente arginabili, di una scelta superficiale sono: nel caso di vetro riflettente, un'elevata riduzione della radiazione d'ingresso (soprattutto luminosa), fattore che lo rende poco adatto per ambienti che richiedono molta illuminazione o apporti solari invernali. L'effetto specchio può produrre inoltre fastidiosi riflessi per l'ambiente urbano circostante, fino a causare veri e propri fenomeni di abbagliamento.

Particolare sviluppo, e crescente importanza, hanno i vetri selettivi, con proprietà di basso emissività e a controllo solare ottenuti mediante deposito magnetronico di più strati di ossidi metallici e metalli ottenuti per polverizzazione catodica sottovuoto spinto. Questi vetri hanno dunque la peculiare proprietà selettiva di controllo sia dei flussi termici per irraggiamento che quelli di trasmissione diretta. Le pellicole introdotte all'interno delle intercapedini creano un sistema di vetrate isolanti a due

TIPOLOGIA	DESCRIZIONE
Vetri riflettenti	Vetri selettivi antisolari a cui vengono aggiunti su una delle facce degli strati di ossidi metallici in grado di riflettere parte della radiazione incidente e modificare lo spettro della radiazione in entrata.
Vetri basso-emissivi	Vetri sulla cui faccia interna vengono depositati dei metalli nobili o ossidi metallici per aumentare la capacità di riflettere all'interno dell'ambiente la radiazione termica a maggiore lunghezza d'onda e dunque di trattenere il calore prodotto dall'effetto serra o da altre fonti di calore.
Vetri assorbenti	Vetri antisolari a cui vengono aggiunti in fase di produzione dei componenti chimici in grado di aumentare la capacità di assorbimento luminoso. L'elevato coefficiente di assorbimento termico determina spesso il surriscaldamento.
Vetri isolanti	Pannelli costituiti da due o più lastre di cristallo unite al perimetro con materiale plastico o metallico, in modo da ottenere tra le lastre un'intercapedine d'aria disidratata.

Tab. 4.6 – Analisi delle caratteristiche dei vetri selettivi statici

o tre intercapedini, senza penalizzare lo spessore e il peso del volume vetrato. Questa stratificazione dà un livello di isolamento termico superiore agli altri tipi di vetro camera. I valori di trasmittanza termica che si possono raggiungere scendono da 1,3 W/m^2K (valore di vetrata isolante con intercapedine di 15,00 mm e gas speciale) fino a 0,5 W/m^2K (paragonabile alle prestazioni isolanti di un muro standard 50,00 cm). Queste vetrate bloccano dal 96,0 al 99,5% dei raggi infrarossi invisibili, filtrando il calore solare senza causare la perdita di luce naturale. In questi sistemi, il film interposto funge da taglio termico; la temperatura interna dei vetri rimane quindi sufficientemente alta anche nei periodi più freddi, così da evitare il pericolo di condensa (causata dall'umidità interna dell'abitazione a contatto con le superfici fredde dei vetri).

La possibilità di poter regolare la trasmittanza e la riflettanza di un componente vetrato ci permette di poter massimizzare il guadagno solare attraverso la scelta del giusto elemento trasparente: in climi freddi è possibile trattare la superficie vetrata con metalli che generano un comportamento trasparente della superficie, mentre, in climi caldi, il rivestimento potrà essere realizzato in modo da ottenere il passaggio dallo stato trasparente a quello riflettente verso la fine del visibile.

Con i vetri basso-emissivi è possibile ridurre anche la componente conduttiva della trasmissione termica, utilizzando miscela di gas con una conduttività minore, quali argon, kripton e freon, applicati con leggera depressione. L'utilizzo di questa soluzione vetrata, dal costo relativamente limitato, permette di conseguire un ottimo risparmio economico ed il relativo risparmio energetico ad esso correlato. E' stato, infatti, calcolato che l'utilizzo di queste componenti vetrate permetterebbe la riduzione, nella sola Europa, di 3,5 milioni di tonnellate di anidride carbonica emessa.

Si ricordano inoltre i vetri evacuati caratterizzati da un'intercapedine, racchiusa tra due lastre dotate di rivestimenti basso-emissivi, da cui viene aspirata l'aria fino al raggiungimento di una pressione assoluta di circa sette atmosfere. Grazie a questa conformazione gli scambi convettivi tra le lastre sono completamente assenti, mentre gli scambi radioattivi risultano essere ridotti grazie al rivestimento selettivo.



Fig. 4.9: Bolla di vetro, Renzo Piano, Genova, 2001

Per evitare che, a causa della depressione sviluppata, le due lastre collassino l'una sull'altra, è necessario disporre dei piccoli sistemi di separazione chiamati pillars, realizzati solitamente in indio, capaci di reagire bene alle sollecitazioni di compressione atmosferica; vengono disposti su una maglia regolare dalle dimensioni praticamente invisibili ad occhio nudo (solitamente 40 mm per 40 mm). Le prestazioni di questi componenti sono eccellenti, in quanto si riescono a raggiungere trasmissioni termiche di 0,6-0,8 W/m²K, mentre la loro realizzazione è ancora a livello prototipale in quanto esistono problemi sulle guarnizioni laterali e sulla disposizione dei pillars. Attualmente il governo tedesco ha finanziato due ricerche per promuovere l'applicazione di questi innovativi materiali nel settore edilizio, attraverso ottimizzazione della lastra di vetro e del profilo, l'obiettivo è quello di introdurre entro il 2011 dei componenti finestrati innovativi con un prezzo simile a quello degli infissi a triplo vetro. La ricerca tecnologica si sta inoltre spingendo verso soluzioni ancora più innovative dove, attraverso sistemi computerizzati, si vorrebbe ripristinare il gas nobile oppure l'aria all'interno dell'intercapedine durante la stagione invernale ed aspirarlo, producendo il vuoto, durante la stagione estiva.

4.1.2 Isolamento acustico

La percezione del suono da parte dell'uomo è un fenomeno assai complesso e soggettivo rispetto al quale subentrano aspetti psicofisici legati alle caratteristiche dell'orecchio, ed alla trasformazione da parte del cervello dell'energia acustica trasmessa nella sensazione acustica. Normalmente il livello di pressione sonora percepibile da parte dell'orecchio umano può variare da 20 dB (soglia uditiva) e 140 dB, pressione alla quale coincide la soglia del dolore.

Per la salvaguardia della salute degli utenti oggi giorno le normative vigenti impongono severi limiti in materia di isolamento acustico degli edifici con particolare riferimento ai rumori trasmessi principalmente per via aerea quali, ad esempio, il rumore del traffico stradale, ferroviario ed aereo.

L'isolamento acustico di un edificio è definito da un indice che rappresenta la differenza tra il rumore interno e quello esterno. Il vetro contribuisce all'isolamento acustico di un edificio in termini di potere fonoisolante, cioè in termini di capacità di ridurre la trasmissione di energia sonora tra l'ambiente esterno e quello interno. L'isolamento acustico di un elemento da costruzione è rappresentato dall'indice di attenuazione (R). Pertanto, nella progettazione di un edificio si devono scegliere opportunamente gli indici di attenuazione R di ciascun elemento costruttivo al fine di ottenere il valore complessivo richiesto di DnT (isolamento acustico normalizzato).

Nel caso di un vetro monolitico il potere fonoisolante dipende fondamentalmente dalla massa e dalla frequenza del suono incidente. Secondo questa espressione il potere fonoisolante aumenta di 6 dB al raddoppiare della massa o della frequenza del suono incidente; questo andamento del potere fonoisolante vale solo per frequenze contenute tra la frequenza di risonanza e quella di coincidenza; in pratica ogni materiale presenta

Norma UNI EN 1279 Parte 1, Vetro per l'edilizia - Vetrate Isolanti, 2004 è la norma di prodotto per le vetrate isolanti che definisce le vetrate isolanti e assicura per mezzo della valutazione della conformità alla presente norma che, nel tempo: - sia garantito il risparmio di energia perché il valore U e il fattore solare non cambiano significativamente;- sia preservato il benessere perché l'isolamento acustico e la visione non cambiano significativamente;- sia assicurata la sicurezza perché la resistenza meccanica non cambia significativamente.

una frequenza critica in corrispondenza della quale vibra molto di più e quindi trasmette il rumore in modo più sensibile. In sintesi il potere fonoisolante è variabile in funzione della frequenza del suono incidente (rumore sorgente); ecco perché, al fine di ovviare a questa situazione si è creato un parametro normalizzato: $R_w(C, C_{tr})$, potere fono isolante dei serramenti. Gli indici rappresentano le correzioni che è necessario introdurre in funzione del tipo di rumore sorgente. L'indice "C_{tr}" si applica in caso di rumori dovuti al traffico, mentre per altri tipi di rumore viene adottata la correzione "C".

Per quanto riguarda i coefficienti di isolamento del vetro si ottengono migliori risultati con l'utilizzo di lastre di vetro stratificate di spessore diverso, in quanto lo strato di film plastico (PVB) interposto tra i vetri costituisce una sorta di ammortizzatore acustico. I vetri doppi presentano in generale un potere fonoisolante superiore a quelli monolitici, ma direttamente influenzato dalla dimensione dell'intercapedine tra una lastra e la successiva e dal loro spessore. Se l'intercapedine è ridotta a pochi millimetri le due lastre si comportano come un vetro monolitico di massa equivalente, mentre il potere fonoisolante è maggiore quando l'intercapedine ha spessore di circa 10,00 – 12,00 mm.

La prestazione acustica di un doppio vetro migliora sensibilmente se vengono impiegati vetri di diverso spessore i quali, avendo modi propri di vibrare, comportano una minor riduzione del potere fonoisolante in corrispondenza delle zone di risonanza e di coincidenza in quanto, ad esempio, mentre una lastra va in risonanza l'altra conferisce stabilità acustica al comportamento del sistema.

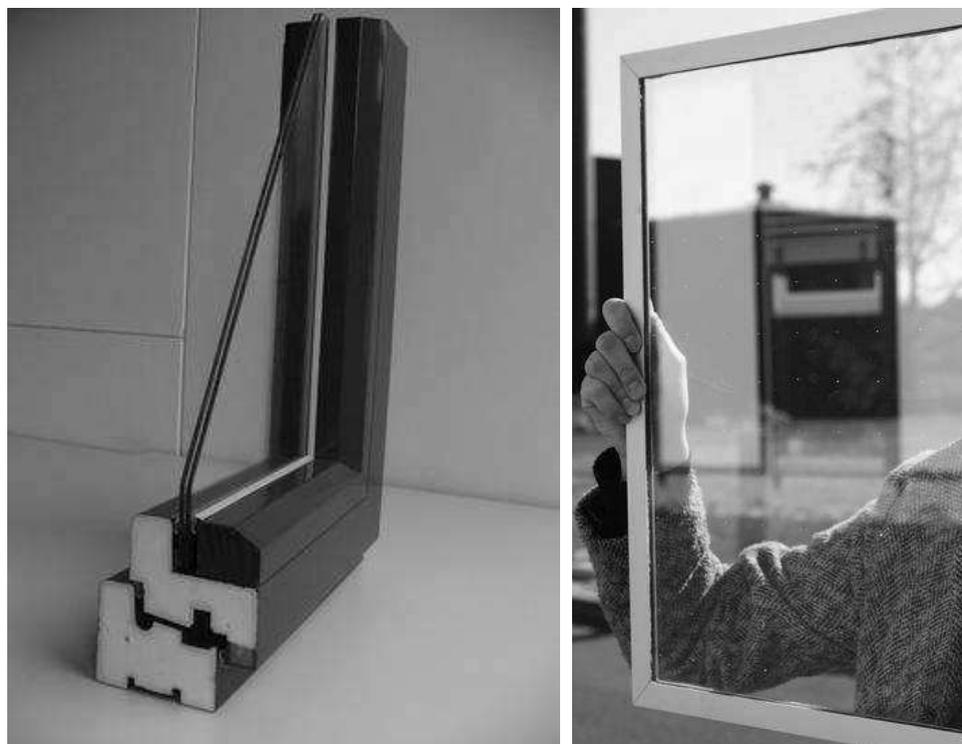


Fig. 4.10: Prototipi di finestra con vetro vacuo TopTherm 90 presentati a Dusseldorf nel 2008

4.1.3 Sicurezza

Garantire la sicurezza degli occupanti all'interno degli edifici è un fattore progettuale di primaria importanza. Gli inglesi usano distinguere tra due tipi di sicurezza:

- **Safety**; riferito all'insieme delle precauzioni atte a prevenire rischi ed eventuali danni a persone e/o cose provocate da cause accidentali o naturali. Per quanto attiene il campo della sicurezza in uso dei prodotti (safety), porte e finestre sono fra gli elementi di un'opera edilizia normalmente più soggetti a contatto e a manipolazione da parte degli utenti; elevata risulta pertanto la probabilità di urti contro i serramenti tali da provocare la rottura delle vetrazioni e conseguenze di entità variabile: si va dalla semplice necessità di sostituzione della lastra frantumata, alle ferite a persone e/o danni ai beni fino al più grave rischio di caduta del vuoto delle persone, di oggetti e/o di spezzoni di vetro.
- **Security**; relativo alle misure di cautela contro atti premeditati ed intenzionali ad opera umana. In questo settore rientrano invece quelle tipologie di rischio che derivano dalla necessità di dover prevedere prodotti in grado di fornire prestazioni speciali quali, ad esempio, di resistenza ai proiettili, alle effrazioni ed alle esplosioni.

Ovviamente il grado di protezione offerto dal vetro è in funzione del tipo di rischio dal quale ci si vuole cautelare, individuati sinteticamente in:

- Protezione dal rischio di ferite in caso di urti accidentali;
- Protezione dal rischio di caduta di oggetti su coperture vetrate;
- Protezione dal rischio di caduta nel vuoto di persone;
- Protezione dagli atti vandalici e dalle effrazione di primo livello;
- Protezione da proiettili di fucili a palla.



Fig. 4.11: Louvre, Piramide, progetto di Ieoh Ming Pei, Parigi, 1989

Nel campo della sicurezza trovano oggi applicazione:

- I vetri temprati termicamente; si tratta di vetri sottoposti ad un trattamento termico che rende, in caso di rottura, i frammenti di piccole dimensioni e con bordi non taglienti, in modo tale da risultare inoffensivi alle persone. I vetri temprati possono essere efficacemente impiegati per garantire la protezione dalle ferite ma non la protezione dalla caduta nel vuoto.
- I vetri stratificati sono caratterizzati dall'inserimento di un foglio di plastica (il polivinilburrinale, PVB) tra due o più lastre di vetro, il quale conferisce al materiale trasparente particolari caratteristiche di sicurezza. Infatti, in caso di rottura del vetro a causa di urto accidentale o intenzionale, il foglio di plastica ha la capacità di trattenere i frammenti di vetro evitandone il distacco e quindi la loro caduta, mantenendo la sostanziale integrità del vetro. La stratificazione oltre ad attribuire al vetro elevate caratteristiche meccaniche, permette di realizzare soluzioni tecniche particolarmente "raffinate" nel campo della sicurezza nell'uso.

4.1.4 Le finiture superficiali

L'architettura delle facciate, così come l'interior design, punta oggi su vetri dalle sfumature sottili e dalle decorazioni che mischiano sapientemente colori, forme e materiali.

E' questo il caso dei vetri stampati, satinati, serigrafati, laccati e stratificati sia colorati che decorati. I vetri acidati o satinati (ad incisione chimica) sono vetri trattati chimicamente con dell'acido il quale, incidendo la superficie della lastra, la rende traslucida permettendo la realizzazione di decorazioni artistiche delicate e accurate. L'incisione chimica non altera le caratteristiche della lastra di vetro float ma ne modifica unicamente la superficie permettendo di realizzare texture personalizzate: satinare uniformi oppure mosse da motivi in leggero rilievo o in bassorilievo, coprenti o semicoprenti, perfettamente lisce o leggermente ruvide al tatto.

La serigrafia è un processo ampiamente usato nell'industria del vetro per decorare a smalto, con disegni e scritte, le superfici delle lastre. La tecnica si basa sulla riproduzione del decoro voluto sulla superficie del vetro per mezzo di un telaio serigrafico sul quale viene steso, per mezzo di una spatola, un sottile strato di smalto, di vernice oppure d'inchiostro. Il materiale così steso passa attraverso le sottili maglie e si deposita sulla superficie del vetro riproducendo fedelmente il disegno desiderato.

I vetri smerigliati e serigrafati sono precompressi; una serigrafia realizzata senza trattamento termico è possibile solo con colori organici bi-componenti resistenti ai graffi. Fondamentalmente tutti i vetri piani possono essere serigrafati o smerigliati e sottoposti ad un processo che faccia acquisire i requisiti dello stratificato. La migliore qualità cromatica si ottiene, però, con il vetro bianco o vetro povero di ossido di ferro.

Il nuovo brevetto Vetrina Color dell'austriaca Sunwin, propone l'accoppiamento di un vetro di sicurezza colorato ad un pannello isolante in legno-cemento, garantendo per spessori dell'ordine di 15,00 cm valori di trasmittanza termica pari a 0,10 W/m²K. Le buone prestazioni termiche sono garantite dalla presenza di un condotto di ventilazione tra la superficie trasparente e lo strato di coibentazione; la modularità lo rende facilmente integrabile in vari sistemi di facciata.

Dobbiamo tuttavia ricordare che il vetro colorato comporta alcuni svantaggi legati alla temperatura dell'ambiente confinato che rimane costante durante tutto l'arco dell'anno; inoltre durante le giornate nuvolose o durante la notte, in inverno, il vetro è freddo, provocando l'abbassamento eccessivo della temperatura in prossimità della vetrata,

questo fenomeno può essere contrastato attraverso un sistema di condizionamento meccanico per rendere la temperatura dell'aria di questa zona più simile a quella del resto dell'ambiente, con l'incremento dei consumi energetici dell'edificio.

Vetri di colore blu-verde possono causare problemi legati ad una scarsa illuminazione naturale degli spazi interni, con la necessità di ricorrere all'illuminazione artificiale anche in giornate di sole; questa problematica è causata dal fatto che le lastre di vetro colorate filtrano la componente luminosa della radiazione solare trasformandola in una fonte di luce "fredda", fastidiosa per gli utenti.

4.2 Materiali trasparenti innovativi

4.2.1 Attivi: fotovoltaici, elettrocromici, fotocromatici

Nell'ambito dei prodotti che trovano spazio nell'articolato mondo delle costruzioni senza dubbio il vetro occupa un ruolo fondamentale per ricerca e sviluppo di nuove strategie, idee e realizzazioni. Il rapporto tra innovazione tecnologica e applicazioni si sviluppa in questo settore in piena sinergia con i processi di ricerca scientifica, orientata a sviluppare materiali capaci di garantire elevate prestazioni nel settore del risparmio energetico, del confort e delle caratteristiche performanti sotto il profilo della selettività e della bassa emissività. Le ricerche più innovative sono volte al miglioramento delle prestazioni energetiche del materiale, così da avvicinarne il comportamento termico a quello dei materiali solidi ed opachi, pur mantenendo inalterate le sue caratteristiche di trasparenza alla luce solare.

Un settore nel quale il vetro sta trovando largo uso è quello del fotovoltaico, dove garantisce ottimi risultati in termini di integrazione architettonica. Ormai da un decennio sono diffusi pannelli fotovoltaici semitrasparenti, che integrando le celle

Tipo di vetro	Comportamento termico	Bilancio energetico	Luminosità	Bilancio energetico
Vetro colorato	Estate: il vetro e la zona circostante si riscalda fino a 40°C. si diffonde aria fredda // alla superficie del vetro. Inverno: il vetro e la zona circostante sono molto freddi. Si diffonde aria calda // alla superficie del vetro	Spreco di energia per migliorare il confort e rendere la temperatura in queste zone più simile a quella degli ambienti climatizzati	Soprattutto con vetro blu-verde: temperatura di colore troppo alta, la luce naturale viene percepita troppo fredda, fastidiosa e si accende la luce artificiale	Speco di energia per l'uso di luce artificiale in momenti della giornata in cui non sarebbe necessario
Vetro trasparente	In inverno si comporta come il vetro colorato	In inverno spreco di energia per migliorare il confort	Abbagliamento. In estate gli schermi oscuranti sempre abbassati determinano la necessità di utilizzare la luce artificiale	Spreco di energia per l'uso di luce artificiale in momenti della giornata in cui non sarebbe necessario

Tab. 4.7 - Pareti in vetro: scheda della sostenibilità. Da: BUTERA F. M., La trasparenza è sostenibile?, in Modulo, Febbraio 2006

di silicio all'interno di un vetro stratificato garantiscono la possibilità di tamponare superfici verticali e orizzontali trasformandole in elementi captatori e senza incidere sulla trasparenza della vetrata.

Le celle fotovoltaiche semitrasparenti garantiscono una trasmissione luminosa compresa tra lo 0 ed il 30%, raggiungendo un'efficienza dell'8%. Le caratteristiche elettriche sono fondamentalmente equivalenti a quelle delle celle tradizionali in silicio cristallino; il materiale di base è silicio multicristallino e le dimensioni della cella solare sono di 10 cm x 10 cm; la forma è quadrata di colore standard, blu scuro. La trasparenza della cella è data dalla presenza di buchi creati in fase di lavorazione.¹³

L'integrazione architettonica dei sistemi fotovoltaici rappresenta una delle sfide tecnologiche più importanti del settore per i prossimi anni: l'attenzione all'efficienza energetica, l'estetica delle soluzioni e la riduzione dei costi di manutenzione costituiscono i principi basilari dell'edilizia contemporanea sostenibile.

La ricerca tecnologica nel settore del fotovoltaico, sospinta dagli obiettivi di una sempre più efficace integrazione architettonica dei componenti FV, ha portato alla realizzazione di celle FV colorate, in cui l'elemento colorante non è un fattore "sovrapposto" alla stessa cella ed indipendente dal suo funzionamento, ma bensì un elemento costitutivo fondamentale nel funzionamento di conversione fotovoltaica della cella solare.

Questa specifica tecnologia presenta differenti vantaggi, alcuni immediati ed altri potenziali e legati allo sviluppo della tecnologia stessa, in termini di peso ridotto, flessibilità d'uso, maggiore facilità di produzione (con processi di stampa per la deposizione dello strato di colorante), minori costi di produzione, correlati ai minori costi dei materiali utilizzati. Il semiconduttore TiO₂, si trova abbondantemente in natura e pertanto è caratterizzato da costi di produzione particolarmente bassi. Inoltre presenta caratteristiche di atossicità e biocompatibilità. Anche per le caratteristiche di funzionamento vi sono molti vantaggi, legati alle migliori prestazioni di conversione, rispetto al fotovoltaico in silicio cristallino, nelle condizioni di bassa illuminazione e/o di



Fig. 4.12 e 4.13: Applicazione del sistema Vetrina Color della Sunwin. Pannello solare termico con isolante termico.

illuminazione diffusa. Tali caratteristiche consentono di avere un buon comportamento di conversione anche con orientamenti non ottimali ed in condizioni di cielo nuvoloso. Inoltre vi sono minori problematiche nel caso di parziale ombreggiamento del modulo FV. Le colorazioni ottenibili delle celle solari e quindi dei moduli FV risultano diverse e determinano elevate possibilità di integrazione architettonica soprattutto in rapporto ai componenti di frontiera verticali esterni dell'involucro edilizio.¹⁴

Di recente sono stati immessi sul mercato degli innovativi gel fotovoltaici trasparenti da iniettare all'interno dei doppi vetri, o in formato spray per vetrate singole. Si tratta di una sostanza amorfa a base liquida, al cui interno viene innescata una struttura cristallina di silicio; il gel risulta trasparente o, all'evenienza, leggermente pigmentato con colore blu. Presso il MIT di Boston è allo studio un coating colorato a base organica, sensibile alla luce, da applicare all'interno di vetri, porte e finestre. Questa vernice trasparente sarebbe in grado di intercettare l'energia solare su un'ampia superficie e di concentrarla lungo la cornice del telaio, dove trovano posto delle celle fotovoltaiche in grado di trasformare la radiazione solare in energia. La finestra colorata si comporta, quindi, come un concentratore solare, migliorando l'efficienza delle celle di un fattore 40" rispetto ad una cella tradizionale.¹⁵

Anche i pannelli solari termici possono essere installati in facciata o in copertura, in modo complanare alla superficie d'involucro, diventando dei veri e propri elementi di tamponamento edilizio. Le applicazioni più frequenti registrate sino ad ora si trovano in Germania ed in Austria e riguardano sistemi ad acqua o ad aria. Nella facciata con i pannelli solari integrati, l'elemento 'captante' garantisce un buon isolamento termico, poiché il pannello solare è sempre costituito da una scatola in alluminio con una parte coibentata per evitare dispersioni di calore dai tubi di rame, dove scorre il liquido termovettore. I pannelli solari, a differenza dei pannelli fotovoltaici non necessitano di ventilazione della parte a contatto con un eventuale tamponamento opaco. I collettori solari integrati in facciata garantiscono una buona produzione durante tutto l'arco dell'anno (a fronte di una riduzione della produzione di acqua calda sanitaria di circa il 30% rispetto ad un pannello con un'inclinazione ottimale verso sud) soprattutto in zone scarsamente soleggiate dove il contributo di superfici riflettenti (naturali e artificiali, quali specchi d'acqua, neve o materiali riflettenti) può incrementarne la resa anche in condizioni climatiche sfavorevoli.

I vetri autopulenti e idrorepellenti sono costituiti da lastre su cui è depositata una couche trasparente di un materiale fotocatalitico e idrofilo. L'azione autopulente, dipende sia dalla natura della sporcizia e dell'inclinazione dei vetri che dal processo di fotocatalisi che si attiva sulla superficie del vetro grazie all'azione dei raggi UV che provocano la decomposizione dei residui organici dello sporco depositato. Grazie a questa azione idrofila le gocce di pioggia si distribuiscono sulla superficie del vetro sotto forma di sottile film, facilitando la rimozione dello sporco e quindi allungando sensibilmente gli intervalli di pulizia delle superfici vetrate.

Il vetro elettrocromico o a cristalli liquidi (LCD) è caratterizzato da una superficie che cambia colore al variare della temperatura e della luce, e che può diventare supporto per retroproiezioni durante le ore notturne.

Una superficie che cambia colore al variare della temperatura è un esempio di trasformabilità paragonabile alla reazione dinamica di una 'pelle sensibile' che in relazione alle condizioni termiche dell'ambiente, con cui è entrata in contatto, reagisce in funzione della sua disponibilità programmata al cambiamento.

Un dispositivo elettrocromico, è generalmente costituito da tre o cinque strati diversi. In un dispositivo a tre strati per esempio, lo strato centrale è un conduttore di

ioni o elettrolita che presenta la caratteristica di perdere ioni, quando è messo a contatto con la corrente elettrica. Lo strato centrale è compreso tra altri due strati costituiti da un film elettrocromico (elettrodo) e da uno strato preposto all'accumulo di elettroni (controelettrodo).

I due strati esterni, sono costituiti da materiali conduttori trasparenti, anche se lo strato per l'accumulo di elettroni e il conduttore trasparente possono essere incorporati in un unico strato.

Il fenomeno dell'elettrocromatismo si manifesta in parecchi composti inorganici, quali ossidi di tungsteno, molibdeno, titanio, nickel, cobalto ecc., ed organici, quali polimeri e viologeni. Nei composti inorganici l'effetto elettrocromico avviene per effetto della contemporanea iniezione o estrazione di ioni ed elettroni, che genera un cambiamento della densità degli elettroni nello stato elettrocromico, mentre nei composti organici il cambio di colorazione si raggiunge per effetto di una riduzione di ossido, spesso associata ad altre reazioni chimiche.

Uno dei maggiori vantaggi di questi dispositivi è quello di adattarsi alle applicazioni di grandi dimensioni, in quanto, interrompendo l'alimentazione elettrica, questi materiali mantengono il loro stato per lunghi tempi (effetto memoria a circuito aperto).

È possibile collocare lastre LCD all'interno di facciate continue esposte a sud nei punti maggiormente interessati dalla radiazione solare diretta.

L'utilizzo di cristalli liquidi consente un duplice utilizzo: quello di ottenere totale trasparenza o opacità della facciata stessa nelle diverse ore della giornata ed a seconda del diverso utilizzo degli ambienti e la possibilità di retroproiettare immagini statiche o in movimento sulla facciata con il risultato finale di promozione ed auto sponsorizzazione.

Il Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE) ha recentemente sviluppato una nuova tecnologia per la realizzazione di vetri fotoelettrocromici destinati ad applicazioni edilizie, che ne riduce sensibilmente i costi, ne semplifica la produzione e assicura la durabilità e la reversibilità per lungo tempo del processo di variazione della trasparenza.

Sulla lastra vengono depositati uno strato trasparente elettroconduttivo, che funge da 'elettrodo trasparente', poi uno strato elettrocromico in ossido di tungsteno e quindi uno strato nanoporoso di ossido di titanio, che funziona da materiale fotovoltaico e fornisce l'energia per alimentare l'elettrocromatismo. Si ottiene un vetro che senza necessità di alimentazione energetica da fonte esterna reagisce alle condizioni



Fig. 4.14 e 4.15: Vetro con applicazione di gel fotovoltaico

ambientali, inscurendosi progressivamente quanto più è illuminato, fino a limitare del 62% la trasmissione della luce visibile dopo 15 minuti di esposizione al sole, per poi tornare progressivamente all'originaria trasparenza al ridursi dell'irraggiamento.¹⁶

In commercio si trovano inoltre i vetri termocromici, materiali trasparenti che hanno la capacità di modificare le loro proprietà ottiche in funzione di una variazione di temperatura che avviene sulla loro superficie. Questo fenomeno è determinato da una reazione chimica reversibile nel momento in cui le condizioni termiche rientrano in una condizione statica per la reattività chimica.

Il comportamento termocromico si può avere con svariati composti organici e con diossidi metallici, i quali hanno la capacità di trasformarsi in conduttori quando raggiungono determinate temperature. Consideriamo ad esempio l'ossido di Vanadio: al raggiungimento della temperatura critica di 70 °C il semiconduttore giunge ad uno stato metallico; questo permette al materiale una maggior capacità riflettente rendendolo più sensibile alla variazione dell'infrarosso. Per ridurre sempre più la temperatura critica del materiale, si stanno sperimentando particolari gel da inserire all'interno di due strati.

Nel 1970 è stato inventato il "Clou-Gel", che consiste in un sottile strato di soluzione acquosa polimerica racchiusa tra due pellicole plastiche.

Durante la stagione invernale un composto simile genera una superficie vetrata trasparente mentre, in una giornata estiva, il maggior guadagno solare provoca l'oscuramento del materiale.



Fig. 4.16 e 4.17: Uffici e Laboratori BIOTOP, arch. George Reimberg, Vienna, 2002. La parete vetrata nella zona delle scale è interrotta dalla superficie blu-viola riflettente dei collettori solari ad acqua che garantiscono il fabbisogno di acqua calda sanitaria per gli uffici e per il laboratorio. Sia l'impianto a collettori, sia l'edificio stesso sono stati progettati in modo che il rimanente fabbisogno di calore possa essere fornito da un impianto a biomassa dimensionato esattamente sul volume di scarti (dall'attività produttiva e dalla manutenzione del verde circostante) disponibili in loco.

	Elettrocromici	A cristalli liquidi
Tipo di trasformazione	Cambiamento delle proprietà ottiche in modo persistente e reversibile sotto l'azione di un campo elettrico	Un campo elettrico attivato da due elettrodi trasparenti cambia l'orientamento delle molecole di cristalli liquidi incapsulate nel materiale polimerico
Aspetto esterno e colorazione	Stato attivato: trasparente disattivato: colorato (blu, grigio, porpora, ecc.)	Stato attivato: trasparente disattivato: diffondente
Proprietà ottiche	<p>Possibilità di modulazione delle proprietà ottiche variando l'intensità del voltaggio elettrico applicato</p> <p>Fattore di trasmissione solare</p> <ul style="list-style-type: none"> - stato trasparente: 50-70% - stato disattivato: 10-20% <p>Fattore di trasmissione luminosa</p> <ul style="list-style-type: none"> - stato trasparente: 50-70% - stato disattivato: 10-20% <p>Contrasto in trasmissione solare da 1/2 a 1/6</p>	<p>La trasmissione luminosa può essere quasi costante nei due stati diffuso e attivato fattore di trasmissione solare</p> <ul style="list-style-type: none"> - stato trasparente: 79-80% - stato disattivato: 44-60% <p>Fattore di trasmissione luminosa</p> <ul style="list-style-type: none"> - stato trasparente: 60-80% - stato disattivato: 40-60%
Proprietà elettriche	<p>Tensione di alimentazione: 1-5 V</p> <p>Tempi di risposta: 1-60 sec.</p> <p>Memoria: fino a 12-48 ore</p>	<p>Tensione di alimentazione: 30-100 V</p> <p>Tempi di risposta: estremamente rapidi</p> <p>Non hanno capacità di memoria</p>
Durabilità	<p>Numero di cicli: 4000-6000 (5 cicli al giorno)</p> <p>Anni di vita: 2-4 anni</p>	
Vantaggi	<ul style="list-style-type: none"> - ampia possibilità di modulazione della trasmissione luminosa - ampia possibilità di modulazione della trasmissione solare ed energetica (architettura energeticamente efficiente) - sono comandabili dall'utenza (manualmente o tramite PC) - richiedono energia elettrica solo al momento dall'attivazione - possiedono lunga memoria - necessitano di un piccolo voltaggio per cambiare stato - sono sempre speculari 	<ul style="list-style-type: none"> - comandabili manualmente dall'utenza - sono l'unico dispositivo, elettricamente attivabile, di grandi dimensioni attualmente disponibile sul mercato - può passare dallo stato trasparente a quello diffuso senza variare sostanzialmente la quantità di luce trasmessa - garantiscono la privacy - possono costituire una valida alternativa alle tradizionali schermature per la protezione dei materiali isolanti trasparenti
Svantaggi	<ul style="list-style-type: none"> - non sono ancora disponibili per ampie superfici - insufficiente durabilità 	<ul style="list-style-type: none"> - necessitano di un apporto di corrente continuo per restare trasparenti - la diffusione è sempre presente, anche nello stato attivato - necessitano di un più alto voltaggio per attivarsi

Tab. 4.8 - Analisi delle caratteristiche dei dispositivi cromogenici: attivati elettricamente

Il comportamento dei materiali termocromici nei confronti della radiazione solare permette di migliorare i consumi energetici dell'edificio, diminuendo i carichi termici ed i consumi per il condizionamento durante il periodo estivo, favorendo l'illuminazione naturale dello spazio confinato.¹⁷

Il vetro fotocromatico varia il coefficiente di trasmissione in funzione dell'intensità della luce che lo colpisce. Per azione degli alogenuri di argento, assume una colorazione grigia quando è esposto alla luce solare: in questo modo funziona da filtro, soprattutto per le radiazioni infrarosse. La colorazione grigia diminuisce con il venir meno della radiazione solare.¹⁸

Il vetro atermico, prevalentemente di composizione fosfatica (70% P₂O₅) con l'aggiunta di ossidi di ferro, presenta la capacità di intercettare gran parte delle radiazioni infrarosse dello spettro solare, senza ostacolare le radiazioni visibili. E', inoltre, possibile incrementarne le proprietà aggiungendo all'esterno una superficie metallica che permette di riflettere il calore ma non la luce. L'introduzione di ossidi colorati nel vetro, che provocano un assorbimento selettivo, comporta una riduzione della sua trasparenza abbassandone il fattore di assorbimento solare, con la conseguenza di ridurre l'illuminazione naturale degli spazi confinati, soprattutto nelle giornate nuvolose. I vetri atermici hanno trovato nel tempo ampia diffusione nell'industria automobilistica poiché permettono di regolare, abbassandola, la temperatura interna della vettura rispetto ai vetri tradizionali.

Tipologia	Descrizione
Vetri olografici	Pannelli di vetro sui quali viene stampato un modello di diffrazione con tecnica olografica. Deviano la luce attraverso il fenomeno della diffrazione.
Vetri prismatici	Tipo di lastra di vetro che presenta una superficie lavorata a piccoli prismi e che serve a modificare la direzione della luce incidente.
Aerogel	Gli aerogel sono materiali costituiti da particelle di silice che, con particolari processi produttivi, formano strutture microcellulari porose.
Vetri geometrici	Sono compresi in questa tipologia i vetri TIM, che hanno proprietà termiche simili a quelle dei componenti opachi, conservando un alto valore di trasmittanza luminosa.
Vetri evacuati	Vetri composti da retrocamera con rivestimenti selettivi basso-emissivi dal quale viene estratta l'aria fino al raggiungimento di una pressione assoluta pari a 10 ⁻⁷ atm. Gli scambi radiativi molto ridotti, quindi le dispersioni totali sono molto basse.
Vetri a lamelle	Vetri con lamelle che costituiscono una schermatura per il controllo della radiazione solare. Permettono una distribuzione uniforme della luce e una variabile schermatura in funzione delle condizioni ambientali e climatiche.

Tab. 4.9 - Vetri a trasmissione direzionale della luce

	Elettrocromici	A cristalli liquidi
Tipo di trasformazione	Cambiano le proprietà ottiche al variare dell'intensità della luce	Variano le proprietà al variare della temperatura: ritornano alle proprietà originarie se raffreddati fino alla temperatura di partenza
Aspetto esterno e colorazione	Varia da chiaro-trasparente a colorato	Da trasparente a lievemente colorato
Proprietà ottiche	<ul style="list-style-type: none"> - stato trasparente Trasmissione elevata all'interno dello spettro solare visibile (fino a 80-90% per la banda centrale visibile) - stato colorato: trasmissione molto bassa (fino a 10-15% per la banda centrale del visibile) 	<ul style="list-style-type: none"> - fattore di trasmissione energetica: stato trasparente: 90% Stato opaco: 20-30%
Proprietà elettriche	Tempi di risposta: minuti (richiede più tempo il passaggio dallo stato opaco a quello trasparente)	Tempi di risposta: molto rapidi
Durabilità	Per i vetri è stata dimostrata una buona durabilità e resistenza alla fatica nell'alternarsi dei cicli colorato/trasparente	Tendenza all'ingiallimento del materiale polimerico esposto all'azione della radiazione UV: risolubile tramite stabilizzatori chimici, l'obiettivo è il raggiungimento di una durata di vita di 5 anni; nel futuro si lavorerà per una durata superiore (20-30 anni)
Vantaggi	<ul style="list-style-type: none"> - sono autoregolanti - buona curabilità per cicli colorato/trasparente - buona resistenza agli attacchi chimici 	<ul style="list-style-type: none"> - sono autoregolanti - riducono l'entità dei carichi di raffreddamento e ventilazione (risparmio energetico) - possono sostituire le tradizionali schermature - trasferiscono la trasmissione luminosa nello stato trasparente - eliminano i problemi di surriscaldamento regolando gli apporti solari - diffondono la luce sia nello stato opaco che in quello chiaro - la luce trasmessa è costante e uniforme - eliminazione dei fenomeni di abbagliamento - costi ridotti rispetto alle altre categorie
Svantaggi	<ul style="list-style-type: none"> - drastica riduzione della trasmissione luminosa nello stato oscurato - riflessione della radiazione solare anche in inverno - al cambiare di stato diventano assorbenti - costo elevato 	<ul style="list-style-type: none"> - bloccano i raggi solari benefici in inverno - possono essere regolati dall'utenza solo con circuiti elettrici stampati sugli strati che racchiudono il film termocromico - non sono mai completamente trasparenti

Tab. 4.10 - Analisi delle caratteristiche dei dispositivi cromogenici: non attivati elettricamente

4.2.2 Passivi: prismatici, olografici, a selettività angolare

Le superfici prismatiche e le pellicole olografiche servono per diffondere la luce naturale negli ambienti trasformando la luce diretta del sole in luminosità diffusa.

Le lastre di vetro prismatico, infatti, hanno la caratteristica di deviare i raggi di luce che le attraversano, rifrangendo o diffondendo la luce. In questo modo si ottiene il doppio vantaggio di evitare l'irraggiamento diretto, soprattutto quando il sole è più alto all'orizzonte, come nel periodo estivo, e di diffondere i raggi indiretti in tutta la superficie interna. Le superfici prismatiche sono pannelli realizzati in vetro, policarbonato, materiale acrilico o poliestere che hanno diverse forme geometriche, deviano i raggi solari a seconda dell'angolo di incidenza con cui vengono colpite e consentono, attraverso questo espediente, di dirigere la luce dove serve.

Le superfici trasparenti a prismi sono costituite da lastre realizzate con resine acriliche e sono caratterizzate da una faccia piana (quella esposta) ed una a prismi (quella opposta). Le superfici a prismi possono presentare differenti morfologie e configurazioni in funzione della variazione dell'angolo di inclinazione degli elementi prismatici: in rapporto a tale variazione possono infatti attuarsi diverse modalità di trasmissione e/o riflessione della radiazione solare, determinando una più o meno elevata quota parte di radiazione solare luminosa che si diffonde in ambiente.

I pannelli di vetro prismatico devono essere inclinati, in modo che risultino quasi perpendicolari alla radiazione solare diretta incidente. L'applicazione ideale è pertanto nelle coperture inclinate o in sistemi mobili, che possono essere montati su superfici trasparenti orizzontali e verticali, o integrati in sistemi di copertura o di facciata.

Questi componenti sono utilizzati per la realizzazione di superfici "captanti diffondenti" in grado di assicurare un'elevata quota parte di radiazione luminosa trasmessa all'interno degli ambienti, risolvendo nel contempo le usuali problematiche relative alla protezione solare (eccessiva riduzione del flusso luminoso, fenomeni di abbagliamento, ecc).



Fig. 4.18, a sinistra: Applicazione di vetro elettrocromico

Fig. 4.19, a destra: Applicazione di vetro elettrocromico a cristalli liquidi

Le superfici prismatiche consentono di controllare, ovvero bloccare e direzionare la radiazione solare diretta incidente, evitando così l'innalzamento della temperatura interna degli ambienti, senza ridurre l'apporto luminoso necessario in relazione alle esigenze di luminosità degli ambienti stessi.

Gli ologrammi o HOLE vengono prodotti mediante laser sotto forma di pellicole sottili e successivamente incorporate all'interno di lastre trasparenti di vetro stratificato. Mediante l'effetto fisico della diffrazione, essi guidano la luce analogamente agli specchi, i prismi, le lenti ed altri elementi ottici, senza peraltro diminuire in maniera significativa la trasmissione della radiazione solare. Per sviluppare questa tecnologia da un punto di vista industriale, si utilizzano dei sistemi laser che imprimevano un modello di linee tridimensionali sulle emulsioni fotografiche. I singoli elementi olografici, che hanno una dimensione variabile da 1,00 x 1,00 cm a 10,00 x 10,00 cm, possono essere disposti su una pellicola fotografica le cui dimensioni massime non possono superare i 114,00 x 200,00 cm.¹⁸

I sistemi olografici ottici s'inseriscono tra quelle soluzioni che sfruttano meglio la luce sia nelle condizioni di cielo coperto, sia durante i periodi di illuminazione solare diretta, consentendo di ottenere un miglioramento della distribuzione dell'illuminazione diurna mediante la deviazione controllata sia della radiazione solare diffusa che di quella diretta.

Un vantaggio sul piano applicativo di questa tecnologia è rappresentato dalla possibilità e dalla facilità con cui queste pellicole vengono stese su elementi vetrati esistenti, tradizionali o non, permettendone l'uso anche sulle vetrate esistenti. Il loro costo di applicazione risulta essere contenuto e competitivo se relazionato ad altri sistemi tecnologici per la diffrazione luminosa. Se le pellicole olografiche vengono poste all'interno di soluzioni a vetro-camera non presentano problemi legati alla manutenzione, riuscendo comunque a migliorare la distribuzione della luce naturale all'interno degli ambienti confinati.¹⁹

I vetri a selettività angolare sono quei sistemi vetrati la cui forma e la cui disposizione indirizzano la radiazione solare incidente sul vetro verso direzioni particolari e controllate, e che presentano una trasmittanza particolarmente alta per alcuni angoli di incidenza della radiazione. Sono solitamente costituiti da due lastre di vetro trattate



Fig. 4.20: Multifunctional sports arena in Siauliai city, Gintaras Balcytis, Algimantas Bublys, Eugenijus Miliunas, Linas Tuleikis, Lithuania 2011. La facciata dell'arena è stata completamente realizzata con vetri olografici.

con rivestimenti selettivi e da un'intercapedine, eventualmente riempita di gas nobile, nella quale vengono posizionate delle lamelle schermanti ad alta capacità di riflessione.

La presenza di tali elementi all'interno dell'intercapedine consente l'ingresso di una quantità variabile di radiazione solare diretta, proporzionale all'altezza solare.

I vetri a selettività angolare sono sistemi particolarmente indicati per la copertura di uffici, showroom, musei, gallerie ed in generale per tutti quei fabbricati nei quali è richiesta un'alta percentuale di illuminazione naturale.

Hanno un'ottima efficienza rispetto ai normali sistemi schermanti in quanto offrono ottime prestazioni senza la richiesta di particolare manutenzione.

Il sistema a controllo solare è caratterizzato da lamelle in alluminio, che presentano profili distinti per la parte bassa e per quella alta della finestra, così da ottimizzare l'illuminazione all'interno dello spazio evitando fenomeni di abbagliamento.

Le lamelle tolgono trasparenza alla componente vetrata riducendo la vista verso l'esterno in percentuale variabile dal 20% al 50%.

Esistono oggi in commercio una grande varietà di microlamelle inseribili all'interno della cavità tra le lastre vetrate. Tra esse possiamo distinguere:

- Profili ad l'orientamento fisso, posizionati quasi sempre in modo perpendicolare all'asse principale della vetrata oppure funzione della radiazione solare incidente. Si riscontrano problemi di abbagliamento nelle ore del giorno in cui la radiazione solare è parallela all'inclinazione delle lamelle (prime ore della mattina e ultime ore del giorno).
- Profili ad orientamento variabile, in questo caso le lamelle si muovono grazie a dispositivi elettrici che permettono di regolarne l'inclinazione nelle varie stagioni dell'anno, così da sfruttare al massimo la radiazione solare incidente sia per ottimizzare l'illuminazione naturale all'interno degli spazi sia per incrementare l'effetto serra nel periodo estivo e schermare la superficie trasparente nei mesi estivi.
- Profili simmetrici, caratterizzati da lamelle fisse microforate con la superficie superiore concava verso l'alto, in grado di captare gran parte della radiazione solare incidente e di direzionarla verso l'alto all'interno di ambienti. Questo sistema permette di ridurre l'abbagliamento dovuto alla radiazione diretta senza limitare i possibili apporti energetici. Solitamente, nei climi caldi, a questi componenti vetrati vengono integrati sistemi brise-soleil, che limitano lo sviluppo dell'effetto

Selettivi statici	Riflettenti Basso- Emissivi Assorbenti Isolanti
Selettivi dinamici	Fotocromatici Termocromatici Elettrocromatici A cristalli liquidi
A trasmissione direzionale della luce (vetri a selettività angolare)	Olografici Prismatici Aerogel Geometrici Evacuati A lamelle riflettenti

Tab. 4.10 - Materiali trasparenti con rivestimenti selettivi

serra all'interno dell'intercapedine tra le lastre di vetro.

- Profili asimmetrici costituiti da componenti a sezione triangolare; sono in grado di riflettere la radiazione diretta estiva e consentirne, al contrario, la penetrazione durante il periodo invernale. L'orientamento delle lamelle è calibrato in funzione dell'angolo di inclinazione della radiazione solare.
- Il profilo asimmetrico imprime all'involucro una grande flessibilità di comportamento nei diversi momenti della giornata e delle parti dell'anno: quando l'inclinazione del sole è piuttosto alta, le microlamelle hanno la capacità di riflettere completamente la radiazione diretta, mentre durante il periodo invernale, quando l'inclinazione del sole risulta essere più bassa sull'orizzonte, questo sistema schermante interno sviluppa una forte diffusività, riuscendo a riflettere e diffondere la radiazione nell'ambiente interno.

Infine ricordiamo i vetri Antibatterici, trattati in superficie con un processo di diffusione di ioni di argento, che hanno la funzione di distruggere i batteri e bloccandone il metabolismo e interrompendo il meccanismo di separazione. L'azione antimicrobica è costante nel tempo e si mantiene anche in presenza di elevati valori di temperatura e umidità relativa. Questa tipologia di vetri trova applicazione in ambienti che richiedono specifiche esigenze di igiene quali ospedali o istituti sanitari, ma anche ambienti caratterizzati da un particolare grado di umidità (che potrebbe favorire la creazione di muffe o funghi) quali ad esempio le piscine o i centri di balneoterapia.

4.2.3 Altamente Prestazionali: TIM, Aerogel, PCM

TIM

I Transparent Insulation Material, brevettati per la prima volta in Germania negli anni ottanta con la sigla TWD, sono nuovi materiali isolanti trasparenti caratterizzati dalla capacità di garantire un ottimo isolamento termico ed una buona illuminazione dello spazio confinato.

La ricerca tecnologica legata allo sviluppo di questi innovativi materiali isolanti tralucenti è conseguenza di studi condotti in ambito biologico in merito alle caratteristiche della pelliccia dell'orso bianco, capace di garantire a questo mammifero una temperatura corporea tale da permettergli la sopravvivenza in ambienti molto

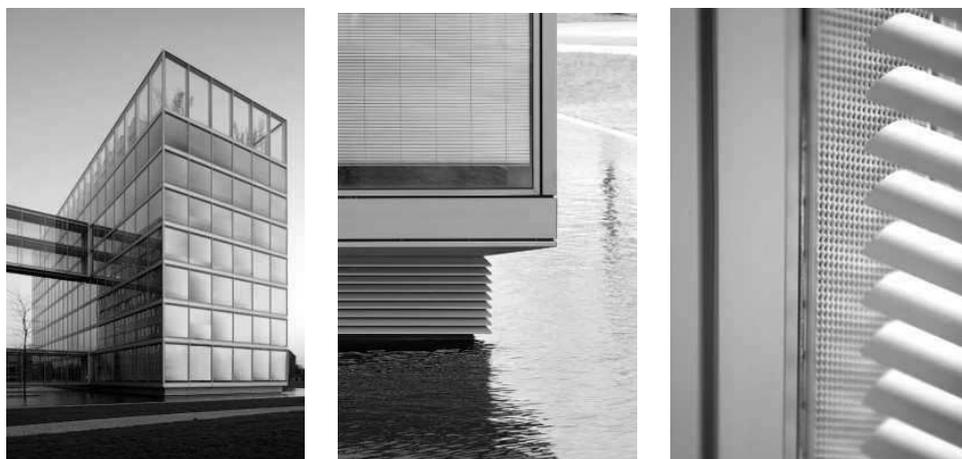


Fig. 4.21: Agenzia di Comunicazione LOOK UP, Anin Jeromin Fitilidis & Partner, Germania, 2004

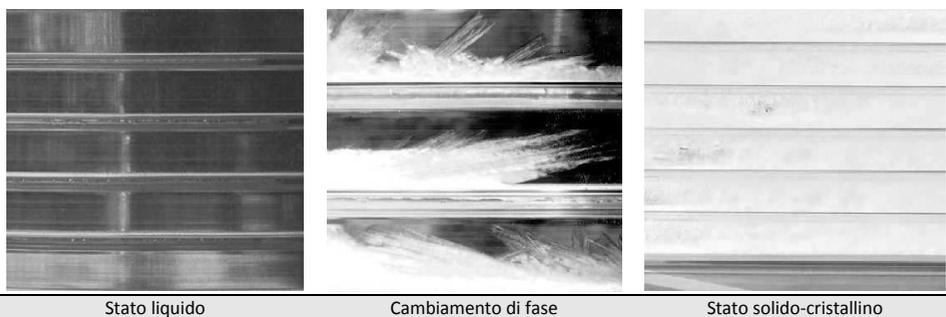
freddi. Gli studi condotti in questo settore permisero di analizzare che il manto di quest'animale è costituito da sottili peli tubolari e cavi, in grado quindi di incanalare la radiazione solare dall'esterno fino alla massa corporea, trasformandola in calore.

L'analisi delle caratteristiche della pelliccia animale condusse i ricercatori tedeschi a sviluppare un materiale che, per analogia di conformazione fisica, garantisca le stesse prestazioni anche nel settore edilizio. Nacquero quindi i TIM, materiali plastici o vetrosi, trasparenti nel visibile e nel vicino infrarosso, realizzati con una struttura capillare a nido d'ape che garantisce, grazie alla particolare composizione materica e geometrica, di ridurre gli scambi radiativi e bloccare i moti convettivi dell'aria. La traslucenza dei materiali utilizzati per la loro realizzazione ne garantisce un'elevata trasparenza che favorisce l'illuminazione diffusa dello spazio confinato, anche nelle situazioni in cui l'ambiente presenta dimensioni in profondità elevate.²⁰

I TIM possono essere classificati in relazione alla struttura geometrica del materiale che li costituisce, che può essere parallela o perpendicolare alla superficie vetrata.

- I pannelli con fibre parallele, hanno uno spessore tra l'uno e i due millimetri, e sono particolarmente indicati nelle applicazioni edilizie. Sono particolarmente indicati nella realizzazione di strutture dall'alta capacità isolante ma riducono la trasmissione della radiazione solare verso l'interno.
- I pannelli con fibre perpendicolari sono caratterizzati da una maglia a nido d'ape dalle dimensioni di qualche centimetro e sono particolarmente indicati per la realizzazione di superfici capaci di direzionare la luce verso determinate direzioni.

In relazione alle caratteristiche di trasmissione della radiazione solare possiamo inoltre distinguere i seguenti sistemi:



Tab. 4.11: - Cambiamento di fase di PCM all'interno dei pannelli Glasscrystall



Tab. 4.12 - Vetri a selettività angolare differenziati per tipologia di micro lamelle adottate

- Opachi, a parete massiva. Si tratta di sistemi che sfruttano il principio del riscaldamento di uno strato di assorbimento, spesso costituito da una parete piena con elevata massa di accumulo termico applicata in aderenza con lo strato isolante termico traslucido. In presenza di una facciata continua, invece, è lo strato isolante (ad esempio lana di roccia) a svolgere la funzione di massa termica e a restituire calore all'interno dell'ambiente. La funzione di protezione degli agenti atmosferici è svolta da uno strato di vetro anteposto al sistema. Il pannello di TIM anteposto alla parete di accumulo permette di trasformare il 95% della radiazione solare assorbita in calore, impedendo di disperdere successivamente il calore verso l'esterno in tempi inferiori alle 7 ore. Questi sistemi di isolamento comportano tuttavia delle situazioni di surriscaldamento nei mesi estivi, durante i quali è bene prevedere una loro opportuna schermatura.
- Traslucidi, a guadagno diretto. Si tratta di dispositivi formati da vetri speciali, in questo caso il TIM viene inserito tra due strati di vetro, garantendo una buona illuminazione naturale dello spazio confinato a fronte di buone prestazioni in termini di isolamento termico. Un pannello di Isolante Termico Trasparente capillare in policarbonato con celle del diametro di 3,00 mm ed uno spessore di 50,00 mm, incapsulato tra due vetri chiari da 4,00 mm separati da un distanziatore in alluminio e da una guarnizione in Polisobutilene, ha una trasmittanza di $1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$; tali prestazioni termiche possono essere migliorate aumentando lo spessore del materiale e/o utilizzando vetrate basso-emissive per il tamponamento esterno, portando il valore di trasmittanza termica fino a $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$.²¹ Grazie all'ottimo rapporto tra i valori di fattore solare 'g' e di trasmittanza termica 'U', sono sufficienti poche superfici orientate correttamente per garantire il necessario rapporto termico. L'alto rendimento riduce i costi d'investimento e rende economici questi elementi in confronto a sistemi con massa termica. Pur garantendo ottimi vantaggi anche nel settore dell'edilizia residenziale, i TIM tralucidi trovano grande diffusione per la realizzazione di grandi coperture negli edifici commerciali.²² L'effetto che si ottiene utilizzando questo tipo di pannello è quello di una illuminazione diffusa, anche in giornate nuvolose, senza una totale trasparenza visiva. In condizioni di forte abbagliamento la colorazione bianca del TIM del tipo 'KAPILUX-W' contribuisce sensibilmente allo smorzamento della radiazione diretta. Questi pannelli offrono



Fig. 4.22, a destra: Marché international support Office, Kempththal Architetto: Beat Kämpfen, Zurigo 2007

Fig. 4.23, a sinistra: Casa per anziani Domat/Ems, Architetto: GlassX architecture, Zurigo 2004

un eccellente isolamento termico con valori U_g fino a $0,8 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K}$. Il pannello 'Okapane' costituisce, infine, un ulteriore esempio di questa tecnologia ed è un pannello capillare fatto di tubi liberi alveolati di cristallo extra-chiaro con geometria a nido d'ape. La lastra capillare di 'Okapane' è rivestita, da entrambi i lati, da tessuto in fibra di vetro (10 mm). Assicurano un'illuminazione ottimale degli ambienti, indipendente dalle fluttuazioni giornaliere della radiazione solare. Il TIM inserito nel pannello 'Okapane' permette di ottenere un'ottima diffusione della luce e valori di trasmittanza $U = 0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$.

ITIM trovano inoltre un'applicazione particolarmente riuscita nelle facciate realizzate con la tecnologia degli U-glass. L'inserimento del pannello isolante trasparente, sia opaco che tralucevole tra due profili a U sigillati determina un notevole aumento delle prestazioni ed è particolarmente indicato per edifici di grandi dimensioni.

Una delle problematiche dei TIM, infatti, è che vi sono dei limiti dimensionali nella produzione dei pannelli e che ad un aumentare delle dimensioni corrisponde un aumento esponenziale del prezzo.

Thomas Herzog, Germania, ha condotto a partire dagli ottanta interessanti applicazioni di questo materiale; tra gli edifici in cui ha utilizzato pannelli di TIM ricordiamo la casa bifamiliare realizzata tra il 1986 ed il 1989 a Pullach nei pressi di Monaco di Baviera e l'edificio che ospita il suo studio professionale, già agli inizi degli anni novanta.²³

Aerogel

Gli Aerogel sono materiali costituiti da particelle di silice, la cui disposizione spaziale è ottenuta attraverso particolari processi produttivi. Una delle caratteristiche fisiche più importanti di questi materiali è la scarsissima densità apparente, in quanto, circa il 96% del componente è caratterizzato da aria, mentre solo il 4% è una matrice di diossido di silicio (il componente principale del vetro). Da un punto di vista termico riescono a raggiungere dei valori di conduttività pari allo $0,1-0,2 \text{ W/m}^2\text{C}$ (con una trasmittanza termica compresa tra $0,1$ e $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ e un peso pari ad appena 3 kg/m^3), molto vicini ai migliori materiali isolanti (un pannello costituito da doppio vetro e strato di aerogel interno di 20 mm possiede un coefficiente di trasmissione globale pari a $0,857 \text{ W/m}^2\text{K}$). La realizzazione dei primi prototipi di questo materiale avvenne a partire dagli anni trenta, quando Steven Kisler pensò di sottrarre ad un blocco di gel la parte liquida

Materiali	Massa volumica ρ (kg/m^3)	Calore specifico c (kJ/kgK)
Pietra naturale	2700	1,0
Calcestruzzo	2300	1,0
Legno mineralizzato	1100	1,2
Legno da costruzione	500	1,6
PCM – cera microincapsulata	600 ¹	2,1 ²
Acqua, liquida	1000	4,2

¹ Densità apparente (massa volumica circa 1000 kg/m^3)

² Più entalpia di fusione 110 kJ/kg ogni di $3-4^\circ\text{C}$ di temperatura

Tab. 4.13 - Confronto tra parametri relativi ad alcuni materiali da costruzione con caratteristiche di accumulo termico. Fonte: HEGGER M., FUCHS M., STARK T., ZEUMER M., Atlante della sostenibilità e dell'efficienza energetica degli edifici, UTET, 2008

lasciando invece integra la parte solida. Con ulteriori sperimentazioni, si arrivò a sostituire la componente liquida con l'aria, realizzando un materiale dalle ottime qualità e dal peso specifico molto ridotto.

Per ottenere questo materiale si porta il volume suddetto a temperature e pressioni molto elevate; in tale stato, detto supercritico, non è più possibile distinguere il liquido dal gas. Dopo essere pervenuti a queste condizioni la pressione viene fatta decrescere lentamente in modo da evitare gli effetti distruttivi dovuti alla tensione superficiale. Negli anni settanta il metodo Kislner viene abbandonato e sostituito con sistemi più efficienti.

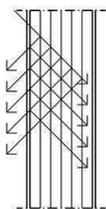
Il tetrametilorsilicato è stato sostituito con il tetraetilortosilicato, mentre il liquido supercritico diventa l'anidride carbonica, che sostituisce il comunissimo alcol. Grazie a questi accorgimenti il processo di produzione è diventato più economico e sicuro, oltre che ecologicamente compatibile con l'ambiente.

L'aerogel viene prodotto in mattonelle di dimensioni 10,00 x 10,00 cm e dallo spessore variabile da 1,00 a 5,00 cm.

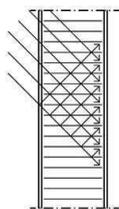
Per un utilizzo ottimale le mattonelle vengono inserite all'interno dell'intercapedine tra due superfici vetrate. Una delle migliori caratteristiche dell'aerogel è la sua straordinaria resistenza termica, possibile grazie alla riduzione della densità del materiale (in questo modo si abbatte la conduzione) e all'aggiunta di carbonio all'interno della miscela di materiale (in questo modo si riduce la trasmissione per irraggiamento). Tra gli inconvenienti correlati a questo tipo di materiali abbiamo senza dubbio l'estrema fragilità, unita a problemi derivanti dall'umidità e dallo scattering.²⁴

Gli aerogel si trovano in commercio in due formati:

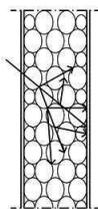
- Granulare, in questo caso il materiale viene prodotto in piccoli grani dal diametro variabile di 8,00 – 12,00 millimetri, con i quali viene riempita l'intercapedine tra due lastre di vetro. A causa dello scattering superficiale e della discontinuità tra le palline il colore del componente appare traslucido. La composizione in granuli di dimensioni ridotte dà una maggiore libertà nel formato dei sistemi di involucro, poiché la dimensione della facciata non dipende dalle dimensioni delle pannellature in commercio ma dalle dimensioni dei tamponamenti verticali, solitamente vetro. Negli ultimi anni sono stati brevettati materiali granulari dalle prestazioni estremamente elevate grazie alle dimensioni ridotte dei granuli che li compongono: i Nanogel, commerciati dalla compagnia tedesca Cabot Corporation, che possono raggiungere valori di trasmittanza termica dell'ordine di $0.28 \text{ W/m}^2\text{K}$ a fronte di una densità di $90 - 100 \text{ kg/m}^3$.



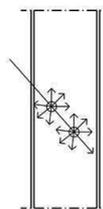
TIM con struttura parallela rispetto alla superficie vetrata: pellicole plastiche, ecc..



TIM con struttura perpendicolare rispetto alla superficie vetrata: piccoli tubi disposti a nido d'ape, fibre capillari, ecc..



TIM senza geometria precisa: schiuma, bolle, alveoli



TIM con struttura quasi omogenea: fibre di vetro, aereogel, ecc..

Tab. 4.14 - Pannelli vetriati composti con TIM

- Monolitico, si tratta di delle lastre di aerogel dallo spessore variabile tra 8,00 e 20,00 mm., con una densità tra 3 e 500 kg/m³, che possiedono ottime caratteristiche di visibilità, pur presentando una colorazione giallo bluastra, tanto da poter essere utilizzate in sostituzione di comuni lastre vetrate, garantendo una trasmittanza molto ridotta di circa 0,85 W/m²K, paragonabile a quella di sistemi di tamponamento opaco.

Spessore dell'intercapedine (mm)	8	12	16	20	24
Ug (W/m ² K)	2,7	2,5	2,2	1,9	1,7

Tab. 4.15: Valori di trasmittanza dei pannelli TIM della Okalux

L'estrema fragilità e la sensibilità all'umidità di tali materiali ha fatto sì che, solo negli ultimi anni, -a seguito della messa in commercio di infissi impermeabili ed ermetici, di vetri ad alte prestazioni e di camere d'aria sottovuoto- sia stata ipotizzata la possibilità di utilizzare gli aerogel di silice come isolanti tralucenti nella realizzazione di involucri architettonici ad alte prestazioni termiche e visive.²⁵

PCM

I Phase Change Materials, o materiali a cambiamenti di fase, garantiscono di limitare le dispersioni di calore tra l'interno e l'esterno di un edificio attraverso l'uso di pannelli caratterizzati da spessori ridotti. I PCM sono materiali solidi a temperatura ambiente, ma capaci di liquefarsi quando esposti ad una temperatura superiore. In questo modo essi accumulano in forma latente l'energia che li colpisce, senza aumentare la loro temperatura.

Quando vengono riportati al di sotto della temperatura di soglia, il ciclo si inverte, il materiale torna allo stato solido e cede calore all'ambiente, funzionando così da volano termico.

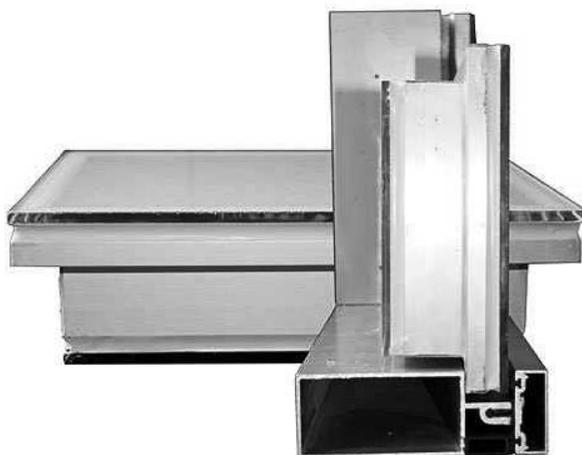


Fig. 4.24: Pannelli con riempimento in nano gel Solera, in questo caso è utilizzato un aerogel a base di silicio che consentirebbe di arrivare ad avere una trasmittanza termica (Ug) compresa tra 0,3 e 0,6 W/m²K in funzione dello spessore dell'intercapedine isolata (60,00 o 30,00 mm).

Nei PCM il calore si trasforma in energia chimica durante il cambiamento di fase (da solido a liquido, da liquido a gassoso) e il materiale subisce una modifica della struttura interna. Le proprietà del materiale possono essere sfruttate solo in corrispondenza di determinate temperature esterne che ne rendono particolarmente adatto l'utilizzo sia nei mesi invernale che in quelli estivi. I pannelli di PCM sono solitamente realizzati con paraffina, un idrocarburo saturo a catena aperta, utilizzato come inerte micro-capsulato da mescolare all'interno di altri materiali, ad esempio nei pannelli di cartongesso o di fibra di legno.

Grazie alla tecnologia Micronal® recentemente sviluppata da BASF, oggi sono disponibili materiali da costruzione a cambiamento di fase che permettono di aumentare l'inerzia termica degli elementi edilizi senza aumentarne la massa, conciliando così benessere termico e leggerezza.

Le sfere possono essere facilmente incorporate nei comuni materiali da costruzione, ad esempio, già disponibili sul mercato: le malte per intonaco interno a base di gesso 'Maxit Clima' prodotte da Maxit e le lastre di cartongesso 'PCM 23-26' di Knauf, che con 15 mm di spessore offrono una capacità di accumulo termico pari a quella di un muro in mattoni pieni da 12 cm o in calcestruzzo da 9 cm, ma con una massa quasi 10 volte inferiore.²⁶

Questi materiali sono stati oggetto di un interessante ricerca tedesca "Innovative PCM Technologie", sviluppata tra il 1999 e il 2004, che ha permesso di sviluppare e mettere in commercio, in un arco di tempo relativamente breve, numerosi prodotti contenenti materiali a cambiamento di fase che hanno trovato applicazione in molti edifici dell'Europa Centrale.

Per la loro capacità di cambiare struttura molecolare in relazione alle sollecitazioni termiche esterne i PCM risultano essere particolarmente adatti per essere applicati anche in climi temperati come quelli del sud Europa dove garantiscono un buon comportamento in termini di inerzia termica anche nei mesi estivi.

In relazione a questa loro caratteristica si registrano alcune sperimentazioni a cura di Centri di Ricerca e Aziende, finalizzate a promuovere la loro applicazioni in aree geografiche con caratteristiche climatiche assimilabili alla fascia mediterranea. Tra gli studi condotti ricordiamo:

- I sistemi di schermatura solare attualmente in fase di sviluppo da parte della Ditta tedesca Warema. In questo caso i PCM sono stati associati a materiali di schermatura tradizionale con l'obiettivo di proporre nuovi materiali che schermano i raggi solari senza aumentare la loro temperatura, con una conseguente riduzione della temperatura interna fino a 6°C.
- Intonaci e membrane bugnate contenenti PCM, da applicare all'involucro architettonico, attualmente in fase di monitoraggio presso il dipartimento di

	Vetro U-glass senza isolamento	Vetro U-glass con isolamento in Nanogel
Prestazioni termiche	2,84 W/m ² K	1,03 W/m ² K
Prestazioni Acustiche	42	44
Trasmissione della luce	70%	50%
Coefficiente di assorbimento solare	0,69%	0,42%

Tab. 4.16 - Analisi del contributo che si può avere con un riempimento in nanogel in una struttura vetrata come l'U-glass. Da: <http://www.cabot-corp.com>

Energetica dell'Università Politecnica delle Marche e dal Politecnico di Milano. La ricerca ed il monitoraggio, attualmente in atto, hanno dimostrato il beneficio dell'adozione di questi materiali nel contenimento dei consumi energetici per il raffrescamento estivo.

- Intonaco additivato con PCM nella Casa3LitriRoma ad Ostia Antica, sviluppata nell'ambito del programma European Solar Building Exhibition.

I PCM sono stati utilizzati dall'azienda tedesca Glassx per brevettare innovativi componenti di facciata trasparenti dotati di porzioni multicamera totalmente trasparenti e porzioni traslucide, proprio grazie alla presenza di PCM nella camera



Fig. 4.25: Esempi di applicazione del Nanogel in una struttura Uglass messa a punto dalla Pilkington (Pilkington Profilite)

più interna della vetrata. Dall'esterno verso l'interno l'intero pacchetto è quindi composto da: un primo vetro con camera d'aria contenente un selettore prismatico (in grado di captare l'energia solare invernale e riflettere quella estiva); un secondo vetro che introduce una camera isolata con gas nobile; quindi un terzo vetro dopo il quale si trovano i contenitori dei materiali a cambiamento di fase e il vetro finale verso lo spazio abitato. In sostanza si tratta di una facciata dotata di quattro porzioni vetrate e tre camere: la prima elio selettiva, la seconda isolante e la terza saturata da materiali a inerzia termica artificiale programmabile. Questo innovativo sistema di facciata, che si basa su una stratigrafia alquanto semplice, riesce a conferire un'immagine mutevole e dinamica all'edificio, grazie alla diversa colorazione assunta dai Sali o dalle paraffine nei diversi stati.²⁷

Le paraffine, derivate dagli idrocarburi, impiegate nei PCM, in un ciclo sinusoidale di scarico e carico termico possono essere utilizzate in chiave sostenibile e non devono essere dismesse in ambiente, riducendo il loro impatto ambientale.

I PCM presentano tuttavia delle problematiche applicative legate alla loro facile infiammabilità, causata dalla presenza di paraffina. Inoltre nei climi molto caldi possono causare fenomeni di surriscaldamento dello spazio confinato, poiché sono in grado esclusivamente di accumulare energia termica ma non di eliminarla o assorbirla; per questo motivo, in zone climatiche calde, devono essere associati a sistemi di raffrescamento notturno o a scambiatori di calore che consentano il recupero dell'energia termica in eccesso.

Conclusioni

Dall'analisi condotta in questo capitolo emerge come i materiali trasparenti siano stati oggetto di un processo di innovazione tecnologica che ha permesso di introdurre e sperimentare sul mercato nuovi prodotti con prestazioni termo-igroscopiche assimilabili a quelle di altri materiali da costruzione opachi. La ricerca condotta nell'ultimo decennio oltre a interessare la produzione del vetro è stata caratterizzata dal trasferimento tecnologico nel settore delle costruzioni di nuovi materiali, quali gli aereogel, i TIM e i PCM, che grazie all'ottimizzazione dei costi di produzione hanno cominciato a trovare applicazione anche nelle realizzazioni correnti. Le ricerche avviate in ambito europeo per monitorarne le prestazioni hanno inoltre dimostrato che questi materiali intelligenti, talora capaci di cambiare conformazione in relazione alle condizioni a contorno esterne, garantiscono ottime prestazioni anche in regioni con clima temperato e mediterraneo, dove solitamente le superfici trasparenti hanno sempre contribuito ad incrementare il carico termico interno degli edifici. I materiali a cambiamento di fase o i nanogel si prestano pertanto ad essere integrati in sistemi di facciata innovativi doppia pelle, dove installati su pannelli mobili o utilizzati come sistemi di schermatura interna o esterna, possono contribuire ulteriormente a incrementare l'efficienza del sistema involucro in relazione alla necessità di ridurre i carichi termici dell'edificio durante tutto l'arco dell'anno.

Note

¹ «Le mura stesse...diventano finestre, e le finestre come eravamo solite conoscerle, fori nelle mura non esistono più» Da: WRIGHT F. L., (Traduzione italiana a cura di ODEDDA B.), *F. L. Wright, un'autobiografia*, 1932, Trad. Italiana 1985, Jaka Book, p. 303

² «Quelle vetrate, del resto, non valgono per sé, ma per la profondità o l'interna struttura che si di esse è leggibile in trasparenza» in ARGAN G. C., *Walter Gropius e la Bauhaus*, Einaudi, Torino 1951

³ PURINI F., *La casa*, in *Metamorfosi* n.5, 1987

⁴ PERCOCO M., *Alterazioni di trasparenza*, in *Materia* n° 56, dicembre 2007

⁵ CULTRONI F., *Costruire la trasparenza*, in *Materia* n°56, dicembre 2007

⁶ CULTRONI F., *supra*

⁷ BROWELL B., *Materiali complessi nell'architettura*, in *Materia* n. 58, Giugno 2008

⁸ Cfr. BUTERA F. M., “*Gli spazi per la ricerca nell’ambito della progettazione per la sostenibilità ambientale*”. In: *I percorsi della progettazione per la sostenibilità ambientale*, M. Sala, a cura di, (Firenze, 20 e 21 Ottobre 2004), Alinea editrice, 2004

⁹ ACHILLES A., *Vetro colorato: produzione, lavorazioni e regole di progettazione*, in *Detail* 1/2, 2007

¹⁰ «Una delle conseguenze della selettività del vetro alla radiazione solare è l’effetto serra. Questo è dovuto al fatto che il vetro trasmette le onde corte (radiazioni di lunghezza d’onda inferiori di 2,5 micron), ma blocca le onde lunghe. Le onde corte passano attraverso il vetro e vengono assorbite da superfici e oggetti all’interno. Questi, riscaldandosi, re-irradiano onde lunghe – le radiazioni termiche – che però, essendo di lunghezza d’onda maggiore di 2,5 micron, vengono trattenute nell’ambiente interno, bloccate dalla frontiera vetrata, generando incremento della temperatura». Da D. RAVIZZA, *Problemi di vetro. Frontiere trasparenti: guadagni e perdite*, Materiali Edili, Anno X, n.68, febbraio-marzo 2006

¹¹ I vetri riflettenti hanno un deposito metallico fino (principalmente argento) sulla faccia che riflette la luce riducendo la sua trasmissione e di conseguenza anche gli apporti solari. La trasmittanza τ varia tra 50 e 55%.

¹² CECCHERINI NELLI L., *Fotovoltaico in architettura*, Alinea Editrice, Firenze 2006

¹³ CECCHERINI NELLI L., *Fotovoltaico di nuova generazione per l’architettura*, in 100 Tesi...Sostenibili, a cura di Sala M., Romano R., Alinea Editrice, Firenze 2009

¹⁴ LATORRE C., *La finestra? Bella, multifunzionale e hi-tech*, in *Case e Clima* n.15, ottobre 2008

¹⁵ ANTONINI E., *Materiali Complessi*, in *Materia* n. 58, Giugno 2008

¹⁶ TUCCI F., *Involucro ben temperato. Efficienza energetica ed ecologica in architettura attraverso la pelle degli edifici*, Alinea editrice, Firenze, 2006

¹⁷ RAVIZZA D., *Problemi di vetro. Frontiere trasparenti: guadagni e perdite*, Materiali Edili, Anno X, n.68, febbraio-marzo 2006

¹⁸ RAVIZZA D., *Problemi di vetro. Frontiere trasparenti: guadagni e perdite*, op. cit.

¹⁹ TUCCI F., *Involucro ben temperato. Efficienza energetica ed ecologica in architettura attraverso la pelle degli edifici*, Alinea editrice, Firenze, 2006

²⁰ 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*, Dottorato di Ricerca in Tecnologia dell’Architettura XXI ciclo, Università degli Studi di Napoli

²¹ ROSSI M., *Supra*

²² PARODI DANDINI E., Un' idea trasparente, in Casa e Clima n. 21, Ottobre 2009

²³ 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*, Dottorato di Ricerca in Tecnologia dell'Architettura XXI ciclo, Università degli Studi di Napoli

²⁴ In ottica ed in astrofisica il fenomeno dello scattering (o diffusione) è riferito alla dispersione della luce da parte di oggetti macroscopici come gli asteroidi o microscopici come il pulviscolo o gli atomi che formano un gas

²⁵ 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*, Dottorato di Ricerca in Tecnologia dell'Architettura XXI ciclo, Università degli Studi di Napoli

²⁶ ANTONINI E., *Materiali Complessi*, in Materia n. 58, Giugno 2008

²⁷ IMPERADORI M., *Inerzia termica senza massa?*, Frames in 143, novembre - dicembre 2009

Capitolo 5

Concept per un nuovo componente dinamico di facciata

5.1 Premesse metodologiche

La necessità di sviluppare un sistema di facciata capace di garantire prestazioni energetiche flessibili e adeguate alle condizioni climatiche mediterranee, ci ha condotto ad indagare la tematica dei sistemi di facciata doppia pelle trasparente cercando di sviluppare un nuovo componente di chiusura opaca verticale caratterizzato dalla possibilità di variare la sua configurazione nell'arco dell'anno in corrispondenza del passare delle stagioni. Il componente è frutto di un lavoro di ricerca avviato con la collaborazione del Centro di Ricerca Interuniversitario ABITA¹ di Firenze che grazie alla sinergia dei soggetti coinvolti, ci ha permesso di valutare le caratteristiche del componente e di realizzare successivamente il prototipo dello stesso, che verrà messo in opera presso il Nuovo Centro in Ambienti Virtuali e ICT della Camera di Commercio di Lucca.

I principi ordinatori che hanno accompagnato lo sviluppo del concept del componente di facciata dinamico possono essere identificati come risposta ai seguenti temi di ricerca:

- Definizione di nuove soluzioni di involucro attivo, capaci di favorire la riduzione dell'impatto ambientale dei sistemi legati al mondo delle costruzioni attraverso la scelta di materiali durevoli e con un ciclo di vita sostenibile;
- Integrazione architettonica di un sistema di involucro edilizio a schermo avanzato capace di garantire buona illuminazione, regolazione termica, produzione di energia, ecc, oltre naturalmente alle funzioni basilari di protezione dall'acqua e di controllo della temperatura;

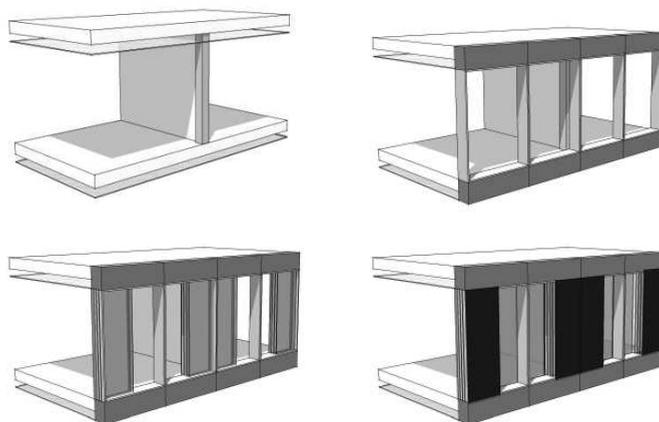


Fig. 5.1: Concept preliminare del sistema di facciata intelligente. Analisi delle fasi di montaggio

- Sviluppo di un sistema modulare che permetta soluzioni estetico architettoniche accattivanti e variabili in relazione alle necessità del progettista e garantisca una continuità geometrica alla facciata;
- Possibilità di integrare tecnologie per la produzione di energia rinnovabile negli elementi d'involucro;
- Capacità di garantire prestazioni termo igrometriche variabili in relazione al clima esterno.

Il componente di facciata proposto, costituito da una parte opaca ed una trasparente, integra un sistema di pannelli scorrevoli su un telaio di tipo scrigno, che garantiscono l'alternanza di elementi mobili a partiture fisse con tamponamento trasparente e opaco, nelle quali possono trovare alloggiamento pannelli fotovoltaici, pannelli solari termici o semplicemente dei materiali mediante traslucenti (vetri serigrafati, TIM, PCM, ecc) capaci di incrementare le prestazioni termo igrometriche dell'intero componente.

Abbiamo scelto di adottare una soluzione di facciata del tipo Multistory facades con sistema di ventilazione naturale dell'intercapedine, così da incrementare l'isolamento acustico degli ambienti interni ed evitare problematiche legate alla diffusione di fuoco e fiamme in caso d'incendio. La soluzione Multistory è stata preferita perché ci permetteva di elaborare un componente che può anche essere assemblato in fabbrica e successivamente messo in opera in cantiere attraverso il semplice alloggiamento dei moduli.

La soluzione proposta garantisce una riduzione delle perdite di calore dovute ad un isolamento non ottimale o insufficiente, integrando nel sistema di facciata componenti trasparenti dai ridotti coefficienti di trasmittanza termica. I vetri basso emissivi assicurano un'elevata resistenza termica e consentono di mantenere un buon illuminamento naturale degli spazi confinati. Il sistema di schermatura riduce invece i carichi termici nei mesi estivi, garantendo comunque una buona illuminazione

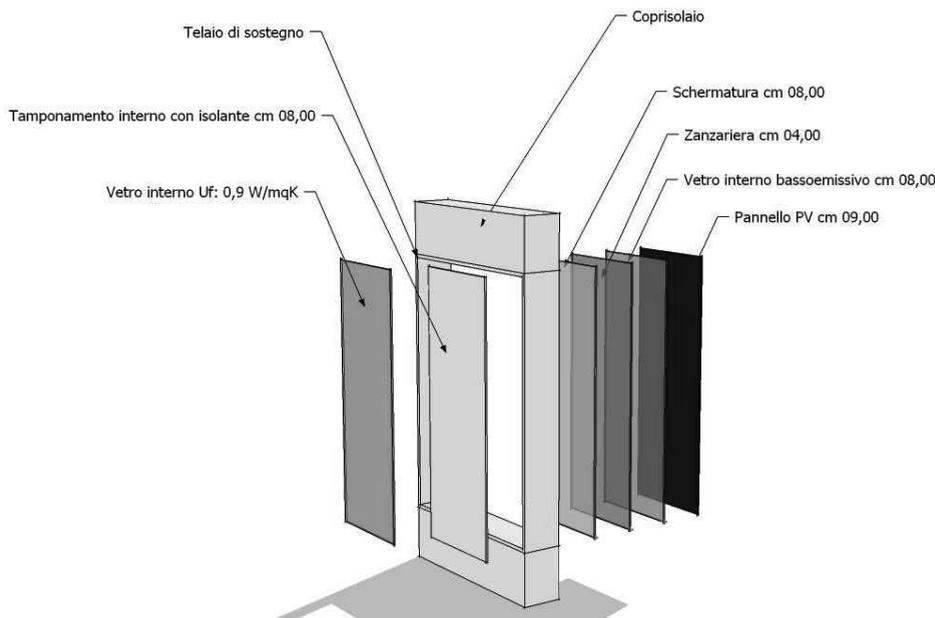


Fig. 5.2: Concept preliminare del sistema di facciata intelligente

dello spazio interno grazie alla possibilità di regolare l'inclinazione delle lamelle della schermatura.

L'idea iniziale è stata quella di sviluppare un sistema variabile che, se connesso ad un impianto di automazione, possa diventare parzialmente indipendente dalla gestione dell'utenza, garantendo la riduzione dei consumi energetici dovuti a riscaldamento - raffreddamento dell'edificio.

La fase "operativa" della ricerca, finalizzata alla creazione del prototipo, è stata sviluppata attraverso:

- Sviluppo del concept del componente di facciata²;
- Analisi della soluzione tecnologica adottata³;
- Verifica delle prestazioni, in termini di riduzione del fabbisogno energetico di un ambiente confinato mediante simulazioni effettuate con il software TRNSYS su un modello virtuale⁴;
- Realizzazione del prototipo e prima valutazione delle caratteristiche funzionali del componente⁵;
- Integrazione del componente nel progetto dell'edificio del Nuovo Centro in Ambienti Virtuali e ICT della Camera di Commercio di Lucca, attualmente in fase di costruzione.

La possibilità di realizzare il prototipo ci ha permesso di verificare la validità di alcune delle soluzioni adottate nella fase iniziale e di apportare delle modifiche per ottimizzarne le prestazioni. In particolar modo dopo la realizzazione del primo prototipo si è provveduto a:

- Sostituire il sistema schermante in lamelle d'alluminio tipo greisser che era stato collocato in prossimità della pelle interna con un sistema di schermatura a lamelle mobili su pannello scorrevole, per evitare fenomeni di surriscaldamento nei mesi estivi;
- Eliminare il pannello scorrevole con la zanzariera metallica sostituendolo con un sistema a rullo verticale collocato in prossimità dell'infisso interno;
- Eliminare il parapetto in elementi metallici posto all'esterno della pelle interna, provvedendo alla suddivisione dell'infisso trasparente interno in due partizioni orizzontali: una fissa ed una apribile a battente ed a vasistas;
- Incremento dell'isolamento termico del pannello fisso in alluminio coibentato mediante l'incollaggio di un pannello di 4,00 cm di isolante termico in polistirene espanso sintetizzato e due strati di legno di abete;
- Sostituzione del tamponamento con griglia di alluminio con un pannello di alluminio non forato a chiusura del camminamento dell'intercapedine nella partitura di facciata trasparente.

Il sistema di facciata dinamico proposto rappresenta una soluzione innovativa, per le sue caratteristiche estetiche e tecnologiche, capace di rispondere in modo efficace alle richieste del mercato dei componenti di involucro per l'edilizia terziaria; mercato sempre più orientato, come indicato precedentemente, a proporre architetture risolte con soluzioni di facciata capaci di cambiare colore e forma in poco tempo, garantendo il risparmio energetico, l'isolamento acustico, l'abbattimento dei costi di produzione.

La progettazione di sistemi di facciata integrati con il manufatto edilizio ed il sistema impiantistico, orientata a proporre elementi montabili a secco posteriormente alla realizzazione della parte strutturale dell'edificio, diventa una delle sfide del settore industriale legato alla produzione degli involucri architettonici per i prossimi anni.

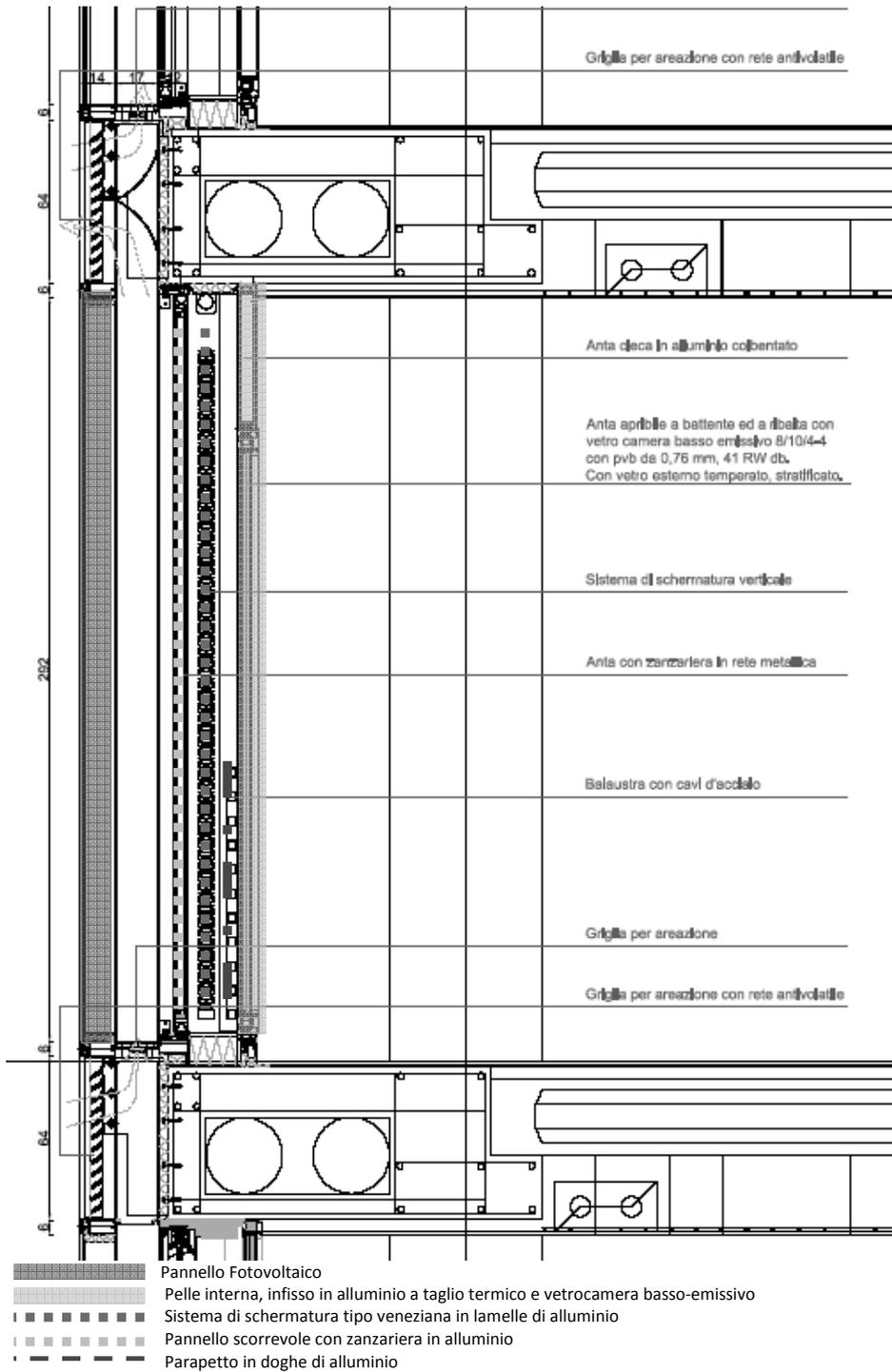


Fig. 5.3: Sezione tecnologica con indicazione della stratigrafia della prima bozza di progetto con zanzariera nel pannello scorrevole e veneziana posta davanti all'infisso interno

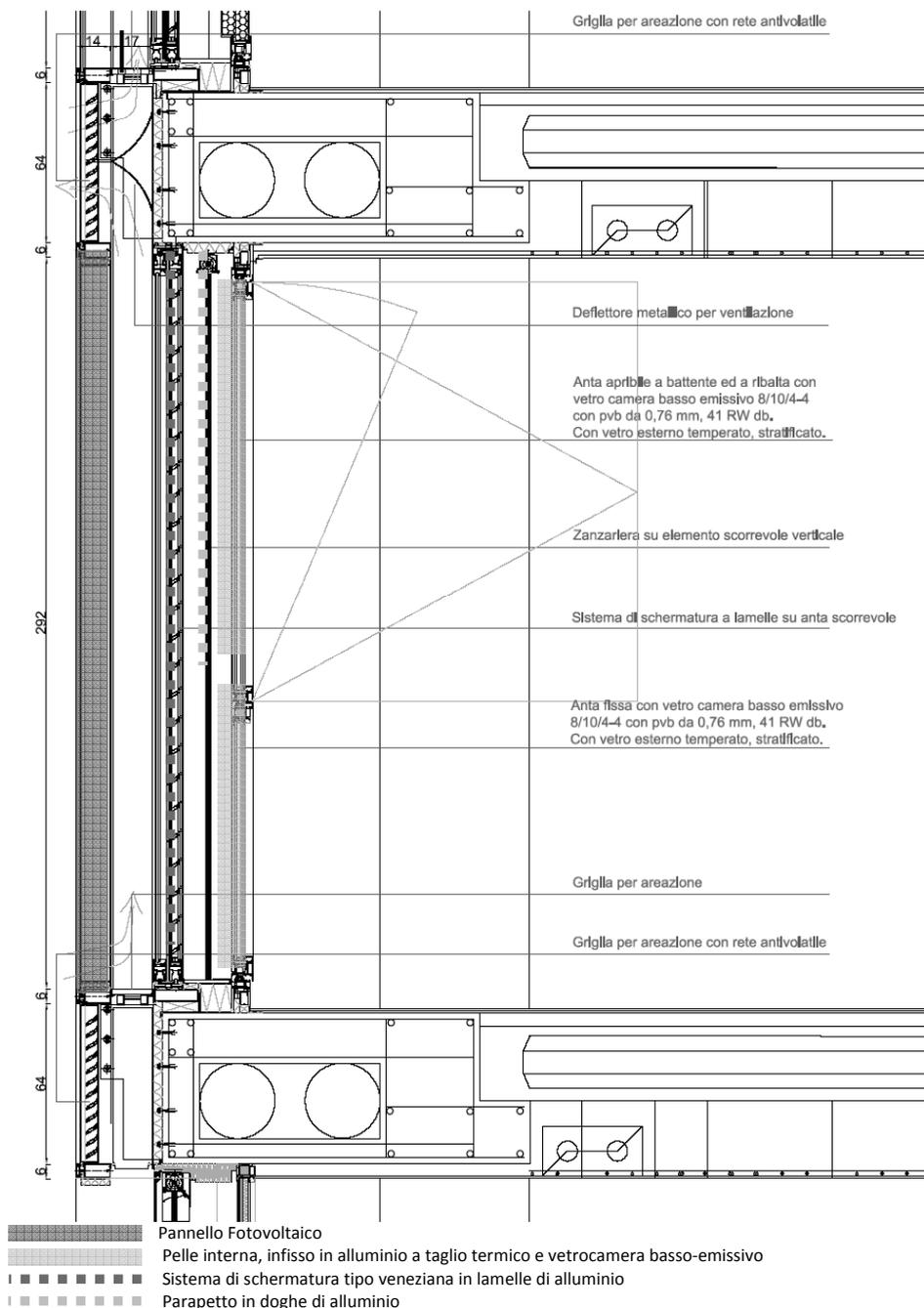


Fig. 5.4: Sezione tecnologica con indicazione della stratigrafia della bozza definitiva di progetto con la zanzariera a rullo e la schermatura posta nel pannello scorrevole

5.2 Caratteristiche tecnologiche

Il sistema di facciata intelligente è stato concepito come un componente di involucro verticale assemblato a secco, caratterizzato da un disegno geometrico semplice e costituito da una parte vetrata e da una parte opaca, configurabili in modo variabile sia rispetto alla geometria di facciata che ai materiali scelti per realizzarne il tamponamento. Ogni modulo è costituito da parti fisse e da parti mobili, attivabili all'occorrenza grazie a dispositivi manuali e/o automatici. I componenti scorrevoli, entrambi alloggiati all'interno di telai in alluminio di tipo scrigno, sono due:

- La schermatura in lamelle di alluminio
- Un'unità vetrata esterna in vetro stratificato 4+4.

Una zanzariera a scorrimento verticale è posta dinanzi all'infisso interno, per evitare l'ingresso di insetti o animali durante le ore notturne quando è prevista la ventilazione naturale dell'edificio.

L'involucro modulare è stato progettato per garantire le prestazioni termiche, acustiche, illuminotecniche e di ventilazione che sono ormai fondamentali per la realizzazione di soluzioni di facciata capaci di integrarsi con i sistemi meccanici di cui ogni edificio dispone.

Il sistema di facciata può essere assimilato ad una facciata doppia pelle trasparente, rispetto alla quale possono essere definite e personalizzate le caratteristiche della pelle interna, dell'intercapedine e della pelle esterna.



Fig. 5.5. Prototipo fronte esterno.

Il sistema di facciata è stato sviluppato per il settore dell'edilizia terziaria (uffici e commerciale) rispetto al quale le strategie prevalenti per ridurre i carichi termici per il condizionamento estivo ed invernale sono legate all'incremento di:

- Illuminazione naturale
- Ventilazione naturale
- Night Colling
- Incremento dell'isolamento termico delle componenti d'involucro
- Adozione di sistemi schermanti esterni o di soluzioni di involucro massivo
- Integrazione di sistemi impiantistici altamente efficienti (soffitti radianti, travi fredde, recuperatori di calore, ecc)
- Installazione di tecnologie per la produzione di energia rinnovabile

In relazione a queste necessità la Smart Façade propone una combinazione di componenti che garantiscono l'ottimizzazione dei fattori che influenzano il comfort interno dello spazio confinato (radiazione solare, energia termica, energia acustica, ecc) attraverso le peculiarità degli elementi e dei materiali adottati.

Il componente di facciata intelligente consiste in una soluzione tecnologica che sfrutta le proprietà del sistema ad incasso a "scriccino", meccanismo che consente di far scomparire nella scatola in alluminio di contenimento gli elementi di cui è composta la finestra. L'elemento scriccino è caratterizzato da carrelli della portata di 180 kg per anta, montati su un binario d'acciaio estraibile. A tali carrelli sono agganciati gli elementi mobili del sistema: il pannello contenente il sistema di schermatura e quello in cui è alloggiato il vetro stratificato 4.4.

La necessità d'integrare all'infisso una rete per insetti metallica nasce dall'esigenza di garantire la parziale apertura degli infissi della pelle interna durante i mesi estivi, per permettere la ventilazione notturna dell'edificio e ridurre il carico termico accumulato durante il giorno. La "zanzariera" è realizzata attraverso una maglia metallica che può essere caratterizzata da una texture diversa in relazione alle esigenze del progettista.

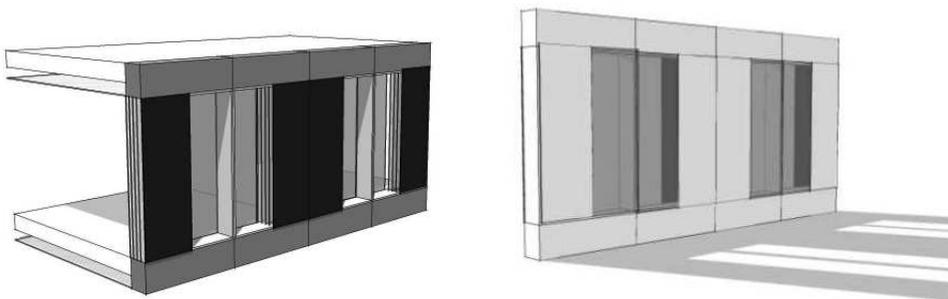


Fig. 5.6. Concept preliminare del sistema di facciata intelligente

Il prototipo del componente di facciata dinamica, sviluppato come elemento modulare mono cellula, presenta delle dimensioni ridotte rispetto al modello reale. In particolar modo è stato necessario ridurre l'altezza del sistema di facciata da 3,00 m a 2,40 m per permetterne il trasporto tramite furgone.

Gli elementi della pelle interna ed esterna del sistema sono alloggiati all'interno all'elemento di contenimento scatolare in alluminio.

Nella fase preliminare di realizzazione del prototipo non sono stati integrati i pannelli fotovoltaici, ma si è inserito un pannello in vetro con pellicola adesiva serigrafata con l'immagine di celle policristalline.

La componente opaca esterna è realizzata con un modulo multifunzionale ad elementi prefabbricati che garantiscono l'integrazione di pannelli fotovoltaici (o di altri materiali di tamponamento), i quali oltre a fornire energia elettrica garantiscono la produzione di calore nell'intercapedine areata posta in loro adiacenza, calore che - in una futura configurazione del componente di facciata - potrebbe essere condotto all'interno dell'ambiente ed utilizzato per il riscaldamento. La presenza dell'intercapedine d'aria contribuisce ad incrementare l'isolamento di tutto il componente opaco.

Durante la stagione fredda il sistema di facciata garantisce elevate prestazioni in termini di trasmittanza termica, assicurando buone condizioni d'illuminazione, mediante la chiusura totale dell'involucro verso l'esterno. In questa stagione, infatti, il pannello contenente il vetro stratificato 4.4 sarà aperto e posizionato davanti alla componente interna trasparente (telaio in alluminio a taglio termico e doppio vetro basso emissivo), permettendo la formazione di una camera d'aria che contribuirà ad incrementare la trasmittanza termica della facciata (si stima che la presenza della camera d'aria riduca il fattore di trasmittanza termica da $K:1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ a $0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$).

In estate il sistema, parzialmente apribile permette il controllo della ventilazione naturale e della radiazione solare oltre a consentire il night cooling, attraverso la presenza della zanzariera blindata che impedisce l'ingresso di insetti o animali dall'esterno e garantisce prestazioni di sicurezza, accentuate dall'integrazione di un sistema di controllo di presenza di tipo informatico, agli spazi interni.

In entrambe le stagioni il sistema di schermatura, costituito da lamelle in alluminio orientabili montate su telaio scorrevole, permetterà di regolare il flusso luminoso in entrata all'interno dell'edificio.



Fig. 5.7. Prototipo. Fronte esterno

5.3 La pelle interna

5.3.1 Elementi della sottostruttura portante

La facciata continua interna costituita da elementi opachi e trasparenti si appoggia a montanti verticali presenti in corrispondenza delle mezzerie dei pilastri posti tra un ambiente e l'altro e bullonati a profili in ferro con sezione a C che garantiscono la dovuta stabilità strutturale. L'elemento di raccordo tra pelle interna e pilastro in cemento armato può essere realizzato con gli stessi materiali con cui è realizzato il muro di divisione tra gli ambienti interni o con un pezzo speciale fornito dall'azienda e caratterizzato da un tamponamento in carter di alluminio all'interno del quale sono alloggiati due lastre di cartongesso dello spessore di 1,50 cm per lato, 2 lastre di fibra di legno di 2,00 cm per lato (massa superficiale: 11,5 kg/m²) e isolante di lana di roccia dello spessore di 8,00 cm (densità: 50 kg/m³), che garantiscono l'adeguato isolamento acustico della partizione (59 dB tra un ambiente e l'altro) e buona resistenza al fuoco (REI 120).

Alla sottostruttura in montanti e traversi sono agganciati i telai degli elementi di chiusura opaca e trasparente. La sottostruttura scarica il suo peso in orizzontale e verticale sulla struttura principale dell'edificio. Le guarnizioni presenti tra gli elementi di alluminio permettono di regolare le deformazioni dovute a dilatazioni lineari a cui i profilati d'alluminio potrebbero essere soggetti nel tempo.

Tutti gli elementi in alluminio utilizzati sono caratterizzati da un trattamento superficiale realizzato presso impianti omologati secondo le direttive tecniche del



Fig. 5.8. Prototipo, immagini delle fasi di realizzazione

marchio di qualità Qualicoat per la verniciatura (eseguita rispettando le indicazioni della norma UNI 9983) e Qualanod per l'ossidazione anodica (eseguita rispettando le indicazioni della norma UNI 10681).

5.3.2 Serramenti apribili a battente ⁶

La pelle interna è caratterizzata dalla presenza di due serramenti apribili a battente contenenti il tamponamento opaco e quello trasparente; l'infisso trasparente presenta la doppia apertura a battente.

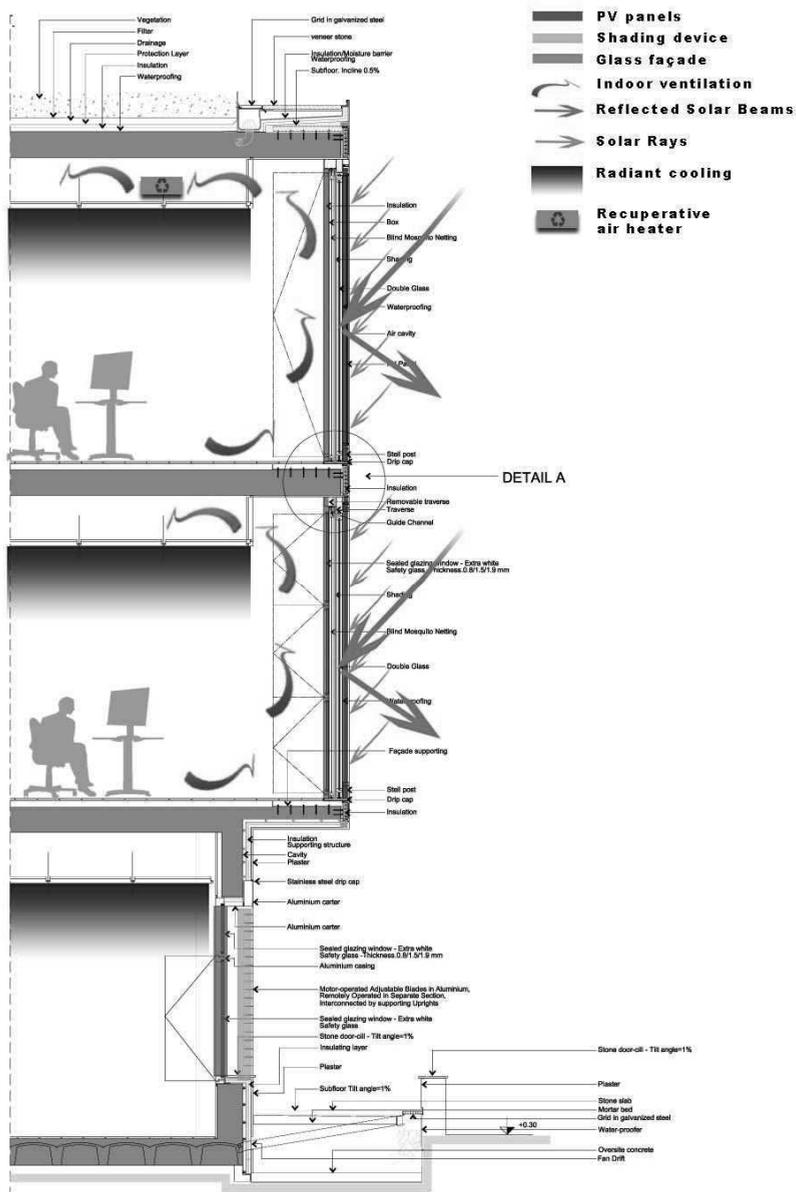


Fig. 5.9. Ipotesi di integrazione del componente di facciata in edificio per uffici.

Entrambi gli infissi sono realizzati con profili estrusi in lega primaria di alluminio EN AW-6060 a taglio termico, caratterizzati da un trattamento superficiale realizzato presso impianti omologati secondo le direttive tecniche del marchio di qualità Qualicoat per la verniciatura⁷ e Qualanod per l'ossidazione anodica⁸.

La larghezza del telaio fisso è di 75,00 mm mentre l'anta a sormonto (all'interno) misurerà 85,00 mm.

Tutti i profili, sia di telaio che di anta, sono realizzati secondo il principio delle tre camere, costituiti da elementi interni ed esterni tubolari e dalla zona di isolamento, garantiscono una buona resistenza meccanica e la possibilità di realizzare giunzioni a 45° e 90° stabili e ben allineate. Le ali di battuta dei profili di telaio fisso (L,T etc.) sono alte 25,00 mm.

Il collegamento tra la parte interna e quella esterna dei profili è realizzato mediante listelli di materiale sintetico termicamente isolante (Polythermid o Poliammide), dotati di due inserti in alluminio, posizionati in corrispondenza della zona di accoppiamento, per aumentare la resistenza allo scorrimento del giunto.

I listelli hanno una larghezza di 37,5 mm per le ante e 42,5 mm per i telai fissi, e sono dotati di inserto in schiuma per ridurre la trasmissione termica per convezione e irraggiamento.

Il serramento scelto ha una trasmittanza termica U_f di 1,2 W/m²K, calcolata secondo le norme UNI EN ISO 10077-2 e verificata in laboratorio secondo le norme UNI EN ISO 12412-2.

La scelta di adottare questo tipo di infissi ci garantisce di rispettare i limiti previsti dalla normativa italiana in merito al contenimento dei consumi energetici attraverso le componenti di involucro trasparente. Il decreto legislativo 192/2005 indica i seguenti limiti suddivisi per zone climatiche: A 3,9 W/m²K; B 2,6 W/m²K; C 2,1 W/m²K; D 2,0 W/m²K; E 1,6 W/m²K; F 1,4 W/m²K. Non avendo una normativa di riferimento per le facciate continue trasparenti monostrato o a doppia pelle i produttori di serramenti e di componenti di involucro certificano i loro prodotti verificando le prestazioni della pelle interna assimilandola ad un infisso trasparente.

Tutti i telai, fissi e apribili, garantiscono il drenaggio dell'acqua attorno ai vetri e la rapida compensazione dell'umidità dell'aria nella camera di contenimento delle lastre.



Fig. 5.10. Prototipo. Assemblaggio della struttura primaria in montanti e traversi della pelle interna e della pelle esterna

L'eventuale ristagno di acqua da infiltrazione o condensazione è controllato attraverso l'adozione di profili realizzati con listelli perfettamente complanari con le pareti trasversali dei semiprofilo interni. I semiprofilo esterni hanno invece pareti trasversali posizionate più in basso dei profili interni per facilitare il drenaggio verso l'esterno dell'acqua che si potrebbe depositare in corrispondenza dei telai fissi e dei telai apribili. Il drenaggio e la ventilazione dell'anta avvengono attraverso il tubolare esterno. Le asole di drenaggio dei telai sono protette esternamente con apposite conchiglie che, nel caso di zone particolarmente ventose, possono essere dotate di membrana posta in corrispondenza delle specchiature fisse.

Alla sottostruttura in montanti e traversi sono agganciati i telai degli elementi di chiusura opaca e trasparente. La sottostruttura scarica il suo peso in orizzontale e verticale sulla struttura principale dell'edificio. Le guarnizioni presenti tra gli elementi di alluminio permettono di regolare le deformazioni dovute a dilatazioni lineari a cui i profilati d'alluminio potrebbero essere soggetti nel tempo.

Tutti gli elementi in alluminio utilizzati sono caratterizzati da un trattamento superficiale realizzato presso impianti omologati secondo le direttive tecniche del marchio di qualità Qualicoat per la verniciatura (eseguita rispettando le indicazioni della norma UNI 9983) e Qualanod per l'ossidazione anodica (eseguita rispettando le indicazioni della norma UNI 10681).

Le giunzioni a 45° e 90° sono realizzate per mezzo di apposite squadrette e cavallotti in lega di alluminio dotate di canaline per la distribuzione della colla. L'incollaggio è effettuato dopo aver assemblato i telai consentendo la corretta distribuzione della colla su tutta la giunzione. Sono inoltre previsti elementi di allineamento e supporto alla sigillatura da montare dopo l'assemblaggio delle giunzioni.

Le guarnizioni cingivetro, che distanziano di 4,00 mm il tamponamento trasparente dal telaio metallico, sono in elastomero (EPDM) e servono per compensare le sensibili differenze di spessore che si possono riscontrare quando si utilizzano lastre di vetrocamera e/o stratificate. Queste guarnizioni sono dotate di alette che seguono l'intera estensione del vetro in modo da formare più camere e ridurre il ponte termico che si può formare in corrispondenza di questa zona.

5.3.3 Tamponamento in alluminio coibentato

La pelle interna è caratterizzata dalla presenza di due tamponamenti a diversa traslucenza:

- un pannello con opaco in alluminio coibentato
- un pannello trasparente con tamponamento in doppio vetro basso-emissivo.

L'elemento di tamponamento è alto 280,00 cm, largo 130,00 cm ed ha uno spessore di 6,00 cm. Lo spessore può essere incrementato fino a 10,00 cm con l'addizione, mediante chiodatura, di un pannello di polistirene espanso sintetizzato incollato a due strati di legno di abete. Lo spessore delle lamiere in alluminio varia in relazione allo spessore dell'isolante di riempimento da 4,00 mm a 5,00 mm.⁹

Il tamponamento coibentato in alluminio sarà fornito in opera finito, completo di:

- Sottostruttura e telaio di alluminio
- Lastre di contenimento in alluminio, fissate sui quattro lati alla sottostruttura
- Riempimento in poliuretano espanso di 5,00 cm e compensato marino di 1,00 cm posto nella mezzeria del pannello per incrementarne la resistenza meccanica.

La scelta degli spessori e del tipo di isolante è stata fatta in funzione della necessità di muovere la partitura in caso di manutenzione, individuando materiali che pur

garantendo ottime prestazioni in termini di resistenza termica non presentino un peso proprio eccessivo. Il carter di contenimento è realizzato in modo da garantire la totale tenuta all'acqua dell'elemento, in modo da evitare eventuali infiltrazioni o creazioni di umidità interstiziale che potrebbero compromettere le prestazioni dell'isolante termico.

Il pannello è alloggiato, all'interno di un telaio a taglio termico; dotato di serramento a scomparsa si aprirà solo in caso di manutenzione del pannello fotovoltaico o degli elementi scorrevoli.

Lo stesso tipo di tamponamento può essere adottato per tamponare il pannello opaco della pelle esterna nel caso in cui non si vogliono utilizzare i pannelli fotovoltaici o vetrate serigrafate.

Il pannello coibentato è realizzato come un infisso apribile a battente ma non presenta il serramento a vista poiché l'apertura è prevista solo in caso di manutenzione della facciata.

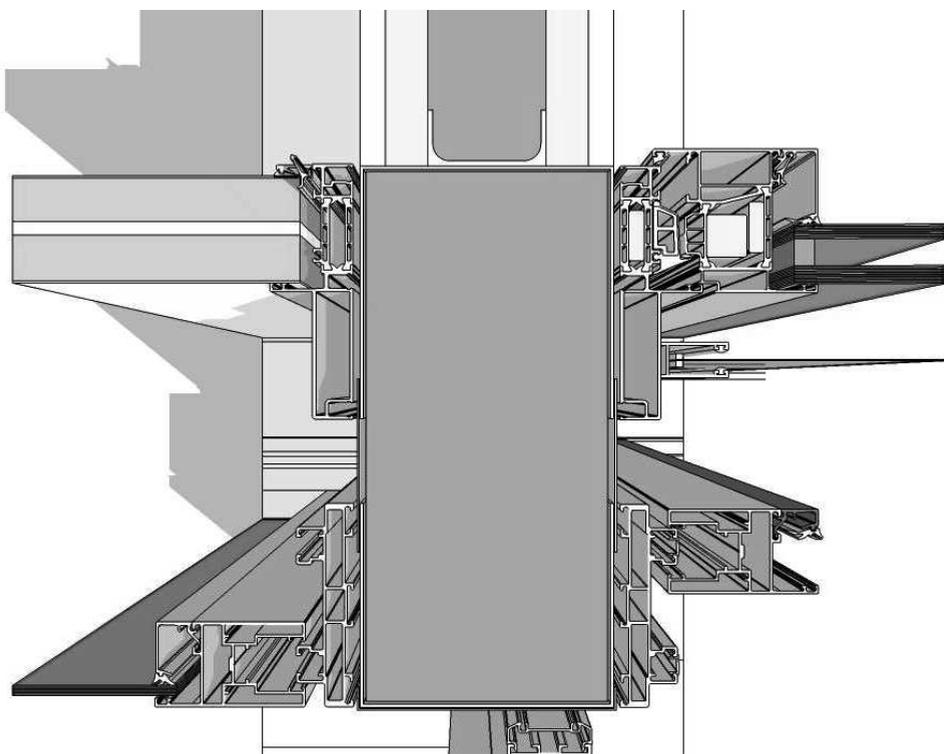


Fig. 5.11. Particolare del nodo di attacco al montante verticale della facciata dinamica.

I serramenti adottati sono classificati come indicato dalla normativa europea, a seguito di idonee prove in laboratorio, come segue:

Permeabilità all'aria per finestre e porte classificazione secondo UNI EN 12207:2000, metodo di prova secondo UNI EN 1026:2001. Il serramento scelto è classificato con valore minimo: Classe 3
 Tenuta all'acqua per finestre e porte classificazione secondo UNI EN 12208:2000, metodo di prova secondo UNI EN 1027:2001. Il serramento scelto è classificato con valore minimo: Classe 9 A.
 Resistenza al vento per finestre e porte classificazione secondo UNI EN 12210:2000, metodo di prova secondo UNI EN 12211:2000. Il serramento scelto è classificato con valore minimo: Classe 3

5.3.4 Tamponamento in vetro

Il tamponamento in vetro è presente:

- Nell'infisso trasparente della pelle interna, che si apre a battente ed a vasistas, ed è realizzato con vetrata termoisolante, dello spessore totale di 35,5 mm, composta da:
 - Una lastra esterna stratificata antinfortunio, molata perimetralmente, con trattamento superficiale magnetronico basso emissivo antisolare posto verso l'intercapedine e composta da float chiari e plastici ad attenuazione acustica dello spessore di 10,5 mm;
 - Intercapedine di spessore 16,0 mm riempita con gas argon e contenente doppia sigillatura e distanziatore metallico;
 - Lastra interna stratificata antinfortunio, molata perimetralmente, composta da float chiari e plastici pvb interposti dello spessore di 8,5 mm.

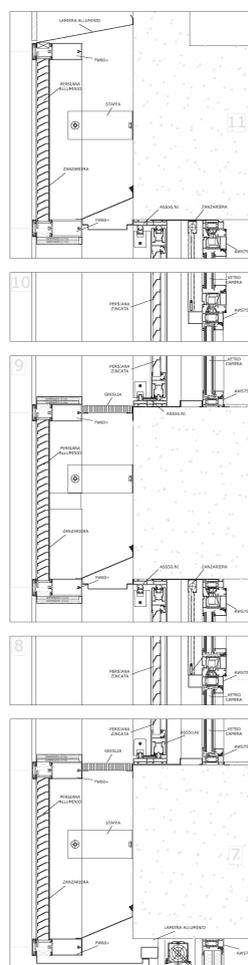
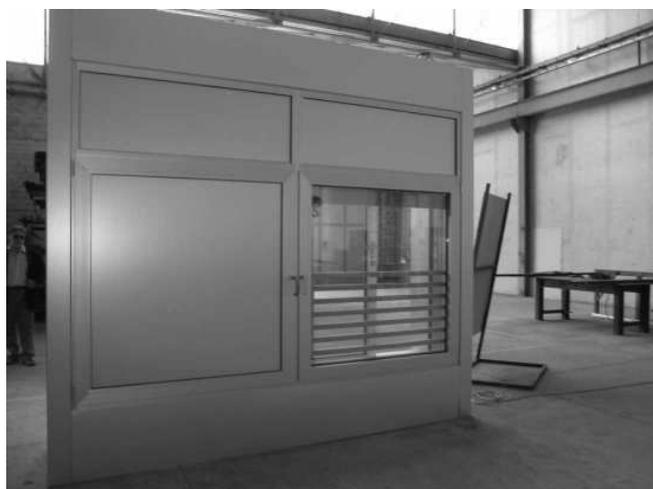


Fig. 5.12. A sinistra. Prototipo. Pelle interna con le ante della componente opaca e trasparente aperte e chiuse

Fig. 5.13. A destra. Sezione Verticale della pelle interna

- Nell'infisso scorrevole, che si apre nei mesi invernali trasformando il componente di facciata in una doppia pelle trasparente con intercapedine non ventilata, il tamponamento è costituito da una vetratura stratificata dello spessore di 8,5 mm.

I riempimenti vetrati saranno posati in opera:

- nel caso delle vetrate fisse, mediante serraggio diretto nella griglia;
- nel caso delle vetrate mobili, utilizzando per la finestra un profilato con telaio fisso adattato, la cui forma consenta la posa in opera tra montanti o traversi ed elementi di serraggio

Il profilato scelto garantisce l'installazione di vetri con spessori compresi tra 8,00 e 60,00 mm, permettendo di personalizzare l'infisso in relazione alle prestazioni da raggiungere in termini di trasmittanza termica.

5.4 L'intercapedine

5.4.1 Accessori

Il componente di facciata strutturato come una doppia pelle è caratterizzato da un'intercapedine profonda 60,00 cm:

- 30,00 cm sono complanari al solaio dell'edificio e servono come appoggio per l'alloggiamento dei pannelli scorrevoli;
- 30,00 cm sono costituiti da una griglia in acciaio dedicata alla manutenzione del sistema di facciata.

Nella parte superiore il componente è delimitato da una lamiera forata sormontata da una guaina sigillata con del silicone al solaio ed al traverso della pelle esterna. La guaina evita che la condensa che si può formare all'interno di questo spazio possa provocare gocciolamenti sui traversi degli elementi scorrevoli.

Nella parte inferiore o superiore della pelle esterna sono integrate le lamelle di alluminio destinate alla ventilazione dello spazio, si tratta di sedici elementi inclinati di sessantacinque gradi rispetto all'orizzontale dietro ai quali è installata una rete antinsetti che evita l'ingresso di piccoli animali o insetti all'interno della buffer zone.

Tutti gli elementi del sistema sono realizzati in lega primaria di alluminio EN AW-6060, caratterizzati da un trattamento superficiale realizzato presso impianti omologati secondo le direttive tecniche del marchio di qualità Qualicoat per la verniciatura¹⁰ e Qualanod per l'ossidazione anodica¹¹.



Fig. 5.14. Prototipo: maniglia a scomparsa dell'anta opaca del componente di facciata

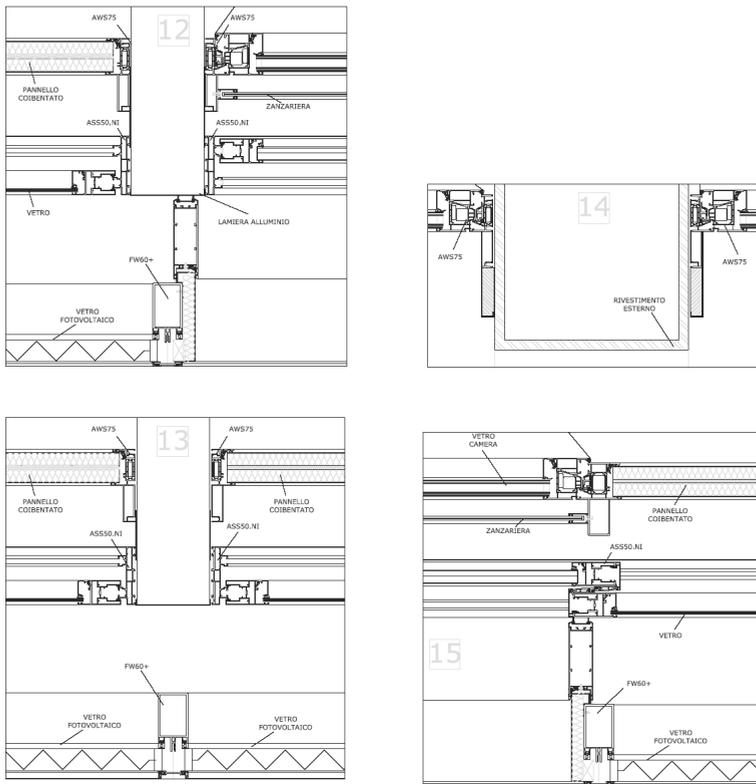
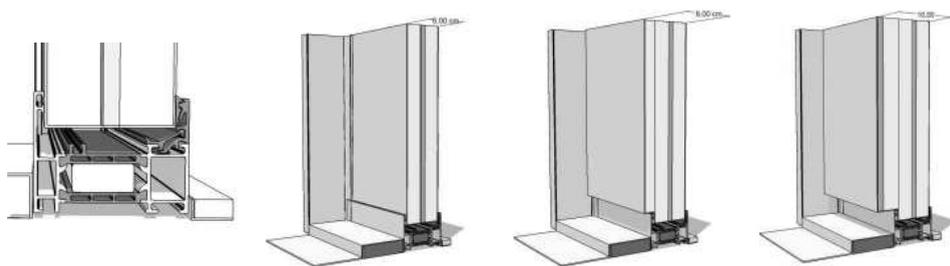


Fig. 5.15. Dettagli esecutivi in pianta degli attacchi tra i pannelli e gli elementi verticali



Spessore pannello isolante (mm)	60	80	100
Spessore lastre di alluminio (mm)	4	4- 5	5
Peso (Kg/m ²)	9,2	10,6	12,1
K (W/m ² K)	0,38	0,24	0,21
kcal/m ² h°C	0,28	0,21	0,18

Fig. 5.16: Analisi delle prestazioni in termini di isolamento termico della componente opaca all'incremento dell'isolante termico

5.4.2 Serramenti scorrevoli¹²

I serramenti scorrevoli alloggiati nell'intercapedine e caratterizzati da tamponamento in vetro e lamelle schermanti sono realizzati con telai con larghezza fissa su tutti e quattro i lati di 120,00 mm e anta a sormonto (all'interno) di 50,00 mm.

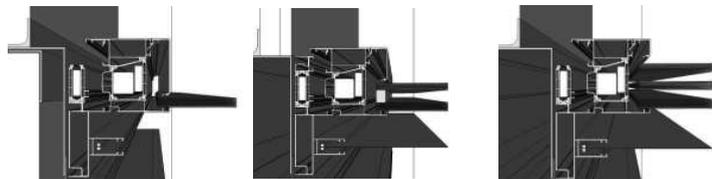
I pannelli scorrono su rotaie inferiori dotate di guide di scorrimento realizzate in acciaio inossidabile in modo da evitare danneggiamenti dovuti all'usura nella movimentazione delle ante e al passaggio di cose e/o persone.

La rotaia di scorrimento inferiore è dotata di un tubolare esterno che garantisce il deflusso dell'acqua piovana, che in questo modo non ristagna presso il tubolare centrale ed il tubolare interno. Tutti i telai, fissi e apribili sono realizzati in modo da favorire il drenaggio dell'acqua attorno ai vetri e la rapida compensazione dell'umidità dell'aria nella camera di contenimento delle lastre. L'evacuazione dell'acqua piovana, raccolta nella rotaia di scorrimento inferiore, avverrà esclusivamente attraverso la camera del tubolare esterno della rotaia stessa senza interessare il tubolare centrale ed il tubolare interno.

Le ante scorrevoli si muovono per mezzo di carrelli a tandem ad asta oscillante, con una portata massima per ciascuna ruota di 75,00 kg. Le ruote sono realizzate con materiale antifrizione e antiusura e sono sagomate a V per garantire l'autocentratura sulla guida di scorrimento metallica.

Come per le ante a battente, anche per le ante scorrevoli sono stati scelti sistemi di guarnizione e di aggancio che presentano le seguenti caratteristiche:

- Le guarnizioni cingivetro sono realizzate in elastomero (EPDM) e servono per



Tipologia di vetratura	44.4	44.4 - 16-55.5	44.4 -12- 44.4 - 12 - 55.5
Intercapedine	-	Argon 90%	Argon 90%
Peso (kg/m ²)	20,4	45,8	66,2
Spessore (mm)	8,0	31,0	51
Trasmissione %	71%	24%	13
Riflessione sterna %	7%	31%	35
Assorbimento A1 %	22%	37%	30
Assorbimento A2 %	-	7%	9
Assorbimento A3 %	-	-	12
Fattore solare g %	0,77	0,32	0,31
Shading coefficient SC %	0,88	0,37	0,36
Trasmissione termica (W/m ² K)	5,70	1,1	0,8

Fig. 5.17: Analisi delle prestazioni in termini di isolamento termico della componente trasparente in relazione al tipo di vetro adottato

Tipo di vetro			Verticale			Orizzontale		
			Nord	Sud	Est	Ovest	-	
CLIMA FREDDO	Doppio vetro	Float						
		Basso emissivo	Pirolitico	XX	XX	XX	XX	XX
			Magnetronico					
		Selettivo		X	X	X	X	XX
		Controllo solare						
	Triplo vetro	Basso emissivo		X	X	X	X	XX
	TIM			X	X	X	X	X
	Vetro sottovuoto			X	X	X	X	X
	Intercapedine	Aria		XX	XX	XX	XX	XX
		Argon		XX	X	X	X	X
		Krypton		X	X	X	X	X
CLIMA TEMPERATO	Doppio vetro	Float		XX	X	X	X	X
		Basso emissivo	Pirolitico					
			Magnetronico					
		Selettivo		X	XX	XX	XX	XX
		Controllo solare						
	Triplo vetro	Basso emissivo						
	TIM			X				
	Vetro sottovuoto							
	Intercapedine	Aria		XX	XX	XX	XX	XX
		Argon		X	X	X	X	X
		Krypton		X				
CLIMA CALDO	Doppio vetro	Float		X				
		Basso emissivo	Pirolitico	X	X	X	X	X
			Magnetronico					
		Selettivo		X	XX	XX	XX	XX
		Controllo solare			X			X
		Basso emissivo						
		Aria		XX	X	X	X	X
		Argon		X				X
		Krypton						

Tab.6.1: Scelta dei sistemi di vetratura in funzione delle aree climatiche e del tipo di orientamento. Da: Lucchi E., Intelligenti e Termosensibili, in Modulo n.358, Febbraio 2010

compensare le tolleranze di spessore delle lastre di vetrocamera, garantendone, contemporaneamente, la corretta distribuzione perimetrale. Le guarnizioni di tenuta, sono costituite da una doppia barriera di spazzolini in lana sintetica idrorepellente ad alta densità, che presentano al centro una pinna flessibile in polipropilene.

- I profili di fermavetro garantiscono l'adozione di vetri con spessore fino a 14,00 mm e sono provvisti di bloccaggi in plastica agganciati al fermavetro stesso. Il dente di aggancio della guarnizione è più arretrato rispetto al filo esterno del fermavetro in modo da ridurre la sezione in vista della guarnizione, riducendo l'effetto cornice.

5.4.3 Il sistema di schermatura

Il componente di facciata è caratterizzato dalla presenza di un pannello scorrevole contenente una schermatura realizzata con trenta lamelle di alluminio orientabili di colore argento.

La distanza, 10,00 cm, la dimensione delle lamelle, 6,00 cm, e l'angolo di inclinazione 30° sono state progettate per garantire un adeguato ombreggiamento dello spazio confinato nei mesi estivi senza incidere sulla visibilità dall'interno verso l'esterno.

Nel prototipo le lamelle, con sezione lineare, sono sostenute da una struttura metallica in alluminio integrata nell'elemento scorrevole.

Il pannello contenente la schermatura può essere personalizzato:

- distanziando e ruotando le lamelle in relazione alla località geografica ed all'orientamento della facciata.
- scegliendo la sezione delle lamelle in funzione della necessità di ridurre la trasmissione del calore verso l'interno nei mesi estivi. Lamelle di sezione ellittica presentano temperature superficiali inferiori a quelle con sezione lineare, poiché la cavità del profilato permette di ventilarne i profili di contenimento.
- adottando finiture cromatiche in funzione della necessità di regolare i valori di riflettanza e trasmittanza solare della schermatura.
- integrando un sistema di schermatura che possa muoversi anche in verticale, assumendo la conformazione di uno schermo aggettante orizzontale, capace di incidere positivamente sul fabbisogno energetico di ambienti orientati verso sud.



Fig. 5.18: Particolari griglia di ventilazione

5.5 La pelle esterna

5.5.1 Elementi della sottostruttura portante

La pelle esterna del componente di facciata dinamico è ancorata orizzontalmente e verticalmente alla struttura portante dell'edificio, ed è caratterizzata da una sottostruttura in montanti estrusi in lega primaria di alluminio EN AW-6060 agganciati ai solai mediante staffe anchesse in alluminio.

I montanti della facciata sono stati dimensionati successivamente al calcolo statico delle caratteristiche della facciata esterna e della struttura dell'edificio, valutando la spinta orizzontale del vento e dimensionando conseguentemente lo spessore dei montanti verticali esterni (sp. 17,00 cm) e la distanza massima tra le staffe di raccordo ai solai (360,00 cm).

Le staffe sono in acciaio E24, zincato Z275 e devono essere in atmosfera esterna protetta e ventilata, arriveranno in cantiere piegate e imbutite

Montanti e traversi saranno installati in modo isolato in cantiere e ancorati alla struttura portante, consentendo comunque i movimenti sul piano della stessa. Gli attacchi dei montanti sono progettati in modo da permettere i movimenti verticali e così da trasmettere alla struttura solo i carichi orizzontali dovuti al vento.

I traversi saranno alloggiati tramite penetrazione per fresatura dei montanti, la tenuta tra i due elementi è realizzata grazie a un elemento in gomma adattato. La penetrazione del traverso nel montante è caratterizzata da un grado di libertà che ne consente la dilatazione. Il gioco è dell'ordine di qualche millimetro. Le battute realizzate nei traversi garantiscono:

- Il drenaggio dell' acqua derivante da infiltrazione o delle acque di condensa;
- La regolazione delle pressioni meccaniche che si possono avere tra interno ed esterno.

5.5.2 L'impianto fotovoltaico

Il pannello opaco della pelle esterna del componente di dimensioni 2,92 m per 1,48 m è destinato all'alloggiamento di tre moduli fotovoltaici in silicio policristallino posti orizzontalmente. I moduli fotovoltaici scelti garantiscono per ogni modulo una produzione che varia da 0,50 a 0,30 KwP in relazione all'orientamento ed alla localizzazione del pannello.

Il pannello fotovoltaico policristallino scelto è costituito da:

1. Una lastra di vetro temprato, che assicura una buona trasmittanza termica (> 90%) ed un'ottima resistenza meccanica;
2. Un primo foglio sigillante trasparente in EVA (acetato vinile etilenico) che garantisce la tenuta agli agenti esterni ed un buon isolamento dielettrico;
3. Le celle fotovoltaiche;
4. Un secondo foglio sigillante in EVA per l'isolamento posteriore;
5. Una scatola di contenimento in alluminio coibentato dello spessore di 5,00 cm.

Nella parte posteriore del modulo fotovoltaico è collocata la scatola di giunzione per i collegamenti elettrici necessari per l'installazione.

L'integrazione fotovoltaica dovrà seguire un'attenta progettazione dell'intero corpo di fabbrica, valutando attentamente l'orientamento del prospetto che ospiterà il sistema di facciata fotovoltaico. Per le facciate orientate a sud o a sud-est, è consigliabile alloggiare pannelli in silicio monocristallino o policristallino. Il silicio monocristallino ha un

grado di maggior purezza del materiale e garantisce le migliori prestazioni in termini di efficienza avendo il rendimento più alto pari al 15%. Si presenta di colore blu scuro uniforme e ha una forma circolare o ottagonale, di dimensione dagli 8 ai 12 cm di diametro e 0.2 -0.3 mm di spessore.

Il silicio policristallino ha una purezza minore, condizione che comporta una minor efficienza ossia il loro rendimento si aggira tra l'11 e il 14%. Si presenta di un colore blu intenso cangiante dovuto alla struttura policristallina. Ha forma quadrata o ottagonale e di spessore analogo al precedente tipo.

Per le facciate orientate in maniera meno ottimale, nord-est e nord-ovest, sarà consigliabile scegliere pannelli in silicio amorfo. Il silicio amorfo si ottiene dalla deposizione di uno strato sottilissimo di silicio cristallino (1-2 micron) su superfici di altro materiale, ad esempio vetri o supporti plastici. In questo caso è improprio parlare di celle, in quanto possono essere ricoperte superfici anche consistenti in modo continuo.

L'efficienza di questa tecnologia è sensibilmente più bassa, nell'ordine del 5-6.8% ed è soggetta a un decadimento consistente (-30%) delle proprie prestazioni nel primo mese di vita (effetto Stabler-Wronsky) che impone quindi un sovradimensionamento della superficie installata, in modo da consentire in fase di esercizio la produzione di energia elettrica preventivata in sede di progetto, tuttavia garantisce una sensibilità maggiore alla captazione della radiazione solare a bassa intensità.

Come già precedentemente detto l'integrazione del pannello fotovoltaico in facciata migliorerà le prestazioni termiche generali dell'edificio, poiché il pannello contribuirà a riscaldare l'aria dell'intercapedine dove è alloggiato di qualche grado, contribuendo alla riduzione delle dispersioni termiche. Nei mesi estivi, le bocchette di ventilazione poste nella parte inferiore e superiore del sistema di facciata garantiranno la fuoriuscita dell'aria calda ed eviteranno il surriscaldamento dello spazio interno e dello stesso pannello che a causa di un eccessivo innalzamento delle temperature potrebbe avere problemi di efficienza.

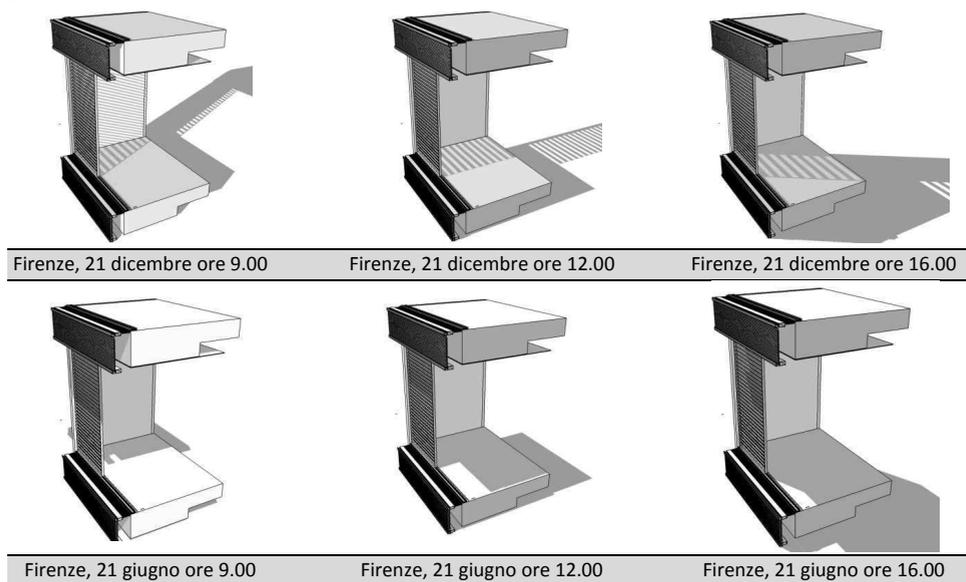


Fig. 5.19: Analisi dell'obreggiamento a Firenze in due stagioni dell'anno per valutare l'efficacia della schermatura proposta

LAMELLA COLOR ARGENTO	AS	RS	TS	TV	AV	RV
	0,57	0,43	0	0	0,57	0,43
	AS 45°	RS 45°	TS 45°	TV 45°	OF	RV 45°
	0,61	0,32	0,06	0,11	0	0,32
	G tot 45°	TV tot 45°		Te tot 45°	Qi tot 45°	
	9,12 %	8,81 %		3,24 %	5,88 %	
	G tot 90°	TV tot 90°		Te tot 90°	Qi tot 90°	
	5,02 %	0 %		0 %		

Tab. 6.2: Analisi del fattore solare di una tenda esterna a lamelle a 45° di colore argento posta davanti un vetro doppio basso emissivo (4+16+4). Calcolo effettuato con il software Shade Calc

LAMELLA BIANCA BASSO EMISSIVE	AS	RS	TS	TV	AV	RV
	0,30	0,70	0	0	0,23 %	0,77
	AS 45°	RS 45°	TS 45°	TV 45°	OF	RV 45°
	0,37	0,53	0,11	0,19	0	0,58
	G tot 45°	TV tot 45°		Te tot 45°	Qi tot 45°	
	10,14 %	16,12 %		6,37 %	3,77 %	
	G tot 90°	TV tot 90°		Te tot 90°	Qi tot 90°	
	2,64 %	0 %		0 %	2,64 %	

Tab. 6.3: Analisi del fattore solare di una tenda esterna a lamelle a 45° di colore bianco posta davanti un vetro doppio basso emissivo (4+16+4). Calcolo effettuato con il software Shade Calc

LAMELLA GRIGIA	AS	RS	TS	TV	AV	RV
	0,43	0,57	0	0	0,37	0,63
	AS 45°	RS 45°	TS 45°	TV 45°	OF	RV 45°
	0,49	0,43	0,09	0,16	0 %	0,47
	G tot 45°	TV tot 45°		Te tot 45°	Qi tot 45°	
	9,95 %	13,95 %		5,04 %	4,91 %	
	G tot 90°	TV tot 90°		Te tot 90°	Qi tot 90°	
	3,78 %	0%		0 %	3,78 %	

Tab. 6.4: Analisi del fattore solare di una tenda esterna a lamelle a 45° di colore bianco posta davanti un vetro doppio basso emissivo (4+16+4). Calcolo effettuato con il software Shade Calc

AS assorbimento energetico, RS riflessione energetica, TS trasmissione energetica con lamelle a 45° e a 90° (chiuse), AV assorbimento visivo, RV riflessione visiva, TV trasmissione visiva con lamelle a 45° e a 90° (chiuse), OF fattore d'apertura della lamella (OF: openness factor), G_{tot} fattore solare totale con lamelle a 45° e a 90°, T_{e tot} trasmissione solare (energetica) con lamelle a 45° e a 90°, TV tot trasmissione luminosa (visiva) con lamelle a 45° e a 90°, Q_{i tot} fattore di trasmissione di calore secondario con lamelle a 45° e a 90°

FIRENZE	G glob S 21/3	G glob SE 21/3	G glob SO 21/3
	15,9 %	18,01 %	15,9 %
	G glob S 21/6	G glob SE 21/6	G glob SO 21/6
	15,9 %	15,9%	18,01%
MILANO	G glob S 21/3	G glob SE 21/3	G glob SO 21/3
	15,9 %	19,69 %	15,9 %
	G glob S 21/6	G glob SE 21/6	G glob SO 21/6
	15,9 %	15,9%	19,69%
PALERMO	G glob S 21/3	G glob SE 21/3	G glob SO 21/3
	15,9 %	15,9 %	15,9 %
	G glob S 21/6	G glob SE 21/6	G glob SO 21/6
	15,9 %	15,9%	15,9%

Tab. 6.5: Confronto del fattore solare di una tenda esterna orizzontale a proiezione 30° 90°, di colore argento, posta davanti un vetro doppio basso emissivo (4+16+4) e collocata a: Firenze, Milano e Palermo. Calcolo effettuato con il software Shade Calc . Nella tabella sopra sono indicati i valori relativi al fattore solare totale (G glob) relativo a tre tipi di affaccio (Sud, Sud-Est, Sud -Ovest) e a due giorni scelti (21/3 equinozio di primavera, 21/6 solstizio d'estate).

Il parametro fondamentale, che permette di fare valutazioni importanti sul risparmio energetico derivante dall'utilizzo di un particolare dispositivo di schermatura solare, è sicuramente il fattore solare totale (G_{tot} 45°/90°) relativo al tipo di schermatura scelto. Ricordiamo che, secondo la norma UNI EN 14501 valori di $g_{tot} \geq 0,5$ hanno un'influenza sul comfort termico molto bassa mentre valori di $g_{tot} < 0,1$ soffrono di influenza sul comfort termico molto buona.

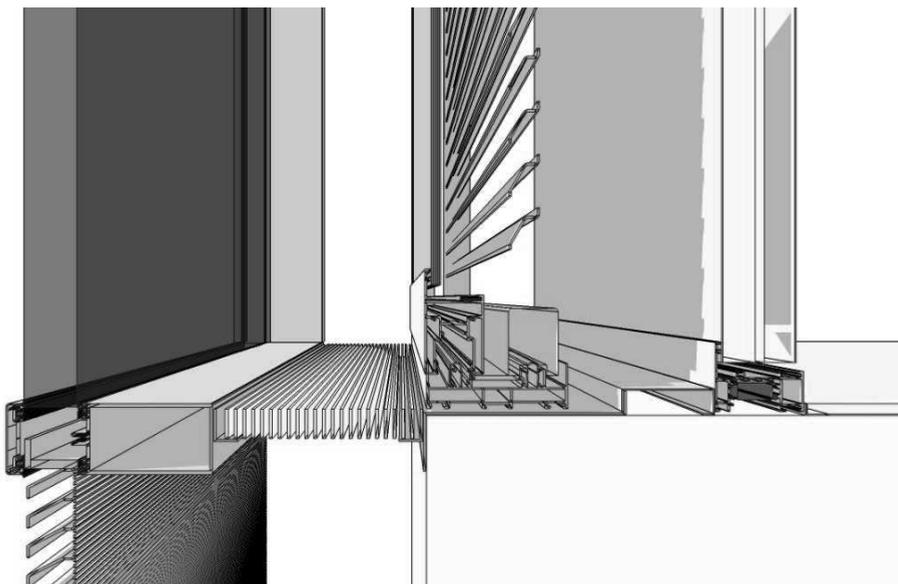


Fig. 5.20.: Particolare intercapedine con alloggiamento dei pannelli scorrevoli e griglia di manutenzione

I pannelli fotovoltaici contenuti nella componente opaca saranno collegati in serie tra quelli contenuti in più moduli di facciata a formare una stringa della potenza minima richiesta per collegarsi ad un inverter.

Ogni stringa sarà dotata di un suo quadro di campo con opportuno sezionatore ed eventuale diodo di blocco. L'impianto sarà provvisto di quadri di campo lato c.a. in cui saranno alloggiati i dispositivi di generatore associati al singolo inverter. Il quadro di protezione sarà dotato del dispositivo d'interfaccia che dovrà provvedere alla sorveglianza delle tensioni concatenate di rete e protezione per minima o massima tensione e della frequenza e protezione per minima e massima frequenza.

Il quadro di tensione può essere collocato nell'intercapedine del componente, gli inverter andranno alloggiati in uno spazio areato e ben protetto dell'edificio, all'interno o in corrispondenza del solaio contro terra e di quello di copertura.

5.6 Requisiti prestazionali

La fase di stesura della proposta progettuale è stata caratterizzata dalla verifica dei seguenti requisiti prestazionali¹³:

- Sicurezza strutturale intesa come:

- Resistenza meccanica ai carichi statici (dovuti al peso proprio ed agli eventuali carichi di esercizio), sospesi (da considerare soprattutto per le pareti leggere e trasparenti) e dinamici (dovuti all'azione del vento, rispetto ai quali occorre considerare l'efficienza degli strati di tenuta, o all'azione sismica);
- Resistenza agli urti (da considerare nel rispetto della necessità di evitare il distacco di elementi);
- Comportamento in caso d'incendio (da considerare nel rispetto della necessità di conservare le caratteristiche di stabilità e di isolamento durante un tempo determinato, senza che i materiali contribuiscano alla propagazione del fuoco o di fumi tossici);
- Resistenza alle deformazioni (da considerare nel rispetto della necessità di permettere i movimenti differenziali della struttura portante, senza comportare il decadimento di altre prestazioni, ed in particolare, di tenuta);
- Sicurezza al contatto.

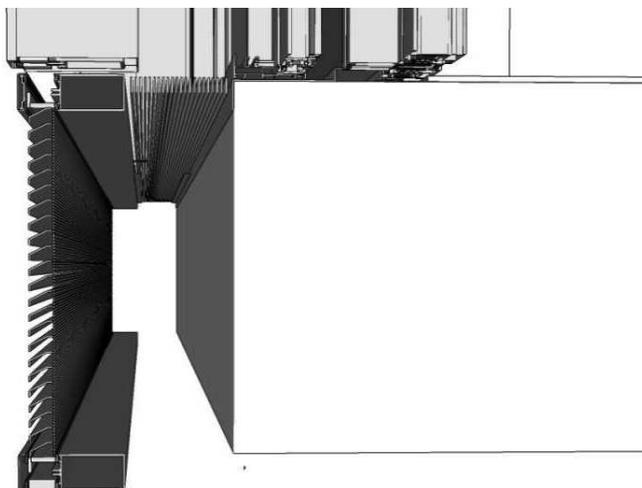


Fig. 5.21: Particolare delle lamelle di ventilazione con pannello di rete metallica anti-insetti retrostante

- Benessere, con verifica delle condizioni igrotermiche, acustiche ed alla non emissione di sostanze nocive all'interno degli spazi confinati¹⁴;
- Aspetto, avendo cura di prestare attenzione ai contenuti inerenti la concezione formale, alla scelta dei materiali e al tipo di finitura superficiale che deve garantire planarità e omogeneità.
- Fruibilità, in relazione alla necessità che la conformazione del componente non influenzi l'organizzazione dello spazio interno.
- Manutenibilità, indicando le procedure di controllo in esercizio e di manutenzione.

5.6.1 Sicurezza strutturale

Sicurezza strutturale, intesa come stabilità e la resistenza meccanica, è stata verificata avendo cura di valutare in fase di progettazione le seguenti azioni meccaniche a cui il sistema può essere soggetto durante la sua vita utile:

- Carichi a tempo zero;
- Carichi statici permanenti dovuti al peso proprio dei materiali con cui è realizzata ogni parte del componente;
- Azione del vento espressa come pressione e depressione statica;
- Urti accidentali;
- Carichi dovuti a deformazione impedita;
- Carichi da variazione termiche e idrometriche;
- Carichi dovuti ad azione che possono manifestarsi durante la vita utile;
- Assestamenti idrogeologici e delle strutture di supporto;
- Fenomeni di ritiro o cedimento delle strutture di supporto;
- Fenomeno delle fessurazione delle strutture di supporto;
- Fenomeni di degrado delle strutture di supporto, causati da azioni atmosferiche, comportanti variazioni dimensionali;
- Cedimenti di vincoli;
- Difetti di montaggio che causano imperfezione geometriche in grado di produrre azione meccaniche.

La resistenza e la dimensione degli elementi di supporto e del sistema di fissaggio della facciata sono stati effettuati calcolando l'influenza della combinazione delle seguenti azioni meccaniche:

- Azioni verticali
 - Carico permanente, dato dal peso proprio al metro quadrato di tutti gli elementi che compongono il sistema, compresi gli elementi strutturali;
- Azioni orizzontali
 - La pressione del vento;
 - Spostamenti differenziati, quali le dilatazioni termiche.

Le azioni sismiche non sono state considerate perché la condizione di calcolo per carichi orizzontali dovuti alla spinta del vento permette di valutare la resistenza del componente anche a sollecitazioni telluriche. L'azienda Davini, che ha realizzato il prototipo, ha verificato il dimensionamento degli elementi adottati nel sistema di facciata, indicandoci lo spessore e l'interasse minimo a cui porre i montanti ed i traversi della pelle esterna e le dimensioni delle staffe di aggancio ai solai.

Il dimensionamento di questi elementi, la cui durabilità deve essere paragonata a quella di tutto l'edificio deve essere condotta ogni volta sia necessario mettere in opera il sistema poiché risulta dipendente da parametri relativi all'ubicazione ed all'altezza dell'edificio, all'esposizione della facciata, agli elementi della struttura primaria.

La pelle interna e gli elementi scorrevoli non presentano problemi statici poiché scaricano il loro peso per intero sulla struttura portante dell'edificio.

Tutte le parti in alluminio del sistema garantiscono la resistenza agli urti di cose e persone, verificate come indicato dalla norma UNI EN 949:2000 'Finestre e facciate continue, porte e chiusure oscuranti - Determinazione della resistenza delle porte all'uro con corpo molle e pesante'; le lastre di vetro sono tutte stratificate e temperate in modo da garantire una resistenza meccanica maggiore, inoltre, la partizione fissa dell'apertura trasparente della pelle interna ha la caratteristica di essere antisfondamento, secondo la classificazione delle norme UNI 7172, 9186, 9187, dovendo garantire le prestazioni di un parapetto opaco.

Il pannello opaco, con riempimento isolante, può essere classificato in classe di resistenza agli urti R3+, poiché presenta pareti esterne in alluminio preverniciato posate su contro paramento meccanico in fibrocemento. Si dovrà avere cura, tuttavia, di evitare di colpirlo con pesi consistenti che potrebbero causare impronte, che rischiano di deteriorarne l'aspetto superficiale.

Il componente di facciata grazie alla sua conformazione geometrica e alla presenza di bocchette di ventilazione orientate solo verso l'esterno garantisce un buon comportamento in caso d'incendio, presentando un fattore rischio basso in funzione della tipologia di facciata (Box Window, con divisioni periferiche verticali

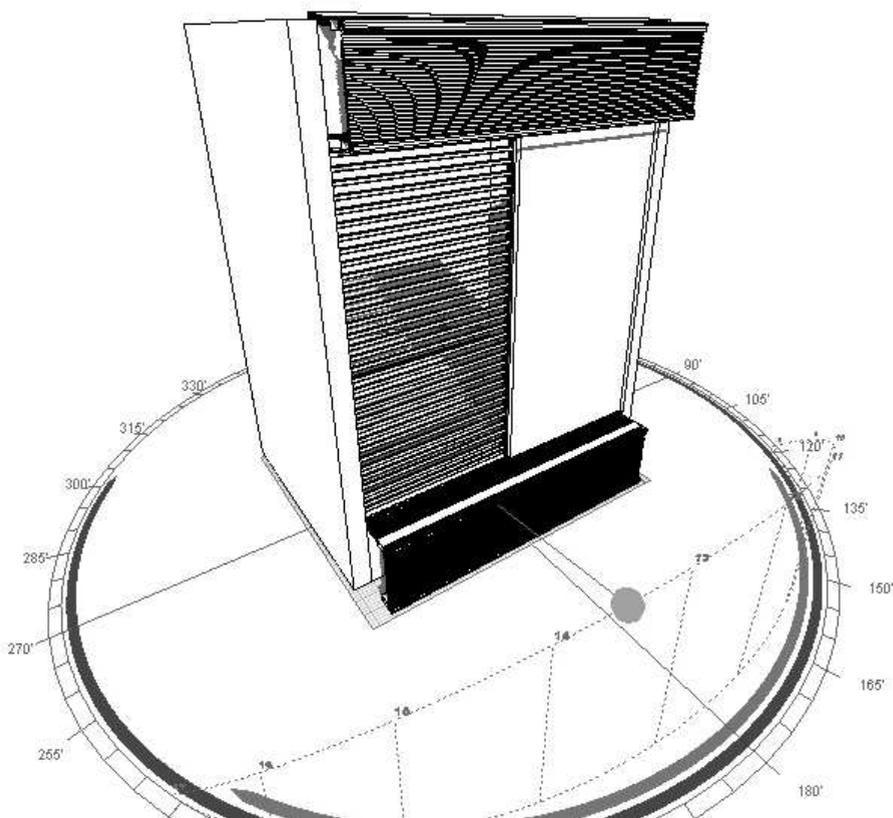


Fig. 5.22: Analisi della schermatura con il programma Ecotect

ed orizzontali) ed alla destinazione dell'edificio (uffici), fattore di rischio che varierà in funzione dell'altezza dell'edificio in cui il componente potrebbe essere installato (edificio fino a 3 piani: fattore di rischio basso; edificio fino da 3 a 10 piani: fattore di rischio medio; edificio fino oltre i 10 piani: fattore di rischio alto).

Tutti gli elementi di alluminio e vetro sono classificati come Reazione al Fuoco Classe '0' e in caso d'incendio non generano l'emissione di fumi o sostanze nocive.

Il sistema di facciata continua deve adattarsi ai movimenti della struttura portante dell'edificio e dovrà essere interrotta in corrispondenza del giunto di dilatazione. In questo caso si avrà cura di utilizzare per la pelle esterna, da ambo le parti del giunto, dei semimontanti collegati tra loro da materiali flessibili, come la gomma, o scorrevoli come le lamiere. I semi-montanti saranno caratterizzati da una sezione che garantisca il deflusso di eventuale acqua che può penetrare al loro interno compromettendone le prestazioni o provocando danni all'ambiente interno. Tutti gli elementi presentano giunti elastici in prossimità dei punti di raccordo, dove si potrebbero avere deformazioni del materiale dovuti a dilatazione termica causata da irraggiamento.

La sicurezza al contatto è garantita dalla scelta di profili con sezioni arrotondate che non causano danno all'utenza e di materiali atossici quali l'alluminio e il vetro.

5.6.2 Benessere

Si rimanda al capitolo 6 per l'analisi dettagliata delle caratteristiche igrotermiche degli elementi che costituiscono il componente e la verifica di come la possibilità di variare la conformazione dell'elemento di facciata incida sui consumi energetici per la climatizzazione invernale ed estiva dell'edificio.

Il componente di facciata dinamico è caratterizzato da un'ampia partitura vetrata, delle dimensioni di 1,35 m per 2,90 m di altezza, con una superficie totale di 3,9 mq, che garantisce di soddisfare i requisiti indicati dal DM 5 luglio 1975 in locali di superficie minima pari a 24,00 mq, in modo da assicurare un fattore di luce diurna medio (FDLm) non inferiore al 2% ed avere una superficie apribile almeno pari a 1/8 dell'area di pavimento (rapporto aereo illuminante).

La possibilità di combinare il modulo di facciata in modo flessibile garantisce il rispetto di questi parametri anche in ambienti di dimensioni maggiori.

Valutazioni più accurate sul fattore di luce diurna garantito dall'adozione del sistema di facciata proposto sono state effettuate nel capitolo 6 dove si suggeriscono conformazioni planimetriche ottimizzate per ambienti destinati ad uffici capaci di incrementare il contributo della luce naturale, riducendo così i consumi di energia elettrica.

In relazione al requisito di comfort acustico, è importante ricordare che il tipo di facciata progettato garantisce ottime prestazioni sia in relazione alle caratteristiche dei materiali che alla conformazione geometrica scelta.

In merito alle prestazioni dei singoli elementi:

- I profilati adottati per la realizzazione della pelle interna e della pelle esterna garantiscono un'attenuazione acustica R_w di 49 dB
 - Tamponamento in vetrocamera dell'infisso della pelle interna attenuazione acustica R_w 46 db in accordo a EN ISO 140-717
 - Tamponamento in vetro 4.4 del pannello scorrevole posto nell'intercapedine attenuazione acustica R_w 32 db in accordo a EN ISO 140-717
 - Pannello in alluminio con riempimento in Polistirene espanso massa volumica 30 kg/m³ garantisce un isolamento acustico apparente R_w di 53 dB
- L'intero componente, che può essere assimilato ad una facciata doppia pelle con

intercapedine ventilata garantisce un indice d'isolamento acustico standardizzato di facciata (D2m,nT) di circa 50 dB¹⁵, questa prestazione dovrà essere comunque verificata attraverso prove in laboratorio o, successivamente alla messa in opera, attraverso una campagna di misurazioni che permettano di valutare l'indubbio contributo dato dalla buffer zone presente tra le due facciate continue. Le prove dovranno essere effettuate nel rispetto delle prescrizioni contenute nelle norme UNI EN ISO 140 - 3 : 2006 e UNI

REQUISITO	ELEMENTO DA CONTROLLARE	GRANDEZZA	VINCOLO LEGISLATIVO	LEGISLAZIONE DI RIFERIMENTO
Risparmio energetico - Benessere termigrometrico	Dispersioni termiche per trasmissione della pelle interna (vetri, serramenti, componente opaca)	Trasmittanza termica (U) per le superfici opache trasparenti	Requisiti minimi fissati per le diverse aree climatiche	D.lgs. 311/2006
	Apporti solari gratuiti della superficie trasparente	Fattore solare (g)	Presenza di un sistema di schermatura solare oppure $g < 50\%$	DPR 59/2009
Benessere visivo	Potenza dell'illuminazione naturale nel locale	Fattore di luce diurna medio (FDLm)	$\geq 2\%$	DM 5 luglio 1975
		Rapporto aereo illuminante (Rae)	$\geq 1/8$ dell'area di pavimento	
Benessere acustico	Caratteristiche acustiche passive degli elementi e dei sistemi che costituiscono la facciata	Potere fonoisolante apparente tra ambienti Rw	Ospedali ≥ 55 dB Altri ambienti ≥ 50 dB	DPCM 5 dicembre 1997
		Indice di isolamento acustico standardizzato della facciata (D2m,nT, w)	Residenze, alberghi ≥ 40 dB	
			Uffici, edifici destinati al culto, ad attività ricreative e commerciali ≥ 42 dB	
			Ospedali ≥ 45 dB Scuole ≥ 48 dB	
Sicurezza	Presenza di vetrate di sicurezza		Presenza di vetri interni di sicurezza negli edifici residenziali, scolastici, terziari e ospedalieri	D.lgs. 206/p5 Legge 229/03

Tab. 6.6: Analisi dei requisiti minimi che devono essere garantiti dai serramenti (e dalle facciate continue trasparenti ad essi assimilati) indicati dalla normativa italiana.

EN ISO 717 – 1:1997, ed in relazione a quanto stabilito in merito al rispetto dei requisiti acustici passivi dei comportamenti in opera, come previsto dal Decreto 5 dicembre 1997.

L'isolamento acustico della facciata di un edificio dipende, infatti, dalle prestazioni dei singoli elementi che la costituiscono e soprattutto dal potere fono isolante degli elementi di raccordo e dei materiali con caratteristiche ridotte di fono-assorbimento. Per garantire una buona prestazione generale sarà necessario controllare l'accuratezza della posa in opera di tutti gli elementi che costituiscono il sistema, avendo cura di giustapporre cuscini a pelle resiliente in tutti i punti di contatto tra facciata e partiture verticali e orizzontali. La conformazione geometrica scelta garantisce comunque il controllo del passaggio del rumore tra ambienti adiacenti sia in orizzontale che in verticale.

Tutti i materiali utilizzati garantiscono l'assenza di emissioni di sostanze nocive all'interno dello spazio confinato, sia per le caratteristiche dei materiali che per la natura delle finiture, in particolar modo della verniciatura.

5.6.3 Durabilità

Uno dei requisiti fondamentali rispetto al quale è stato progettato il sistema di facciata dinamica è quello di assicurare, in relazione al piano di manutenzione dell'edificio, prestazioni soddisfacenti. I fattori più importanti legati alla durabilità sono:

- Robustezza e inalterabilità
- Stabilità geometrica dimensionale
- Manutenibilità
- Cicli di manutenzione e pulizia
- Resistenza agli urti
- Affidabilità
- Resistenza al vento ed agli agenti atmosferici
- Smontabilità, dissassemblabilità e sostituibilità

Tutti i sub-sistemi della facciata dovranno essere analizzati per ogni singolo caso, in relazione alle caratteristiche dell'edificio. Tuttavia è possibile fornire alcune indicazioni generali che devono essere prese in considerazione nella maggior parte dei casi.

La stabilità e la resistenza della facciata continua che costituisce la pelle interna, dipenderanno dall'altezza dell'edificio (e quindi dalle sollecitazioni esterne come la forza del vento) e dalle sollecitazioni interne (urti, peso delle attrezzature fissate al muro, ecc.).

Deve essere, inoltre, garantita la manutenibilità di entrambe le superfici di chiusura interna ed esterna; requisito questo che si traduce in disassemblabilità e smontabilità, in modo da permettere la sostituzione di elementi danneggiati o deteriorati. La durabilità degli strati interni è fortemente dipendente dalle caratteristiche climatiche dell'area

Il componente sarà sottoposto alle prove tipiche per le facciate continue come prescritto dalle norme UNI EN di seguito elencate:

UNI EN 12179:2002 Facciate continue – Resistenza al carico del vento – Metodo di prova.

UNI EN 123116:2002 Facciate continue - Resistenza al carico del vento – Requisiti prestazionali

UNI EN 949:2000 Finestre e facciate continue, porte e chiusure oscuranti – Determinazione della resistenza delle porte all'urto con un corpo molle e pesante

UNI EN 14019:2004 Facciate continue – Resistenza all'urto – Requisiti prestazionali

geografica in cui verrà realizzato il componente di facciata, ed in particolare è legata all'azione della pioggia battente e del vento in misura strettamente legata alla resistenza e alla tenuta del sub-sistema pelle esterna – intercapedine d'aria.

Durabilità dinamica. Il sistema di facciata proposto assimilabile ad un sistema stratificato a secco presenta la caratteristica di essere scomponibile, ispezionabile e facilmente manutenibile attraverso riparazione o sostituzione di porzioni intaccate da danneggiamento o divenute obsolete.

I principali fattori che possano compromettere le prestazioni e la durabilità della pelle esterna sono:

- Calore
- Irraggiamento solare
- Acqua piovana
- Umidità

Per quanto riguarda l'effetto del calore e dell'irraggiamento solare, in realtà è sufficiente l'analisi degli effetti del secondo, in quanto l'assorbimento e l'accumulo di calore sono entrambi riconducibili all'azione solare. Il surriscaldamento degli elementi di alluminio che costituiscono la facciata può comportare dilatazioni termiche che incidono sulla stabilità e la tenuta del sistema, per questo motivo i montanti della pelle esterna sono giuntati attraverso manicotti che garantiscono i movimenti verticali e i vari elementi sono connessi tra loro attraverso guarnizioni plastiche che permettono di assorbire le dilatazioni verticali ed orizzontali.

La durabilità dinamica è funzione del progressivo decrescere delle prestazioni, in relazione al deterioramento delle caratteristiche tecniche iniziali dei materiali che fanno parte del sistema (sottostruttura, ancoraggi, rivestimento; ecc). I componenti che più degli altri sono soggetti a rischi di deterioramento e da cui, quindi, dipende l'affidabilità nel tempo dell'intero sistema sono la sottostruttura, i sistemi di ancoraggio metallici e il rivestimento.

Per questo motivo la sottostruttura e gli elementi di ancoraggio saranno realizzati in alluminio, conformi alle normative di qualità e durata vigenti nella Nazione in cui il serramento sarà realizzato. La geometria del sistema di facciata e degli elementi adottati garantisce lo scivolamento dell'acqua ed evita il deposito di sostanze inquinanti.

I profilati di alluminio e i riempimenti in vetro garantiscono una buona resistenza al degrado causato da usura e dagli agenti atmosferici; la facciata sarà comunque accompagnata da un manuale di manutenzione che indicherà la cadenza temporale attraverso cui fare i controlli dei giunti e delle guarnizioni di collegamento che sono gli elementi maggiormente soggetti ad usura. Problemi di infiltrazione e scarsa tenuta si potrebbero riscontrare a causa di un'errata messa in opera e per la presenza di elementi di scarsa connessione tra i profilati che compromette le prestazioni di tenuta termoigrometrica del sistema di involucro verticale.

I pannelli fotovoltaici alloggiati nella pelle esterna garantiscono buone prestazioni meccaniche e la presenza dell'intercapedine ventilata evita che nei mesi estivi posano essere soggetti a rottura a causa dello shock termico della lastra di vetro che contiene le celle policristalline.

5.6.4 Aspetto e fruibilità

Il componente di facciata dinamico è stato concepito come un elemento modulare di forma regolare, caratterizzato da una partizione opaca e da una partizione trasparente che possono essere combinate in relazione alle esigenze del progettista.

La personalizzazione della superficie di chiusura può quindi interessare:

- La disposizione geometrica dei moduli, che non devono essere disposti necessariamente nella conformazione pieno-vuoto, ma possono essere affiancati seguendo altre configurazioni del tipo pieno – pieno - vuoto o vuoto – pieno – vuoto - vuoto, ecc;
- L'elemento di tamponamento della componente opaca che nella soluzione sviluppata come prototipo è costituita da pannelli fotovoltaici, ma potrebbe essere realizzata:
 - Con pannelli di alluminio coibentato; per incrementare la resistenza termica della facciata.
 - Con materiali mediamente traslucidi come TIM, Aerogel, PCM.
 - Con superfici trasparente colorate o serigrafate.
- L'elemento contenente il pannello scorrevole con il vetro monostrato che nel prototipo è totalmente trasparente per non incidere sulla visibilità dall'interno verso l'esterno, ma potrebbe essere realizzato anche con vetro colorato o serigrafato
- L'elemento scorrevole con schermatura in cui l'elemento ombreggiante, realizzato nel prototipo in lamelle di alluminio, può essere sostituito con rete metallica variamente forata, lamelle in vetro trasparente o colorato, alluminio microforato.

La modularità dell'elemento di facciata che si antepone agli elementi strutturali verticali dell'edificio permette di gestire la fruibilità dello spazio interno indipendentemente dalla conformazione geometrica del sistema di chiusura doppia pelle. Il sistema di facciata è corredato di un elemento di raccordo in alluminio coibentato che agganciandosi al montante verticale della pelle interna garantisce la possibilità di suddividere lo spazio con una scansione regolare legata alle esigenze dell'utenza. Quest'elemento presenta valori di trasmittanza termica ($0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$) inferiori a quelli previsti dalla normativa italiana sul contenimento dei consumi energetici per le partizioni verticali tra ambienti interni (il DLgs 311/2006 prevede che questo valore deve essere di $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$) e un'attenuazione acustica di 53 dB in accordo con la Legge 447/95 (e D.P.C.M. 5/12/97), che stabilisce i requisiti acustici passivi degli edifici.

5.6.5 Montaggio e manutenzione

Uno degli obiettivi prioritari nella realizzazione del componente è stato quello di garantire un sistema di facciata che potesse essere assemblato a secco in cantiere garantendo:

- Facilità di montaggio
- Riduzione dei tempi e dei costi di costruzione
- Reversibilità totale del sistema
- Semplicità nella manutenzione

Il componente di facciata sarà montato realizzando in una prima fase la pelle interna che si appoggia staticamente alla struttura principale dell'edificio e successivamente la pelle esterna. In questo modo, contemporaneamente alla realizzazione della facciata, si potrà procedere alla realizzazione delle finiture degli ambienti interni (pavimenti, controsoffitti, tramezzi divisorii da un ambiente all'altro, ecc).

La pelle interna, è costituita da elementi prefabbricati che saranno trasportati finiti in cantiere e fissati all'interno delle partizioni interpiano.

La pelle esterna, staccata di 34,00 cm dal filo del solaio, costituita da traversi e montanti, sarà montata in opera attraverso l'utilizzo di un muletto con ragno che permetterà di portare gli elementi al piano dall'esterno senza bisogno di installare un'impalcatura.

Prima di iniziare le operazioni di montaggio, il fornitore della facciata eseguirà il completo tracciamento della stessa, a partire dai piani e dagli assi dell'edificio battuti a cura del Committente.

I profilati e gli elementi che costruiscono il sistema di facciata arriveranno in cantiere imballati e dovranno essere opportunamente protetti sia durante il periodo di immagazzinamento (in officina e in cantiere), sia dopo la posa in opera, fino alla consegna dei locali.

Gli elementi che costituiscono il componente saranno assemblati con la seguente cronologia:

- Sistemazione degli ancoraggi in acciaio della pelle interna sulla struttura portante;
- Installazione dei montanti della pelle interna;
- Installazione dei trasversi della pelle interna;
- Alloggiamento del pannello in alluminio coibentato della pelle interna;
- Alloggiamento dell'anta bipartita trasparente con partizione fissa e partizione apribile a battente ed a vasistas della pelle interna;
- Posizionamento, nella parte trasparente, delle scossaline metalliche inferiori e superiori per il deflusso dell'acqua piovana;
- Alloggiamento a pavimento e soffitto delle guide per i carrelli scorrevoli;
- Montaggio sulle piastre in acciaio dei paracolpi dei carrelli scorrevoli;
- Posizionamento dei pannelli scorrevoli;
- Installazione della zanzariera in rete metallica;
- Alloggiamento delle piastre in acciaio per irrigidimento dei montanti della pelle esterna;

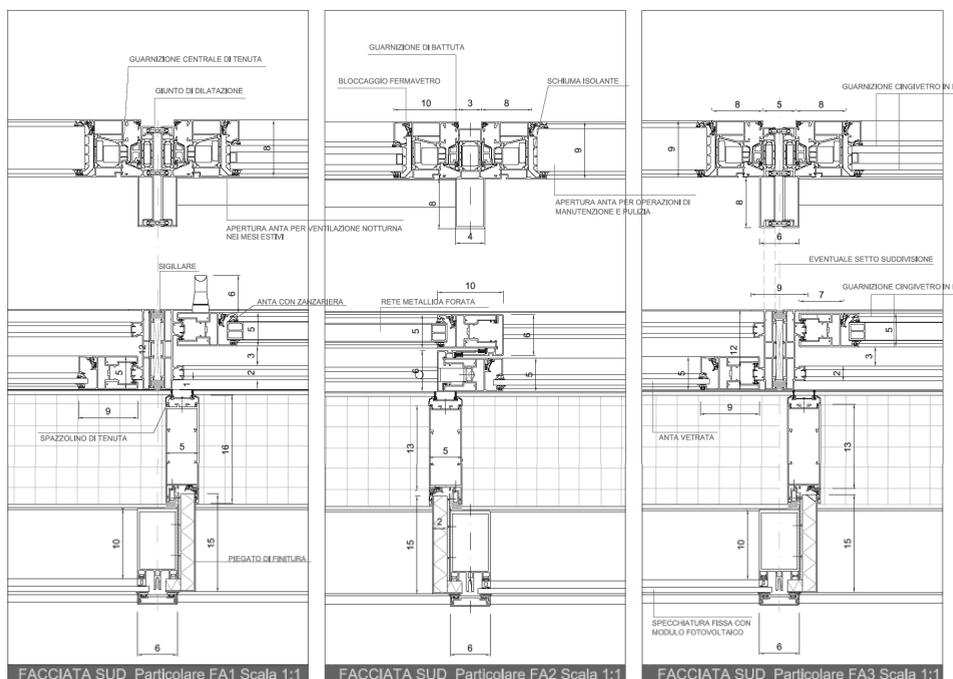


Fig. 5.23: Dettagli esecutivi in pianta degli attacchi tra i pannelli e gli elementi verticali della prima bozza di progetto

- Installazione montanti della pelle esterna;
- Installazione traversi della pelle esterna;
- Posizionamento del pannello opaco della pelle esterna
- Realizzazione dell'acrotorio

La pelle esterna, staccata di 34,00 cm da solaio, sarà conclusa nella sommità con carter di chiusura che impedirà l'ingresso di acqua o insetti nell'intercapedine. Il risvolto dell'impermeabilizzazione, che non può essere collocato direttamente e a contatto con gli elementi verticali della facciata, sarà alloggiato sul supporto del coronamento e rivestito con una copertina. Quest'elemento :

- Non deve essere forato da fissaggi, per evitare infiltrazioni d'acqua;
- Deve essere inclinato, per evitare ristagni d'acqua;
- Deve potersi dilatare liberamente mediante l'uso di piastre di giunzione;
- È completato da una membrana flessibile che garantisce la tenuta all'aria;
- Deve essere amovibile.

La modularità del componente di facciata non è influenzata dalle partizioni interne dell'edificio, poiché il componente verrà alloggiato anteriormente alla struttura portante verticale a cui è connesso con elementi speciali contenenti pannelli isolanti in polistirene espanso e fibre di legno.

La semplicità del montaggio riduce al massimo la possibilità di errore da parte dei montatori. Il componente di facciata è realizzato dalla stessa impresa appaltante che si fa carico della realizzazione dei profilati e dei pannelli di tamponamento e segue l'installazione in fase di cantiere, dall'arrivo del materiale alla messa in opera.

Il componente è realizzato con sub-sistemi che ne garantiscono la resistenza meccanica nelle condizioni di esercizio, in particolare per quanto riguarda:

- Resistenza alle manovre di apertura e chiusura;
- Durabilità meccanica;
- Resistenza all'urto;



Fig. 5.24: Laboratorio di prova della sede Schueco di Padova. Macchina per testare la tenuta all'acqua delle facciate continue trasparenti.

- Resistenza a variazioni termiche che ne potrebbero causare la deformazione.

La manutenibilità è uno dei requisiti prestazionali che ha accompagnato la progettazione del componente di facciata dinamico e ne ha determinato le seguenti caratteristiche:

- Rimuovibilità e sostituibilità di tutti gli elementi della pelle esterna e della pelle interna;
- Rimuovibilità e sostituibilità degli strati di isolamento termico contenuti nei componenti opachi;
- Rimuovibilità e sostituibilità delle reti e dei terminali di impianti eventualmente alloggiati all'interno della facciata;

Tutti gli elementi che costituiscono il sistema possono essere disassemblati e attrezzati, trasformandoli in relazione alla necessità di incrementarne le prestazioni nel tempo o di sostituirli in caso di danneggiamento o rottura.

La disconnessione degli strati e la ridotta quantità di materiali adottati (alluminio, vetro, polistirene espanso) garantiscono di poter intervenire con operazioni di assemblaggio e smontaggio rapide e di facile esecuzione.

L'ispezione e la manutenzione dei pannelli scorrevoli, alloggiati nell'intercapedine, e del pannello opaco della pelle esterna, contenente il fotovoltaico, è assicurata dalla possibilità di aprire l'anta coibentata della pelle interna, accedendo così nella buffer zone che presenta una profondità di 60,00 cm proprio per consentire l'accesso di un operaio.

La pulizia del componente può essere effettuata dall'interno e dall'esterno; in quest'ultimo caso deve essere prevista la possibilità di installare una gondola montata su un binario scorrevole posizionato sulla copertura piana dell'edificio.

Conclusioni

La volontà di proporre un sistema di facciata che, attraverso la variabilità degli elementi che lo compongono, permetta di raggiungere buone prestazioni in termini di contenimento dei consumi energetici in edifici destinati al terziario in area mediterranea, ci ha condotto a sviluppare il concept di un sistema di facciata doppia pelle caratterizzato dalla presenza di elementi scorrevoli che permettono di regolare i flussi di energia termica passando garantendo buone prestazioni, grazie al sistema di schermatura, anche nei mesi estivi.

Rimandando al capitolo successivo le valutazioni dettagliate dei risultati raggiunti in relazione alle prestazioni termoigrometriche del sistema di facciata, in queste pagine abbiamo analizzato e descritto le sue caratteristiche tecnologiche ed il soddisfacimento di alcuni requisiti prestazionali, quali: sicurezza strutturale, benessere acustico, durabilità e facilità di messa in opera, che sono stati necessari per sviluppare il prototipo del componente e proporre poi la sua applicazione in un caso concreto.

L'approfondimento descrittivo delle peculiarità tecnologiche adottate, relativo alla definizione di ogni elemento che costituisce il sistema, è stato condotto con la volontà di poter fornire un manuale d'uso che permetta di scegliere varie opzioni realizzative in relazione alle prestazioni che si vogliono raggiungere in contesti geografici e climatici diversi. Il componente di facciata proposto costituito da elementi lineari di sostegno ad elementi scatolari opachi e trasparenti, garantisce l'intercambiabilità di alcune parti (componente opaca e trasparente, pannelli scorrevoli) e permette di raggiungere buone prestazioni in termini di:

- Trasmittanza termica, la sola parete interna presenta un valore di trasmittanza pari

a 1,2 W/m²K nella componente trasparente e di 0,30 W/mqK nella componente opaca;

- Isolamento acustico, l'intero sistema garantisce un indice di isolamento acustico standardizzato della facciata di 50 dB circa grazie alle caratteristiche dei suoi componenti;
- Resistenza meccanica, con la capacità di resistere in modo soddisfacente a deformazioni indotte da carichi accidentali e dinamici ed una buona resistenza al fuoco;
- Permeabilità all'aria ed al vapore, grazie alle soluzioni di raccordo adottate che evitano la formazione di condense e garantiscono un'ottima tenuta all'aria;
- Manutenibilità, incrementata dalla modularità dei sub-sistemi sui quali è possibile intervenire isolatamente senza compromettere la prestazione generale del componente.

Note

¹ Il gruppo di ricerca ABITA di Firenze promuove da circa un ventennio attività d'indagine e sperimentazione scientifica nel settore dei componenti edilizi, promuovendo l'interazione tra mondo scientifico e industriale al fine di sviluppare sistemi architettonici innovativi ed energeticamente efficienti. Tra le ricerche condotte in questo settore nell'ultimo decennio sono di particolare interesse quelle sviluppate in relazione alla progettazione ed all'analisi prestazionale dei componenti di facciata che hanno portato in taluni casi allo sviluppo di prototipi e/o di analisi delle prestazioni energetiche di componenti progettati dal settore industriale. Tra le aziende coinvolte nell'attività di ricerca e sperimentazione si ricordano tra le altre la VELUX, la METRA e la PERMASTEELISA.

² In questa fase la soluzione architettonica è stata verificata con il supporto del prof. Marco Sala e dell'arch. Alessio Rullani

³ Con la consulenza dell'ing. Paolo Nobile della sede Schueco di Padova

⁴ Nella fase di simulazione energetica abbiamo potuto avvalerci della collaborazione del prof. Maurizio De Lucia e dell'ing. Davide Fissi, del Dipartimento di Energetica Luigi Stecco della Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Firenze. Nella fase preliminare di valutazione della metodologia da adottare per le simulazioni del componente di facciata abbiamo contattato il prof. Ennio Carnevale e la prof.ssa Carla Balocco (del Dipartimento di Energetica Luigi Stecco della Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Firenze) per stimare la possibilità di condurre un'analisi fluidodinamica relativa al movimento ed alla temperatura dell'aria nell'intercapedine del componente.

⁵ Il prototipo e la verifica funzionale del componente dinamico di facciata sono state sviluppate in collaborazione con l'azienda Davini s.r.l. di Lucca

⁶ Per la definizione delle caratteristiche dei serramenti a battente abbiamo fatto riferimento alle indicazioni dateci dall'ing. P. Nobile della Schueco e dell'ing. L. Forgiione della Davini srl.

⁷I profili devono essere verniciati con polveri termoindurenti a base di resine poliesteri TGIC presso stabilimenti industriali dotati di: tunnel di pre-trattamento a 11 stadi; linea di pretrattamento con il controllo chimico continuo dei bagni in modo da mantenere le concentrazioni entro i valori stabiliti; sistema di regolazione e monitoraggio tale da mantenere costante la temperatura nelle varie zone dei forni, temperatura che deve essere rilevata, fino a 6 punti diversi, su tutta la lunghezza del profilo. Lo spessore minimo del rivestimento deve essere di 60 micron salvo le parti che, per motivi funzionali, impongono un limite massimo inferiore.

⁸I profili dovranno essere ossidati mediante processo elettrolitico in conformità alle norme UNI 3952 e 4522 utilizzando il ciclo all'acido solforico con fissaggio a caldo in acqua deionizzata. L'eventuale colorazione è ottenuta con un processo di elettrocolorazione. L'ossidazione anodica dovrà avere le seguenti caratteristiche: finitura superficiale: ARS - architettonico spazzolato. spessore dello strato di ossido: 20 micron. La colorazione può essere scelta dal committente su campionatura fornita dal fornitore dei manufatti.

⁹La possibilità di scegliere diversi spessori permette al progettista di incrementare l'isolamento termico del componente di facciata in relazione alle prestazioni da raggiungere nelle varie località geografiche in qui si trova ad operare.

¹⁰I profili devono essere verniciati con polveri termoindurenti a base di resine poliesteri TGIC presso stabilimenti industriali dotati di: tunnel di pre-trattamento a 11 stadi; linea di pre-trattamento con il controllo chimico continuo dei bagni in modo da mantenere le concentrazioni entro i valori stabiliti; sistema di regolazione e monitoraggio tale da mantenere costante la temperatura nelle varie zone dei forni, temperatura che deve essere rilevata, fino a 6 punti diversi, su tutta la lunghezza del profilo. Lo spessore minimo del rivestimento deve essere di 60 micron salvo le parti che, per motivi funzionali, impongono un limite massimo inferiore.

¹¹I profili dovranno essere ossidati mediante processo elettrolitico in conformità alle norme UNI 3952 e 4522 utilizzando il ciclo all'acido solforico con fissaggio a caldo in acqua deionizzata. L'eventuale colorazione è ottenuta con un processo di elettrocolorazione. L'ossidazione anodica dovrà avere le seguenti caratteristiche: finitura superficiale: ARS - architettonico spazzolato; spessore dello strato di ossido: 20 micron. La colorazione può essere scelta dal committente su campionatura fornita dal fornitore dei manufatti.

¹²Per la definizione delle caratteristiche dei serramenti scorrevoli abbiamo fatto riferimento alle indicazioni dateci dall'ing. Nobile della Schueco e dell'ing. L. Forgione della Davini srl.

¹³La classificazione dei requisiti analizzati è tratta da NASTRI M., *La costruzione dell'architettura. Strumenti e procedure operative per l'elaborazione tecnica del progetto*, Franco Angeli, Milano, 2009

¹⁴ Il requisito di benessere associato alle pareti perimetrali verticali si esplicita attraverso il rispetto dei seguenti parametri:

- Permeabilità all'aria, prevedendo la corretta esecuzione degli strati di tenuta, di

finitura e di barriera al vapore e progettando aperture di dimensioni adeguate per garantire gli adeguati ricambi d'aria orari.

- Tenuta all'acqua, progettando in modo adeguato i punti di giunzione per evitare che ci siano depositi di acqua all'interno delle stratigrafie di involucro.
- Isolamento termico, attraverso l'eliminazione di eventuali ponti termici e il controllo della temperatura delle superfici interne che deve essere conservata prossima a quella dell'aria ambiente.
- Isolamento igrometrico, utilizzando all'interno dei pacchetti di involucro materiali e soluzioni che permettano di limitare e controllare il formarsi di condensa superficiale, dovute alla produzione di vapore acqueo negli spazi interni e in grado di provocare il degrado fisico e funzionale degli strati con le infiltrazioni, le macchie di umidità e la perdita della resistenza termica dell'isolante.
- Inerzia termica, scegliendo soluzioni tecnologiche e stratigrafie che evitino l'aumento di temperatura dello spazio confinato nei mesi estivi.
- Isolamento acustico nei confronti delle sollecitazioni sonore trasmesse per via area o solida, per cui sono preferibili soluzioni stratificate con accoppiamento di isolanti caratterizzati da diversa densità e si deve prestare molta attenzione al controllo dei ponti acustici nei giunti.
- Non emissione di sostanze nocive, evitando di utilizzare materiali, come le fibre di amianto o isolanti contenenti formaldeide che risultino nocive per gli utenti.

¹⁵Valore tratto da: LONCOUR X., WOUTERS P., FLAMANT G., BLASCO M.S., *Impact of double ventilated facades in buildings*, BBRI, 2004

Capitolo 6

Analisi delle prestazioni energetiche

6.1 Definizione del metodo di analisi sperimentale

La necessità di analizzare il comportamento energetico del componente intelligente 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 e illuminotecnica che ci permettessero di valutarne le prestazioni termo-igrometriche e di trasmissione luminosa della radiazione solare in tre zone climatiche d'Italia:

- Milano
- Firenze
- Palermo

Ci siamo limitati a valutare le prestazioni del componente rispetto ad una condizione geografica caratterizzata da clima temperato di tipo mediterraneo così da analizzare il suo contributo al fabbisogno energetico dell'edificio anche e soprattutto durante i mesi estivi caratterizzati da temperature più elevate.

La Smart Facade sarà monitorata in opera nei prossimi mesi:

- nell'integrazione che attualmente è in corso nell'edificio destinato ad ICT della Camera di Commercio di Lucca;
- attraverso il monitoraggio del prototipo presso la test cell che il Dipartimento di Tecnologia sta realizzando nell'ambito del progetto di ricerca ABITARE MEDITERRANEO.

Le simulazioni sono state condotte costruendo una test room virtuale di dimensioni 5,00 x 5,00 x 3,00 m con una parete destinata ad ospitare i seguenti componenti di facciata opachi e trasparenti:

1. Finestra doppio vetro con telaio basso emissivo di dimensioni 3,00 x 1,35 m;¹
2. Finestra Finestra doppio vetro con telaio basso emissivo di dimensioni 3,00 x 2,50 m;
3. Facciata continua trasparente monostrato con tamponamento in vetro-bassoemissivo e telaio in alluminio a taglio termico di dimensioni 5,00 x 3,00 m;
4. Facciata continua trasparente monostrato con tamponamento in vetro-bassoemissivo e telaio in alluminio a taglio termico di dimensioni 5,00 x 3,00 m. e sistema di schermatura fisso esterno costituito da lamelle in alluminio;
5. Facciata continua trasparente monostrato con tamponamento in vetro-bassoemissivo e telaio in alluminio a taglio termico di dimensioni 5,00 x 3,00 m. e sistema di schermatura mobile esterno costituito da lamelle in alluminio, considerato nel contributo della sola presenza estiva;

Città	Latitudine	Longitudine	Altitudine	Zona climatica
Milano	45°27'E	9°11'N	122 m.s.l.m	E
Firenze	43°46'E	11°15'N	50 m.s.l.m	D
Palermo	38°3'E	13°7'N	175 m.s.l.m	B

Tab. 6.1 – Dati climatici tratti dalla Norma UNI 10349:1994/EC – Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici

6. Doppia pelle del tipo cell rooms con ventilazione naturale costituita da facciata interna continua trasparente con tamponamento in vetro basso-emissivo e telaio in alluminio a taglio termico di dimensioni 5,00 x 3,00 m e facciata esterna in vetro e struttura in alluminio 5,00 x 3,00 m.;
7. Doppia pelle del tipo cell rooms con intercapedine ventilata naturalmente costituita da facciata interna continua trasparente con tamponamento in vetro basso-emissivo e telaio in alluminio a taglio termico di dimensioni 5,00 x 3,00 m, facciata esterna in vetro e struttura in alluminio 5,00 x 3,00 m, e sistema di schermatura fisso collocato nell'intercapedine costituito da lamelle in alluminio;
8. Doppia pelle del tipo cell rooms con intercapedine ventilata naturalmente costituita da facciata interna continua trasparente con tamponamento in vetro basso-emissivo e telaio in alluminio a taglio termico di dimensioni 5,00 x 3,00 m, facciata esterna in vetro e struttura in alluminio 5,00 x 3,00 m, e sistema di schermatura mobile collocato nell'intercapedine costituito da lamelle in alluminio, considerato nel contributo della sola presenza estiva;
9. Facciata continua opaca con tamponamento in alluminio coibentato con 8,00 cm di lana di roccia e finestra con doppio vetro basso emissivo e telaio in alluminio a taglio termico di dimensioni 3,00 x 1,35 m;²
10. Smart facade nella configurazione invernale;
11. Smart facade nella configurazione estiva senza sistema di schermatura;
12. Smart facade nella configurazione estiva con sistema di schermatura.

Nella fase preliminare di progettazione abbiamo dovuto procedere ad una analisi delle prestazioni del componente di facciata attraverso la costruzione di un modello virtuale e alla valutazione del suo comportamento in termini di:

- Trasmittanza termica
- Verifica termo-igrometrica

Queste valutazioni sono state fatte con il software Thermus con la consapevolezza di avere un risultato che andrebbe affinato con simulazioni condotte con un uno strumento informatico che permetta di analizzare il comportamento della facciata in regime dinamico analizzando in modo più dettagliato l'andamento delle temperature all'interno dell'intercapedine e di conseguenza i valori di trasmittanza reale del componente.³

Abbiamo invece analizzato in regime termico dinamico il contributo del componente ai fabbisogni energetici dell'edificio in termini di:

- Fabbisogno di energia termica per il riscaldamento
- Fabbisogno di energia termica per il raffrescamento
- Consumo di energia primaria per riscaldamento e raffrescamento (ipotizzando di avere un impianto ad aria alimentato da pompa di calore elettrica)
- Costo per il condizionamento (riscaldamento - raffrescamento)
- Quantità di CO² prodotta dagli impianti di climatizzazione in fase di gestione.

Abbiamo, infine, valutato:

- L'illuminamento sul piano di lavoro dell'ambiente confinato

Le simulazioni sono state condotte con:

- Il software Trnsys, in relazione alle analisi del fabbisogno energetico per riscaldamento e raffrescamento
- Il software Relux in relazione all'analisi dell'illuminamento sul piano di lavoro.

6.2 Definizione del modello di test room virtuale. Caratteristiche termigrometriche dei sistemi di tamponamento opaco e definizioni delle condizioni di esercizio

La test room virtuale, di dimensioni 5,00 x 5,00 x 3,00 m, è costituita da pareti isolate in modo da garantire le prestazioni di trasmittanza ed inerzia termica previste per chiusure opache verticali ed orizzontali dal Dgs. 192/2005 e successive modifiche.

Le analisi del comportamento dei componenti di facciata scelti sono state fatte, come precedentemente ricordato, ipotizzando di collocare la test room in tre località italiane:

- Milano
- Firenze
- Palermo

e rispetto a quattro orientamenti cardinali:

- Est,
- Sud,
- Ovest
- Nord

Il ricambio d'aria previsto nel calcolo, in conformità a quanto stabilito dalla Norma UNI 10339:1995 ⁴ per gli spazi per uffici, è pari a 0,6 h⁻¹ ed è ottenuto mediante ventilazione naturale, non sono stati previsti sistemi di ventilazione artificiale.

La temperatura interna della test room è di:

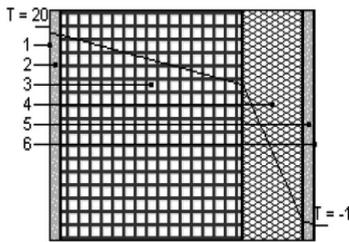
- 21° nei mesi invernali, durante i quali si è ipotizzato che l'ambiente è riscaldato con un impianto ad aria alimentato da una pompa di calore elettrica che entra in funzione solo nei casi in cui la temperatura dell'ambiente supera quella individuata come temperatura di comfort;
- 26° nei mesi estivi, rispetto ai quali è previsto che l'ambiente sia dotato di un sistema di raffrescamento elettrico che entra in funzione solo nei casi in cui la temperatura dell'ambiente supera quella individuata come temperatura di comfort.

Città	Zona climatica	Gradi giorno	Periodo di accensione dell'impianto di riscaldamento	Orario max. consentito
Milano	E	2404	15 ottobre – 15 aprile	14/ore al giorno
Firenze	D	1821	1 novembre – 15 aprile	12/ore al giorno
Palermo	B	796	1 dicembre – 31 marzo	8/ore al giorno

Tab. 6.2 – Dati tratti dal D.P.R. 412/1993 – regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione e la manutenzione degli impianti termici degli edifici, al fine del contenimento dei consumi di energia.

6.2.1 Analisi termo igrometrica delle chiusure opache verticali della test room virtuale

MURO TEST ROOM							
Descrizione strato (dall'interno all'esterno)	S (mm)	Lambda (W/mqK)	C (W/mqK)	M.S. (kg/mq)	P<50*10 ¹² (kg/msPa)	C.S. (J/kgK)	R (mqK/W)
Adduttanza interna	0		7,7	28,00		0	0,130
Intonaco di calce e gesso	20	0,7	35,00	206,00	18,00	1000	0,029
Blocco forato di laterizio sp. 30,00 cm	300		1,163	36,00	20,57	840	0,86
Isolante in polistirene espanso estruso mv 30	100	0,041	0,40	3,00	2,08	1200	2457
Malta di calce o di calce e cemento	20	0,9	45,00		8,50	1000	0,022
Adduttanza Esterna	0		25,00			0	0,04
Spessore	440 mm						
Resistenza termica	3,53 m ² K/W						
Trasmittanza	0,28 W/m ² K						
Capacità termica aerea	47,64 kJ/m ² K						
Trasmittanza termica periodica	0,04 W/m ² K						
Fattore di attenuazione	0,16						
Massa superficiale	209 kg/m ²						
Sfasamento	11,45.						



Stratigrafia struttura

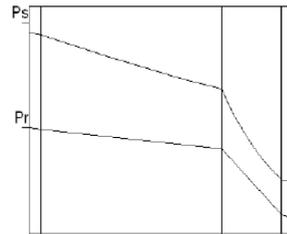
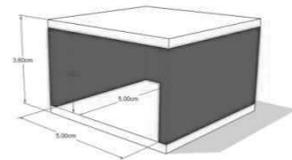


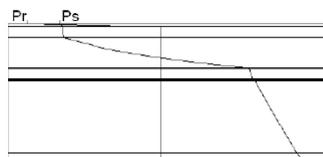
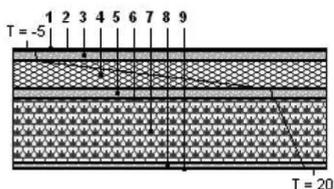
Diagramma delle pressioni



6.2.2 Analisi termo igrometrica del solaio di copertura della test room virtuale

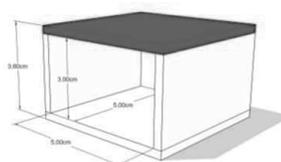
SOLAIO DI COPERTURA TEST ROOM							
Descrizione strato (dall'interno all'esterno)	S (mm)	Lambda (W/mqK)	C (W/mqK)	M.S. (kg/mq)	P<50*10 ¹² (kg/msPa)	C.S. (J/kgK)	R (mqK/W)
Adduttanza superiore	0		25.000			0	0.040
Bitume	10	0,170	17,00	12,00	0,00	1000	0,059
Malta di cemento	40	1,4	35,00	80,00	8,50	1000	0,029
Polistirene espanso in lastre stampate mv 30	110	0,039	0,35	3,30	3,15	1200	2,865
Malta di cemento	40	1.400	35.000	80.00	8.500	1000	0.029
Fogli di materiale sintetico	5	0.230	46.000	5.50	0.010	900	0.022
Blocco da solaio di laterizio spessore 250	250		2.857	237.00	19.000	840	0.350
Intonaco di calce e gesso	20	0,70	36,00	28,00	18,00	1000	0,029
Adduttanza interiore	0		10,00			0	0,10

Spessore	485 mm
Resistenza termica	3,51 m ² K/W
Trasmittanza	0,28 W/m ² K
Capacità termica aereica	74,94 kj/m ² K
Trasmittanza termica periodica	0,06 W/m ² K
Fattore di attenuazione	0,22
Massa superficiale	419 kg/m ²
Sfasamento	9,89.



Stratigrafia struttura

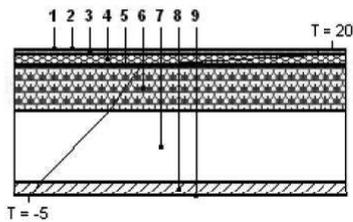
Diagramma delle pressioni



6.2.3 Analisi termo igrometrica del solaio controterra della test room virtuale

SOLAIO CONTROTERRA TEST ROOM							
Descrizione strato (dall'interno all'esterno)	S (mm)	Lambda (W/mqK)	C (W/mqK)	M.S. (kg/mq)	P<50*10 ¹² (kg/msPa)	C.S. (J/kgK)	R (mqK/W)
Adduttanza superiore	0		5.900			0	0.169
Piastrelle.	10	1.000	100.000	23.00	0.940	840	0.C10
Malta di cemento	30	1.400	46.667	60.00	8.500	1000	0.C21
Polistirene espanso in lastre stampate - mv.30	80	0.039	0.481	2.40	3.150	1200	2.C78
Malta di cemento.	10	1.400	140.000	20.00	8.500	1000	0.C07
Blocco da solaio di laterizio (495*240*250) spessore 300	300		2.703	333.00	18.000	840	0.370
Strato d' aria orizzontale (flusso asc.) -spessore oltre 10 cm.	500	0.620	1.240	0.65	193.000	1008	0.806
CLS di aggregati naturali - a struttura chiusa - pareti protette - mv.2000.	100	1.162	11.615	200.00	2.600	1000	0.C86
Adduttanza Inferiore	0		25.000			0	0.C40

Spessore	1030 mm
Resistenza termica	3,589 m ² K/W
Trasmittanza	0,28 W/m ² K
Capacità termica aereaica SUP	53,63 kj/m ² K
Capacità termica aereaica INF	131,298 kj/m ² K
Trasmittanza termica periodica	0,27 W/m ² K
Fattore di attenuazione	0,17
Massa superficiale	639 kg/m ²
Sfasamento	11,14 H



Stratigrafia struttura

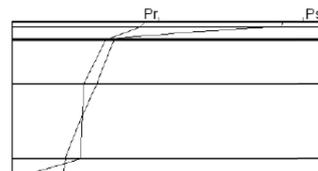
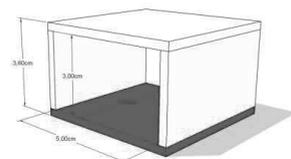


Diagramma delle pressioni



6.3 Procedure e strumenti adottati

	FASE	PROCEDURA	STRUMENTI
1	ANALISI CLIMATICA	Reperimento e analisi dei dati climatici delle località scelte	<ul style="list-style-type: none"> • Dati climatici tratti dalla norma UNI 10349:1994/EC • Dati climatici tratti da Casaccia ENEA • Dati climatici Energy Plus elaborati con Ecotect
3	SIMULAZIONE DELLE PRESTAZIONI TERMOIGROMETRICHE	Analisi delle prestazioni dei componenti di involucro opaco e trasparente per determinare i valori di trasmittanza termica	<ul style="list-style-type: none"> • Costruzione dei modelli di analisi • Thermus, software per valutazione in regime statico delle prestazioni in termini di isolamento e inerzia termica dei pacchetti d'involucro opaco e trasparente
4	SIMULAZIONI TERMODINAMICHE	Simulazioni termodinamiche relative ai 12 casi di involucro selezionate nelle tre località geografiche scelte e con i tre orientamenti proposti.	<ul style="list-style-type: none"> • Costruzione di un modello di test room virtuale • Trnsys, software di simulazione termodinamica
5	ANALISI DEL FABBISOGNO DI ENERGIA per IL RAFFRESCAMENTO ED IL RISCALDAMENTO	Analisi dei risultati e sintesi per ogni caso del fabbisogno di energia per il riscaldamento ed il raffrescamento in kWh	
6	MONETIZZAZIONE DEL FABBISOGNO ENERGETICO E CO2	Analisi del fabbisogno di energia primaria necessaria per riscaldare e raffrescare l'ambiente. Monetizzazione dei consumi di energia primaria. Calcolo della CO2 prodotta dall'utilizzo di energia elettrica per alimentare la pompa di calore utilizzata per il condizionamento.	<ul style="list-style-type: none"> • Metodo di conversione
7	VALUTAZIONE DEI RISULTATI E INDIVIDUAZIONE DELLE CRITICITA'	Valutazione dei risultati numerici per ogni caso analizzato. Comparazione delle prestazioni termiche dei sistemi di involucro oggetto di analisi con quelle del componente di facciata intelligente.	
8	ANALISI DEL COMFORT VISIVO, con valutazione dell'illuminamento sul piano di lavoro	Simulazioni dell'illuminamento ottenuto sul piano di lavoro nei 12 casi analizzati (ridotti a 10 poiché abbiamo valutato il caso di schermatura fissa esterna).	<ul style="list-style-type: none"> • Costruzione di un modello di test room virtuale • Relux, software di simulazione illuminotecnica
9	VALUTAZIONE DEI RISULTATI E INDIVIDUAZIONE DELLE CRITICITA'	Valutazione dei risultati numerici per ogni caso analizzato e comparazione con le prestazioni raggiunte dal componente di facciata intelligente	

6.4 Analisi climatica

Come precedentemente ricordato le simulazioni sono state condotte ipotizzando di collare la test room virtuale in tre località geografiche italiane caratterizzate da diverse condizioni climatiche:

- Milano
- Firenze
- Palermo

Per ciascuna di queste località abbiamo condotto un'analisi dei dati climatici desunti:

- dalla norma UNI 10349:1994, che contiene informazioni tabulate in merito a : coordinate geografiche del capoluogo di provincia; temperature giornaliere medie mensili, irradiazione solare media mensile diretta sul piano orizzontale; irradiazione solare giornaliera media mensile diffusa sul piano orizzontale; irradiazione globale su superfici verticali esposte a Sud, Est, Ovest e Nord; velocità giornaliera del vento e direzione prevalente.
- dalle banche dati ENEA, che forniscono i dati climatici tabulati in schede divise in tre pagine di informazioni relative a: temperature minima, massima e media dell'aria; radiazione solare stimata; eliofanìa; direzione e velocità del vento; numero di giorni ventosi; precipitazioni; numero di giorni piovosi; copertura nuvolosa; numero di giorni sereni; umidità relativa minima e massima.
- dal sito di Energy Plus che contiene una raccolta di weather data su scala mondiale in estensione .epw che possono essere letti da numerosi programmi di simulazione termodinamica come Energy Plus, DOE o Trnys.

I dati .epw sono stati elaborati con la plugin Weather Management del software Ecotect con la quale abbiamo graficizzato le indicazioni principali in merito a: temperature massime, medie e minime; percentuale di umidità relativa; presenza, velocità e temperatura dei venti prevalenti; radiazione solare diretta e diffusa; etc.

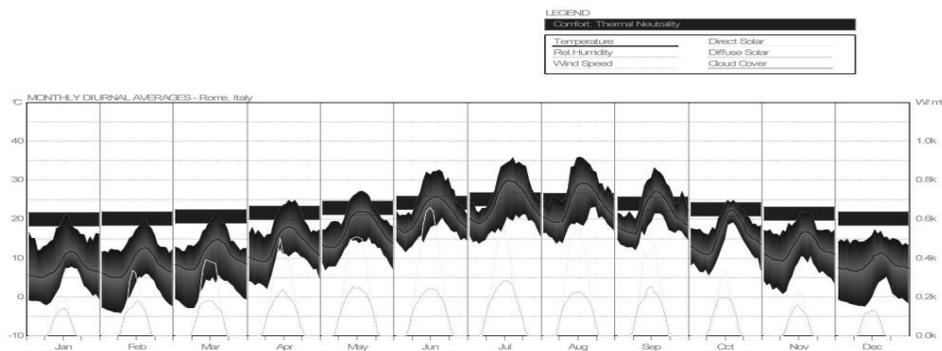
I dati climatici ci hanno permesso di definire le caratteristiche dell'ambiente esterno rispetto al quale sono state condotte le simulazioni; tutte le analisi sono state sviluppate ipotizzando che la test room non sia mai soggetta ad ombreggiamento durante tutto l'arco dell'anno.

CARATTERISTICHE DEI MATERIALI			
Materiale	Conduttività	Densità	Calore specifico
	W/m ² K	Kg/m ³	Kcal/kgK
Alluminio	220,00	2700,00	0,23
Vetro esterno con ϵ_n di 0,89	1,00	2500,00	0,20
Vetro interno con ϵ_n di 0,1	1,00	2500,00	0,20
Lana di roccia	0,035	120,00	0,2006
Gomma per pavimento	0,35	950,00	0,50
Intonaco	0,90	1800,00	0,2000

6.4.1 Dati climatici di MILANO

Zona climatica	E
Gradi giorno	2404
Altitudine	122 s.l.m
Coordinate	45°28', 9° 11'
Temperatura minima inverno (estrema)	- 5,6°
Temperatura max. estiva (estrema)	34°
Velocità del vento (media annua)	2,5 m/s
Radiazione giornaliera (media annua)	5003 Mj/m2

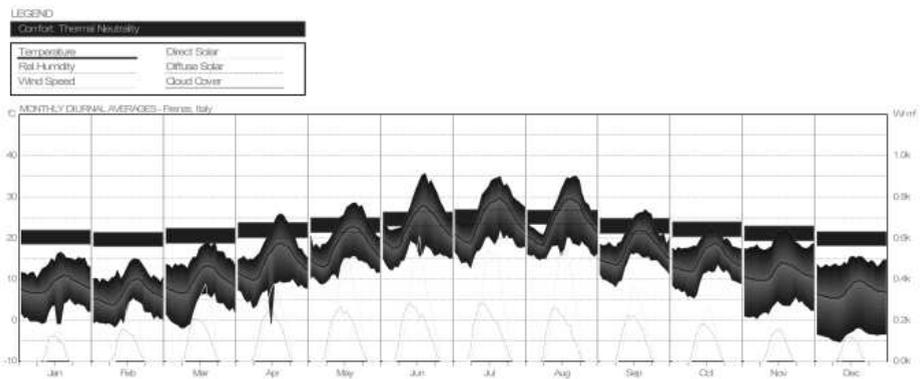
SOLE E NUVOLE					VENTO					
MESE	ELIOF	RADIAZ	NUVOL	GSER	MESE	DIREZ PREV	GVEN	V MED	V MAX	
1	2,9	5,5	7	10	1	NO	O	1	2,3	3,1
2	3,7	8,6	6	11	2	SE	E	2	2,4	3,2
3	4,6	13,6	6	13	3	SE	E	3	2,6	3,5
4	5,6	17,3	5	13	4	SE	E	4	2,8	3,8
5	6,9	20,4	5	15	5	SO	SE	3	2,7	3,6
6	7,1	22,6	5	16	6	SO	SE	2	2,6	3,3
7	8,1	22,7	4	20	7	SO	SE	2	2,5	3,2
8	7,3	19,3	4	17	8	SE	SO	1	2,4	3,0
9	5,2	14,3	5	16	9	E	SE	1	2,3	3,0
10	4,1	9,6	5	14	10	E	SE	1	2,3	3,0
11	2,4	5,9	7	9	11	SE	NO	1	2,3	3,1
12	2,3	4,3	6	13	12	NO	E	1	2,2	2,9
Anno	1836	5003	5,4	167	Anno			22	2,5	3,8



6.4.2 Dati climatici di FIRENZE

Zona climatica	D
Gradi giorno	1821
Altitudine	50 s.l.m
Coordinate	43°46', 11° 15'
Temperatura minima inverno (estrema)	- 4,2°
Temperatura max. estiva (estrema)	36,1°
Velocità del vento (media annua)	3,4 m/s
Radiazione giornaliera (media annua)	5159 Mj/m2

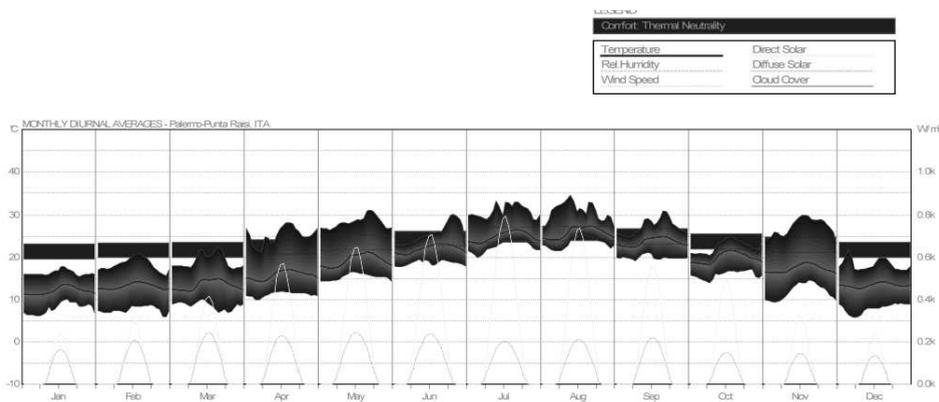
SOLE E NUVOLE					VENTO					
MESE	ELIOF	RADIAZ	NUVOL	GSER	MESE	DIREZ PREV	GVEN	V MED	V MAX	
1		6,1	6	11	1	NE	N	6	3,7	5,6
2		8,9	7	9	2	NE	N	5	3,5	5,2
3		13,4	6	12	3	NE	N	7	3,6	5,4
4		17,0	5	13	4	NE	SO	7	3,5	5,0
5		21,1	5	14	5	O	SO	4	3,4	5,1
6		23,0	5	15	6	SO	O	3	3,3	4,8
7		23,2	3	22	7	O	SO	4	3,4	5,0
8		19,7	4	20	8	O	SO	4	3,3	4,9
9		15,0	4	17	9	NE	O	4	3,0	4,4
10		10,3	5	16	10	NE	N	7	3,4	5,2
11		6,6	7	9	11	NE	E	5	3,3	4,8
12		4,9	7	10	12	N	NE	5	3,5	5,4
Anno		5159	5,3	168	Anno			61	3,4	5,6



6.4.3 Dati climatici di PALERMO

Zona climatica	B
Gradi giorno	796
Altitudine	189 s.l.m
Coordinate	38°3', 13° 7'
Temperatura minima inverno (estrema)	3,4°
Temperatura max. estiva (estrema)	38,6°
Velocità del vento (media annua)	2,5 m/s
Radiazione giornaliera (media annua)	5876 Mj/m2

SOLE E NUVOLE					VENTO				
MESE	ELIOF	RADIAZ	NUVOL	GSER	MESE	DIREZ PREV	GVEN	V MED	V MAX
1		8,4	7	8	1	O SO	13	4,6	6,7
2		11,5	6	8	2	O SO	14	5,1	7,4
3		15,4	6	9	3	SO O	12	4,5	6,4
4		19,1	6	10	4	O SO	10	4,4	6,1
5		22,7	5	14	5	E SO	6	3,9	5,3
6		24,2	4	17	6	E SO	7	3,9	5,2
7		24,3	2	24	7	E SO	6	3,8	5,0
8		21,4	2	23	8	E SO	5	3,6	4,7
9		16,9	4	15	9	SO E	5	3,6	4,8
10		12,9	6	11	10	SO O	8	3,9	5,3
11		8,7	6	9	11	SO O	10	4,1	5,9
12		7,3	6	8	12	SO O	11	4,4	6,4
Anno		5876	5,0	156	Anno		107	4,2	7,4



6.5 Analisi termo-igrometrica delle tipologie di involucro scelte

La valutazione dei sistemi di facciata doppia pelle trasparente può essere affrontata soltanto definendo le caratteristiche degli elementi che costituiscono il componente di facciata in termini di trasmittanza termica e temperatura superficiale e analizzando successivamente come queste prestazioni influenzino positivamente o negativamente il fabbisogno energetico dell'ambiente confinato.

Gli involucri dinamici e intelligenti appartengono a quelle nuove tipologie di tecnologie di facciata nelle quali sono reimpostati in modo innovativo il ruolo della massa e gli scambi di energia fra interno ed esterno attraverso l'involucro dell'edificio. Se la parete perimetrale è soggetta al passaggio del calore, del vapore, dell'aria, della luce e del rumore, in queste soluzioni più evolute a schermo avanzato i suddetti scambi divengono fattori essenziali del progetto di quella che rappresenta una tecnologia d'involucro in grado di regolare dinamicamente l'influenza del clima sull'edificio.

Una delle difficoltà maggiori nell'analisi di questi componenti di facciata è data dalla determinazione precisa di tali prestazioni a causa della complessità dei valori che entrano in gioco nel definire le caratteristiche dei vari elementi che le compongono.

Le performance termiche di una facciata doppia pelle sono definite dagli stessi parametri che si utilizzano per le superfici trasparenti:

- Coefficiente di assorbimento solare
- Valore di trasmittanza termica
- Temperatura interna del vetro

Inoltre si devono valutare i seguenti parametri per definire il comportamento termico/fluido della cavità del componente di facciata ventilato:

- Movimento d'aria della cavità
- Temperatura dell'aria

Questi due parametri descrivono bene come una facciata doppia pelle trasparente assorbe la radiazione solare durante i mesi estivi e come la stessa possa contribuire alla ventilazione naturale degli spazi adiacenti.

Un altro importante parametro che influenza il benessere degli utenti è la temperatura interna del vetro. In accordo con ASHARE 55, la temperatura superficiale interna in un ambiente destinato ad attività sedentarie deve aggirarsi intorno a 5-10° F.

Un'analisi dettagliata delle prestazioni termo igrometriche dovrebbe essere fatta in regime fisico dinamico, valutando attentamente ad esempio, le variazioni di temperatura all'interno dell'intercapedine al fine di calcolare correttamente le dimensioni della stessa e le caratteristiche del sistema schermante. Attualmente, tuttavia, i software di modellazione dinamica presenti sul mercato, sono solitamente utilizzati per valutare le prestazioni dei componenti di facciata doppia pelle dopo il monitoraggio di un prototipo messo in opera.

La regola infatti vuole che dall'analisi del monitoraggio del prototipo siano desunti dati, quali le temperature superficiali dei vari strati, che inseriti poi in software di valutazione fluidodinamica complessa, come ad esempio Fluent o ESP-r permettano di definire la reale dinamica dell'andamento delle temperature e del movimento dell'aria all'interno dell'intercapedine, determinando quindi nel dettaglio le prestazioni in termini di trasmittanza ed inerzia termica del componente.

Nell'ambito di questa tesi di dottorato ci siamo limitati a valutare le prestazioni del componente di facciata, di cui abbiamo definito in fase di progetto le caratteristiche dimensionali e materiche, in regime termico statico utilizzando i dati:

- Di trasmittanza termica delle componenti opache (profilati in alluminio del telaio)

e trasparenti (vetrature) forniti dall'azienda che ci ha supportato nello sviluppo del prototipo;

- Analizzando le prestazioni in termini di trasmittanza termica dei vari componenti opachi e trasparenti attraverso il software Thermus.

Nelle pagine seguenti abbiamo indicato, mediante delle schede prestazionali, le caratteristiche dei vari elementi che sono stati successivamente analizzati nella definizione del fabbisogno energetico dello spazio confinato: sia in relazione al componente di facciata multi-layer che alle altre tipologie di componenti di facciata utilizzati come termini di confronto.

Per quanto riguarda le altre tipologie di facciata, abbiamo definito le caratteristiche termo-igrometriche di:

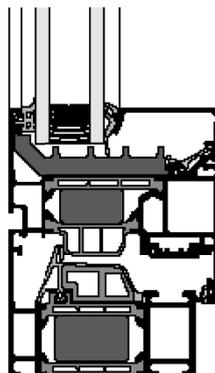
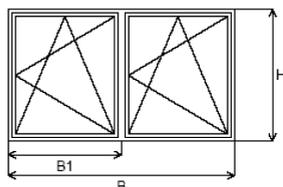
- Infitto in alluminio a taglio termico con doppio vetro basso-emissivo e pellicola assorbente. Dimensioni 3,00 m x 1,35 m
- Infitto in alluminio a taglio termico con doppio vetro basso-emissivo e pellicola assorbente. Dimensioni 2,50 m x 3,00 m
- Facciata continua in vetro con profilati di sostegno in alluminio a taglio termico e tamponamento in vetro camera basso emissivo. Dimensioni 5,00 m x 3,00 m
- Facciata continua esterna (nella soluzione a doppia pelle) caratterizzata da profilati di sostegno in alluminio e tamponamento in vetro stratificato 4+4. Dimensioni 5,00 m x 3,00 m
- Facciata continua in alluminio coibentato con 6,00 cm di lana di vetro retto da infisso in alluminio a taglio termico. Dimensioni 5,00 m x 3,00 m con infisso in alluminio a taglio termico con doppio vetro basso-emissivo e pellicola assorbente. Dimensioni 1,35 m x 3,00 m

In particolare per quanto riguarda il componente di facciata 'intelligente' sono state definite le prestazioni termo-igrometriche:

- Della Pelle interna:
 - Infitto in alluminio a taglio termico con doppio vetro basso-emissivo e pellicola assorbente. Dimensioni 2,50 m x 3,00 m.
 - Pannello in alluminio coibentato con 6,00 cm di lana di vetro e compensato marino retto da infisso in alluminio a taglio termico. Dimensioni 2,50 m x 3,00 m.
- Pelle esterna:
 - Pannello fisso con alloggiamento di pannello fotovoltaico in silicio policristallino e telaio in alluminio. Nella fase di simulazione il pannello fotovoltaico è stato assimilato ad un vetrocamera. Dimensioni 2,50 m x 3,00 m
 - Pannello mobile con vetro stratificato 4+4 e interposta pellicola pvb installato su telaio mobile in alluminio. Dimensioni 2,50 m x 3,00 m

6.5.1 Calcolo della trasmittanza dell' infisso in alluminio a taglio termico con doppio vetro basso-emissivo e pellicola assorbente. Dimensioni 3,00 m x 1,35 m

CARATTERISTICHE trasmittanza delle **FINESTRA 3,00 X 1,35**
 Determinazione del coefficiente di trasmittanza termica U_w
 dipendente dalle misure secondo DIN V 4108 - 4: 2002 - 02 (UNI EN ISO 10077-1)



Profilo in alluminio a taglio termico sp. 75,00 mm

TIPO FINESTRA: FINESTRA BIPARTITA CON ANTE A RIBALTA E BATTENTE

H	1350,00 mm
B	3000,00 mm
Superficie della finestra	4,5 m ²

SISTEMA PROFILI

Combinazione profili	75,00 mm Anta/Telaio Fisso
Uf-Valore	1.10 W/m ² K
Superficie telaio	0.619 m ²
Perdita di calore	0.681 W/K

Combinazione profili	75,00 mm Anta / Montante / Anta
Uf-Valore	1.10 W/m ² K
Superficie telaio	0.090 m ²
Perdita di calore	0.099 W/K

VETRAGGIO: Vetrocamera doppio 1.1

Ug-Valore	1.10 W/m ² K
Superficie vetro	3.330 m ²
Perdita di calore	3.663 W/K

COLLEGAMENTO PERIMETRALE VETRO: THERMIX (Thermix)

Ψ-Valore	0.05 W/m ² K
Lunghezza	10.350 m
Perdita di calore	0.549 W/K

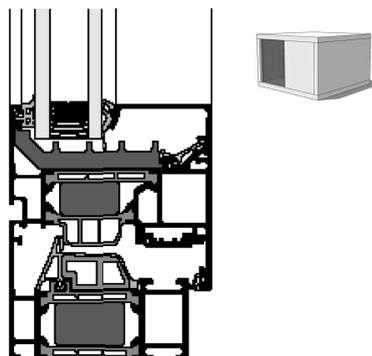
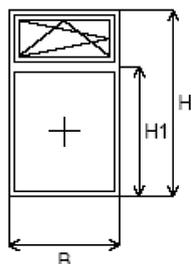
Trasmittanza termica U_w (Valore nominale) 1.24 W/m²K

Trasmittanza termica $U_{w,BW}$ (Valore misurato) 1.24 W/m²K

Il valore calcolato $U_{w,BW}$ è da prova dell'isolamento termico secondo EnEV quale valore U_w - Valore utilizzato

6.5.2 Calcolo della trasmittanza dell' infisso in alluminio a taglio termico con doppio vetro basso-emissivo e pellicola assorbente. Dimensioni 2,50 m x 3,00 m

CARATTERISTICHE trasmittanza delle FACCIAIA CONTINUA IN VETRO 5,00 X 3,00
 Determinazione del coefficiente di trasmittanza termica U_w
 dipendente dalle misure secondo DIN V 4108 - 4: 2002 - 02 (UNI EN ISO 10077-1)



Profilo in alluminio a taglio termico sp. 75,00 mm

TIPO FINESTRA: FINESTRA QUADRIPARTITA CON ANTE A RIBALTA E BATTENTE

H	3000,00 mm
H1	1100,00 mm
B	2500,00 mm
Superficie della finestra	7,50 m ²

SISTEMA PROFILI

Combinazione profili	75 mm Telaio Fisso
Uf-Valore	1.10 W/m ² K
Superficie telaio	0.341 m ²
Perdita di calore	0.375 W/K

Combinazione profili	75 mm Anta / Telaio Fisso
Uf-Valore	1.10 W/m ² K
Superficie telaio	0.461 m ²
Perdita di calore	0.507 W/K

Combinazione profili	75 mm Anta / Montante
Uf-Valore	1.10 W/m ² K
Superficie telaio	0.176 m ²
Perdita di calore	0.194 W/K

VETRAGGIO: Vetrocamera doppio 1.1

Ug-Valore	1.00 W/m ² K
Superficie vetro	6.521 m ²
Perdita di calore	66.521 W/K

COLLEGAMENTO PERIMETRALE VETRO: THERMIX (Thermix)

Ψ-Valore	0.05 W/m ² K
Lunghezza	14.950 m
Perdita di calore	0.792 W/K

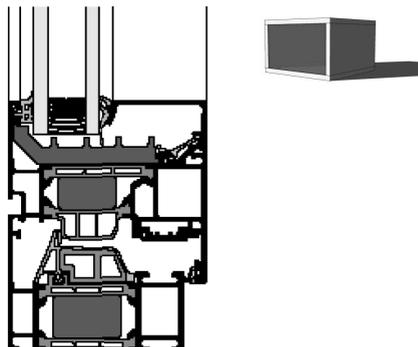
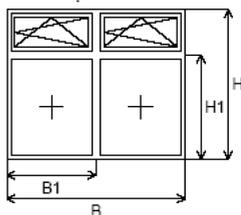
Trasmittanza termica U_w (Valore nominale) 1.12 W/m²K

Trasmittanza termica $U_{w,BW}$ (Valore misurato) 1.12 W/m²K

Il valore calcolato $U_{w,BW}$ è da prova dell'isolamento termico secondo EnEV quale valore U_w - Valore utilizzato Abbiamo ipotizzato che la facciata sia quadripartita con montanti verticali e orizzontali.

6.5.3 Calcolo della trasmittanza termica della facciata continua in vetro in alluminio a taglio termico con doppio vetro basso-emissivo e pellicola assorbente. Dimensioni 5,00 m x 3,00 m

CARATTERISTICHE trasmittanza delle FACCIATA CONTINUA IN VETRO 5,00 X 3,00
 Determinazione del coefficiente di trasmittanza termica U_w
 dipendente dalle misure secondo DIN V 4108 - 4: 2002 - 02 (UNI EN ISO 10077-1)



Profilo in alluminio a taglio termico sp. 75,00 mm

TIPO FINESTRA: FINESTRA QUADRIPARTITA CON ANTE A RIBALTA E BATTENTE

H	3000,00 mm
H1	1100,00 mm
B	5000,00 mm
B1	2500,00 mm
Superficie della finestra	15,0 m ²

SISTEMA PROFILI

Combinazione profili	75 mm Telaio Fisso
Uf-Valore	1.10 W/m ² K
Superficie telaio	0.523 m ²
Perdita di calore	0.575 W/K

Combinazione profili	75 mm Anta / Telaio Fisso
Uf-Valore	1.10 W/m ² K
Superficie telaio	0.506 m ²
Perdita di calore	0.557 W/K

Combinazione profili	75 mm Anta / Montante
Uf-Valore	1.10 W/m ² K
Superficie telaio	0.358 m ²
Perdita di calore	0.394 W/K

Combinazione profili	75 mm Anta / Montante / Anta
Uf-Valore	1.10 W/m ² K
Superficie telaio	0.142 m ²
Perdita di calore	0.157 W/K

VETRAGGIO: Vetrocamera doppio 1.1

Ug-Valore	1.10 W/m ² K
Superficie vetro	8.983 m ²
Perdita di calore	9.881 W/K

COLLEGAMENTO PERIMETRALE VETRO: THERMIX (Thermix)

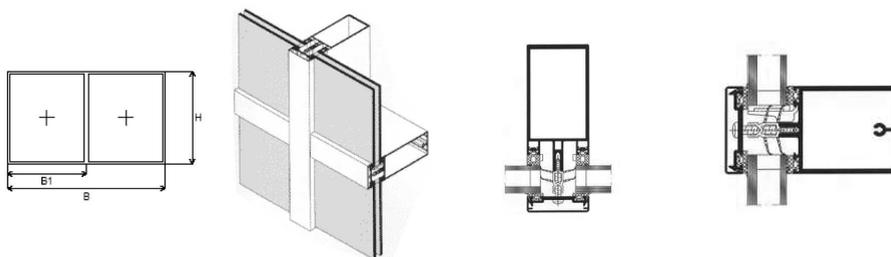
Ψ-Valore	0.05 W/m ² K
Lunghezza	21.850 m
Perdita di calore	1.158 W/K

Trasmittanza termica U_w (Valore nominale) 1.20 W/m²K**Trasmittanza termica $U_{w,BW}$ (Valore misurato) 1.20 W/m²K**

Il valore calcolato $U_{w,BW}$ è da prova dell'isolamento termico secondo EnEV quale valore U_w - Valore utilizzato
Abbiamo ipotizzato che la facciata sia quadripartita con montanti verticali e orizzontali.

6.5.4 Calcolo della trasmittanza termica della facciata continua esterna (nella soluzione a doppia pelle) caratterizzata da profilati di sostegno in alluminio e tamponamento in vetro camera. Dimensioni 5,00 m x 3,00 m

CARATTERISTICHE trasmittanza delle FACCIATA ESTERNA IN VETRO 5,00 X 3,00
Determinazione del coefficiente di trasmittanza termica U_w
dipendente dalle misure secondo DIN V 4108 - 4: 2002 - 02 (UNI EN ISO 10077-1)



Profilo FW 60 +

Montante

Traverso

FACCIATA ESTERNA CON SPECCHIATURE FISSE

H	3000,00 mm
B	5000,00 mm
B1	2500,00 mm
Superficie della finestra	15,0 m ²

SISTEMA PROFILI

Combinazione profili	60 mm Telaio Fisso
Uf-Valore	3.02 W/m ² K
Superficie telaio	0.798 m ²
Perdita di calore	2.410 W/K

Combinazione profili	50 mm Montante fisso
Uf-Valore	3.21 W/m ² K
Superficie telaio	0.220 m ²
Perdita di calore	0.708 W/K

VETRAGGIO: Vetrocamera doppio 3,3

Ug-Valore	3.30 W/m ² K
Superficie vetro	13.974 m ²
Perdita di calore	46.115 W/K

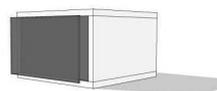
COLLEGAMENTO PERIMETRALE VETRO: Chemetall (TPS)

Ψ-Valore	0.05 W/m ² K
Lunghezza	21.236 m
Perdita di calore	1.126 W/K

Trasmittanza termica U_w (Valore nominale) 3.36 W/m²K

Trasmittanza termica $U_{w,BW}$ (Valore misurato) 3,36 W/m²K

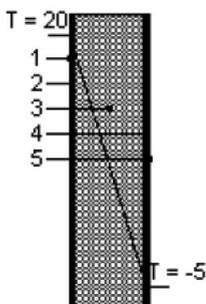
Il valore calcolato $U_{w,BW}$ è da prova dell'isolamento termico secondo EnEV quale valore U_w - Valore utilizzato
Abbiamo ipotizzato che la facciata sia quadripartita con montanti verticali e orizzontali.



6.5.5 Calcolo della trasmittanza termica della facciata continua in alluminio coibentato con 6,00 cm di lana di vetro retto da infisso in alluminio a taglio termico. Dimensioni 5,00 m x 3,00 m con infisso in alluminio a taglio termico con doppio vetro basso-emissivo e pellicola assorbente. Dimensioni 1,35 m x 3,00 m

FACCIATA CONTINUA ALLUMIINIO COIBENTATO TEST ROOM							
Descrizione strato (dall'interno all'esterno)	S (mm)	Lambda (W/mqK)	C (W/mqK)	M.S. (kg/mq)	P<50*10 ¹² (kg/msPa)	C.S. (J/kgK)	R (mqK/W)
Adduttanza interna	0		7,700			0	0,130
Alluminio.	5	220.000	44000.000	13.50	000.000	900	0.000
Da rocce feldspatiche - pannelli rigidi- appl. interne - mv.125.	80	0.037	0.468	10.00	150.000	1030	2.139
Alluminio.	5	220.000	44000.000	13.50	0.000	900	0.000
Adduttanza Esterna	0		25.000			0	0.040

Spessore	90 mm
Resistenza termica	2,30 m ² K/W
Trasmittanza	0,38 W/m ² K
Capacità termica areica	16,30 kj/m ² K
Trasmittanza termica periodica	0,42 W/ m ² K
Fattore di attenuazione	0,97
Massa superficiale	37 kg/m ²
Sfasamento	1,71



Stratigrafia struttura

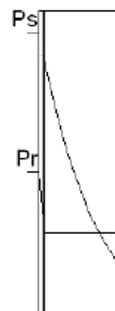
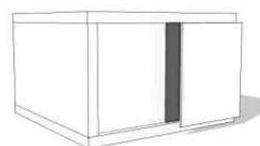
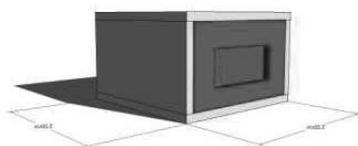


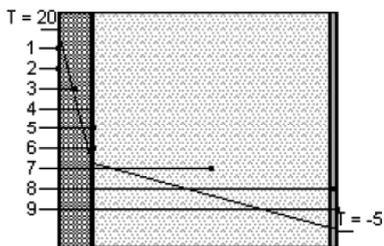
Diagramma delle pressioni



6.5.6 Verifica termo igrometrica della parte del componente di facciata intelligente costituita dal pannello coibentato con 6,00 cm di lana di vetro, intercapedine d'aria 60,00 cm e vetro esterno 4+4.

FACCIATA CONTINUA ALLUMIINIO COIBENTATO + FACCIATA ESTERNA IN VETRO TEST ROOM							
Descrizione strato (dall'interno all'esterno)	S (mm)	Lambda (W/mqK)	C (W/mqK)	M.S. (kg/mq)	P<50*10 ¹² (kg/msPa)	C.S. (J/kgK)	R (mqK/W)
Adduttanza interna	0		7,700			0	0,130
Alluminio.	5	220.000	44000.000	13.50	000.000	900	0.000
Da rocce feldspatiche - pannelli rigidi-appl. interne - mv.125.	80	0.037	0.468	10.00	150.000	1030	2.139
Alluminio.	5	220.000	44000.000	13.50	0.000	900	0.000
Strato d' aria verticale - spessore oltre 10 cm.	600	0.560	0.933	0.78	193.000	1008	1.071
Vetro	8,5	1.000	50.000	50.00	0.000	840	0.020
Adduttanza Esterna	0		25.000			0	0.040

Spessore	718 mm
Resistenza termica	4,00 m ² K/W
Trasmittanza	0,25 W/m ² K
Capacità termica areica	18,75 kj/m ² K
Trasmittanza termica periodica	0,31 W/ m ² K
Fattore di attenuazione	0,84
Massa superficiale	68 kg/m ²
Sfasamento	3,88



Stratigrafia struttura

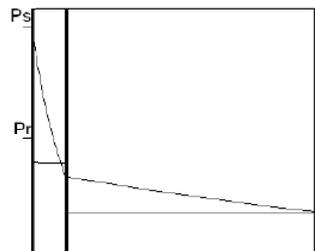
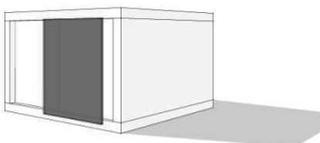


Diagramma delle pressioni



6.5.7 Calcolo della trasmittanza del vetro esterno 4+4 nel pannello fisso esterno

CARATTERISTICHE del VETRO DELLA SUPERFICIE ESTERNA



A

	A prima lastra	B- seconda lastra	C – terza lastra
Gas			
Rivestimento			
Primo vetro	Planilux 4,0 mm		
Rivestimento			
Strato	PVB normal 0,38 mm		
Second vetro	Planilux 4,0 mm		
Rivestimento			

SPESSORE E PESO

Spessore nominale	8,4 mm
Peso	20,4 kg/m ²

FATTORE UV

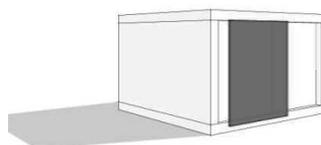
Trasmissione	2 %
--------------	-----

FATTORI LUMINOSI D65 2°

Trasmissione	87%
Riflessione esterna	8%
Riflessione interna	8%

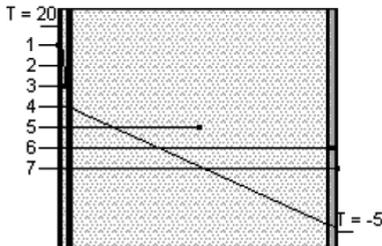
FATTORI ENERGETICI EN410

Trasmissione	71%
Riflessione esterna	7%
Assorbimento A1	22%
Fattore solare g	0,77
Shading coefficient SC	0,88



6.5.8 Verifica termo igrometrica della parte del componente di facciata intelligente nella configurazione invernale costituito da infisso interno con profilato in alluminio a taglio termico e doppio vetro basso-emissivo, intercapedine d'aria 60,00 cm e vetro stratificato esterno 4+4.

FACCIATA CONTINUA in VETRO BASSOEMISSIONIVO + FACCIATA ESTERNA IN VETRO TEST ROOM							
Descrizione strato (dall'interno all'esterno)	S (mm)	Lambda (W/mqK)	C (W/mqK)	M.S. (kg/mq)	P<50*10 ¹² (kg/msPa)	C.S. (J/kgK)	R (mqK/W)
Adduttanza interna	0		7,700			0	0,130
Vetro	34,8	1.000	125.000	20.00	0.000	840	0.008
Intercapedine d'aria	16	0.026	1.625	0.02	193.000	1008	0.615
Vetro	8	1.000	125.000	20.00	0.000	840	0.008
Strato d'aria verticale - spessore oltre 10 cm.	600	0.560	0.933	0.78	193.000	1008	1.071
Vetro	8	1.000	50.000	50.00	0.000	840	0.020
Adduttanza Esterna	0		25.000			0	0.040
Spessore			652 mm				
Resistenza termica			1,89 m ² K/W				
Trasmittanza			0,294 W/m ² K				
Capacità termica areica			23,21kj/m ² K				
Trasmittanza termica periodica			0,52				
Fattore di attenuazione			0,96				
Massa superficiale			91 kg/m ²				
Sfasamento			1,63 h				



Stratigrafia struttura

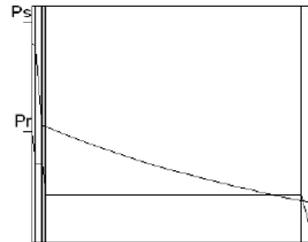
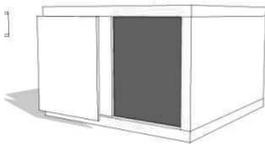


Diagramma delle pressioni



6.5.9 Calcolo della trasmittanza del vetro dell'infisso interno 5.5+4.4

CARATTERISTICHE del VETRO DELLA SUPERFICIE INTERNA			
55.1 + 16 Gas + 44.1 Stadip Silence + Planitherm Ultra N RW = 45 DB Certificati			
	A prima lastra	B- seconda lastra	C – terza lastra
Gas		Argon 90% 16,0 mm	
Rivestimento	Antelio Chiaro	Planitherm Ultra N	
Primo vetro	Planilux 5,0 mm	Planilux 4,0 mm	
Rivestimento			
Strato	PVB normal 0,38 mm	PVB Silence 0,38 mm	
Second vetro	Planilux 5,0 mm	Planilux 4,0 mm	
Rivestimento			



SPESSORE E PESO	
Spessore nominale	34,8 mm
Peso	45,8 kg/m ²

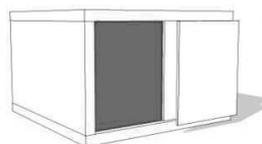
FATTORE UV	
Trasmissione	<1%

FATTORI LUMINOSI D65 2°	
Trasmissione	38%
Riflessione esterna	33%
Riflessione interna	23%

FATTORI ENERGETICI EN410	
Trasmissione	24%
Riflessione esterna	31%
Assorbimento A1	37%
Assorbimento A2	7%

Fattore solare g	0,32
Shading coefficient SC	0,37

TRASMISSIONE TERMICA	
Ug	1,1 W/m ² K

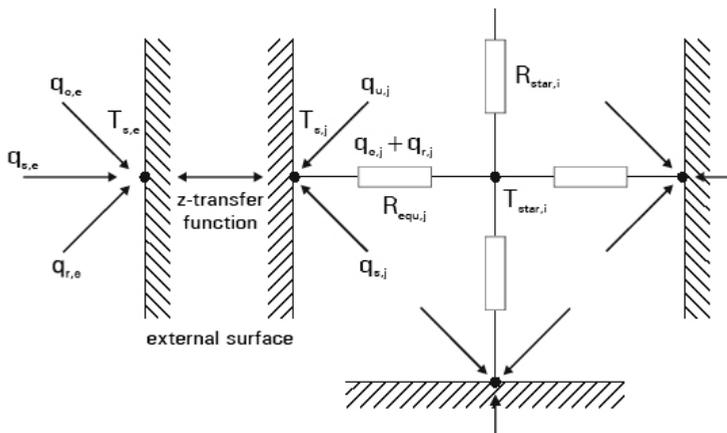


6.6 Simulazioni termodinamiche e calcolo del fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento ed il raffrescamento secondo il modello predeterminato

Volendo valutare come l'adozione del componente di facciata doppia pelle intelligente possa influenzare il fabbisogno energetico dell'edificio, dopo aver definito le caratteristiche termo igrometriche dei suoi componenti e facendo riferimento ai valori di trasmittanza valutati precedentemente, in questa fase, abbiamo calcolato, attraverso il confronto con altri componenti di facciata, come variasse il fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento ed il raffrescamento all'interno della test room virtuale, al fine di comprendere se realmente il nostro componente può garantire performance migliori alla scala dell'edificio rispetto ad una facciata continua monostrato trasparente o ad una doppia pelle, con layer esterno fisso.

Le simulazioni sono state condotte con il software TRNSYS (TRaNsient System Simulation Program), sviluppato dall'Università del Wisconsin - Madison Solar Energy Lab e dall'Università del Colorado Solar Energy Applications Lab.

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



$T_{a,i}$	Temperatura dell'aria della zona di calcolo della zona i (K)	$R_{star,i}$	Resistenza termica* (mqK/W)
$T_{star,i}$	Temperatura * della zona i (K)	$R_{equ,i}$	Resistenza termica equivalente della superficie j (mqK/W)
$T_{s,i}$	Temperatura superficiale della superficie j	$q_{c,i}$	Quantità di calore trasmesso per convezione dalla superficie (W/mq)
$Q_{inf,i}$	Dispersione di calore per Infiltrazione (W)	$q_{r,i}$	Quantità di calore trasmesso dalla superficie per radiazione verso tutte le altre superfici (W/mq)
$Q_{v,i}$	Dispersioni di calore per ventilazione (W)	$q_{u,j}$	Flusso di calore passante per la superficie j (W/mq)
$Q_{gain,i}$	Trasmissione di calore per convezione (W)	$q_{s,j}$	Radiazione solare sulla superficie j (W/mq)
$Q_{cping,i}$	Trasmissione di calore verso una zona adiacente (W)		

Tab. 6.3. Schema sintetico dei parametri di cui tiene conto la simulazione con il software TRNSYS

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 caratterizzati dalla presenza, o dall'assenza, di schermature esterne, fisse o mobili.

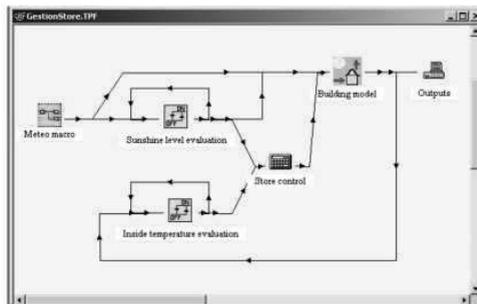
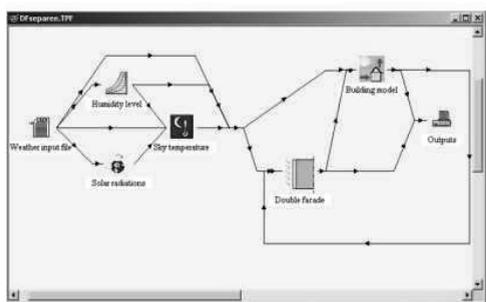
Trnsys si contraddistingue per la sua struttura modulare e per la versatilità del suo impiego. Il sistema edificio impianto viene, infatti, definito dall'utente attraverso una rete costituita da moduli detti type, scelti per tipo e numero in relazione agli obiettivi dell'analisi. Il programma di simulazione effettua un calcolo di tipo orario su un modello a nodi concentrati ed ha un'accuratezza riconosciuta a livello internazionale.

Il software TRNSYS, 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 (Q_{heat} , kWh)
- del Fabbisogno di energia primaria per il raffrescamento (Q_{cool} , kWh)

Da cui abbiamo ricavato:

- Il fabbisogno di energia primaria totale (kWh)
- I Consumi energetici per riscaldamento e raffrescamento (€)
- Le Emissioni di CO_2 per il riscaldamento ed il raffrescamento (kg)



Figur3 6.1 e 6.2 – Immagini dell'Interfaccia del software TRNSYS utilizzato per le simulazioni condotte in relazione all'analisi del caso studio rispetto ad involucri di facciata tradizionali.

6.6.1 Monetizzazione del fabbisogno energetico per il riscaldamento ed il raffrescamento e calcolo della relativa CO_2

Volendo quantificare i costi relativi all'impianto di riscaldamento e raffrescamento adottati, abbiamo definito il rendimento della pompa di calore a servizio dell'unità di simulazione ed il costo dell'energia Elettrica su scala nazionale per arrivare quindi a quantificare il costo in kW dell'energia fornita al sistema e le emissioni di CO_2 prodotte.

Nell'analisi del fabbisogno energetico abbiamo ipotizzato che l'impianto di riscaldamento e raffrescamento sia costituito da una pompa di calore elettrica che fornisce energia ad un impianto ad aria, con i seguenti indici di prestazione:

- COP⁵ per il riscaldamento 4,2
- EER⁶ per il raffrescamento 3,2

Per la definizione dell'indice di rendimento del sistema di condizionamento dell'aria ci siamo riferiti ai valori medi dei sistemi attualmente in commercio, mentre il prezzo dell'energia elettrica è stato definito riferendosi a quello indicato dall'Autorità per l'Energia Elettrica ed Il Gas.

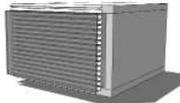
CASI STUDIO ANALIZZATI

Modello	Pianta	Sezione	Caratteristiche	Trasmittanza
			<p>Parete con isolamento a cappotto ($K:0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$) con finestra doppio vetro basso emissivo e telaio a taglio termico ($K:1,24 \text{ W/m}^2\text{K}$).</p> <p>Grandezza apertura trasparente $3,00 \times 1,35 \text{ m}$.</p>	<p>Muro $K: 0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$</p> <p>Finestra $K: 1,20 \text{ W/m}^2\text{K}$</p>
CASO 1, MURATURA E FINESTRA				
			<p>Parete con isolamento a cappotto ($K:0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$) con finestra doppio vetro basso emissivo e telaio a taglio termico ($K:1,24 \text{ W/m}^2\text{K}$).</p> <p>Grandezza apertura trasparente $3,00 \times 2,50 \text{ m}$.</p>	<p>Muro $K: 0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$</p> <p>Finestra $K: 1,20 \text{ W/m}^2\text{K}$</p>
CASO 2, FINESTRA PER IL 50% DELLA SUPERFICIE				
			<p>Facciata continua trasparente, doppio vetro basso emissivo e telaio a taglio termico ($K:1,20 \text{ W/m}^2\text{K}$).</p> <p>Grandezza apertura trasparente $5,00 \times 3,00 \text{ m}$.</p>	<p>$K: 1,20 \text{ W/m}^2\text{K}$</p>
CASO 3, FACCIATA TRASPARENTE				
			<p>Facciata continua trasparente, doppio vetro basso emissivo e telaio a taglio termico ($K:1,20 \text{ W/m}^2\text{K}$).</p> <p>Grandezza apertura trasparente $5,00 \times 3,00 \text{ m}$.</p> <p>Sistema di schermature fisso esterno in lamelle di alluminio dimensioni</p>	<p>$K: 1,20 \text{ W/m}^2\text{K}$</p>
CASO 4, FACCIATA TRASPARENTE con SCHERMATURA FISSA ESTERNA TUTTO L'ANNO				
			<p>Facciata continua trasparente, doppio vetro basso emissivo e telaio a taglio termico ($K:1,20 \text{ W/m}^2\text{K}$).</p> <p>Grandezza apertura trasparente $5,00 \times 3,00 \text{ m}$.</p> <p>Sistema di schermature mobile esterna in lamelle di alluminio dimensioni</p>	<p>$K: 1,20 \text{ W/m}^2\text{K}$</p>
CASO5, FACCIATA TRASPARENTE con SCHERMATURA MOBILE ESTERNA PRESENTE SOLO NEI MESI ESTIVI				

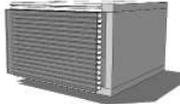
CASI STUDIO ANALIZZATI

Modello	Pianta	Sezione	Caratteristiche	Trasmittanza
			<p>Doppio vetro basso emissivo e telaio a taglio termico</p> <p>Intercapedine debolmente ventilata spessore 60,00 cm;</p> <p>Facciata continua trasparente con vetro antisfondamento (K:3,36 W/m²K).</p> <p>Grandezza apertura trasparente 5,00 x 3,00 m.</p>	<p>Pelle interna 1,2 W/m²K</p> <p>Pelle esterna 3,36 W/m²K</p>

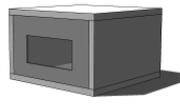
CASO 6, FACCIATA TRASPARENTE + PELLE ESTERNA DI VETRO

			<p>Doppio vetro basso emissivo e telaio a taglio termico</p> <p>Intercapedine debolmente ventilata spessore 60,00 cm;</p> <p>Facciata continua trasparente con vetro antisfondamento (K:3,36 W/m²K).</p> <p>Sistema di schermatura fissa a lamelle in alluminio poste nell'intercapedine</p> <p>Grandezza apertura trasparente 5,00 x 3,00 m.</p>	<p>Pelle interna 1,2 W/m²K</p> <p>Pelle esterna 3,36 W/m²K</p>
---	---	---	---	--

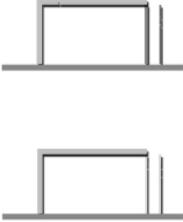
CASO 7, FACCIATA TRASPARENTE + PELLE ESTERNA DI VETRO E SCHERMATURA FISSA TUTTO L'ANNO

			<p>Doppio vetro basso emissivo e telaio a taglio termico</p> <p>Intercapedine debolmente ventilata spessore 60,00 cm;</p> <p>Facciata continua trasparente con vetro antisfondamento (K:3,36 W/m²K).</p> <p>Sistema di schermatura mobile a lamelle in alluminio poste nell'intercapedine</p> <p>Grandezza apertura trasparente 5,00 x 3,00 m.</p>	<p>Pelle interna 1,2 W/m²K</p> <p>Pelle esterna 3,36 W/m²K</p>
---	---	---	--	--

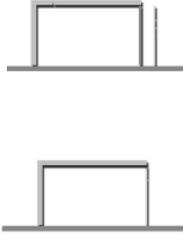
CASO 8, FACCIATA TRASPARENTE + PELLE ESTERNA DI VETRO E SCHERMATURA PRESENTE SOLO D'ESTATE

			<p>Facciata continua in pannelli d'alluminio coibentato (lana di roccia) (K: 0,43 W/m²K), con finestra doppio vetro basso emissivo e telaio a taglio termico (K:1,24 W/m²K).</p> <p>Grandezza apertura trasparente 3,00 x 1,35 m.</p>	<p>Alluminio 0,38 W/m²K</p> <p>Finestra 1,20 W/m²K</p>
---	---	---	---	--

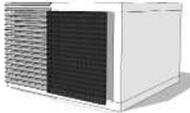
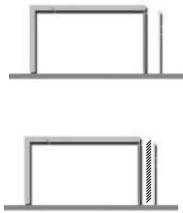
CASO 9, FACCIATA CONTINUA IN ALLUMINIO COIBENTATO

Modello	Pianta	Sezione	Caratteristiche	Trasmittanza
			<p>Facciata continua trasparente, Intercapedine ventilata spessore 60,00 cm; Superficie esterna trasparente con vetro antisfondamento. (K:3,36 W/m²K).</p> <p>Facciata continua in pannelli d'alluminio coibentato (lana di roccia) (K: 0,43 W/m²K) Intercapedine ventilata spessore 60,00 cm; Superficie esterna trasparente con vetro antisfondamento. (K:3,36 W/m²K).</p> <p>Grandezza apertura trasparente 2,50 x 3,00 m.</p>	<p>Componente trasparente: Pelle interna 1,2 W/m²K Pelle esterna 3,36 W/m²K Componente opaca: K: 0,25 W/m²K</p>

CASO 10, COMPONENTE DI FACCIATA INTELLIGENTE CONFORMAZIONE INVERNALE

			<p>Facciata continua con Doppio vetro basso emissivo e telaio a taglio termico fattore di assorbimento $g < 0,50$</p> <p>Sistema di schermature a lamelle in alluminio orizzontali</p> <p>Facciata continua in pannelli d'alluminio coibentato (lana di roccia) (K: 0,43 W/m²K)</p> <p>Intercapedine ventilata spessore 60,00 cm; Superficie esterna trasparente con vetro antisfondamento. (K:3,36 W/m²K).</p> <p>Grandezza apertura trasparente 2,50 x 3,00 m.</p>	<p>Componente trasparente: Pelle interna 1,2 W/m²K Pelle esterna 3,36 W/m²K Componente opaca: K: 0,25 W/m²K</p>
--	--	--	--	---

CASO 11, COMPONENTE DI FACCIATA INTELLIGENTE CONFORMAZIONE ESTIVA

			<p>Facciata continua con Doppio vetro basso emissivo e telaio a taglio termico fattore di assorbimento $g < 0,50$</p> <p>Sistema di schermature a lamelle in alluminio orizzontali in</p> <p>Facciata continua in pannelli d'alluminio coibentato (lana di roccia) (K: 0,43 W/m²K)</p> <p>Intercapedine ventilata spessore 60,00 cm; Superficie esterna trasparente con vetro antisfondamento. (K:3,36 W/m²K).</p> <p>Sistema di schermatura a lamelle in alluminio esterno al componente trasparente.</p> <p>Grandezza apertura trasparente 2,50 x 3,00 m.</p>	<p>Componente trasparente: Pelle interna 1,2 W/m²K Pelle esterna 3,36 W/m²K Componente opaca: K: 0,25 W/m²K</p>
---	---	---	---	---

CASO 12, COMPONENTE DI FACCIATA INTELLIGENTE CONFORMAZIONE ESTIVA CON SISTEMA DI SCHERMATURA

Nella valutazione dei costi è stato considerato il solo prezzo dell'energia senza valutare eventuali extracosti dovuti a spese di manutenzione a cui potrebbe essere soggetto l'impianto; questa scelta è stata fatta in relazione alla considerazione che l'unità simulata ha dimensioni talmente esigue che i costi di manutenzione inciderebbero in modo negativo sul risultato finale.

Ci siamo limitati a valutare i valori di CO₂ in relazione alla fase d'uso del sistema dinamico di facciata rimandato a fasi successive della ricerca la quantificazione della CO₂ relativa all'intero ciclo di vita di tutti i materiali in esso utilizzati e del processo di produzione dei componenti di cui è costituito.

Nelle pagine seguenti sono riportati i risultati sintetici ottenuti per i dodici casi analizzati attraverso le simulazioni con il software TRNSYS. Per facilitare la sistematizzazione dei parametri che ci hanno permesso di valutare ciascuno dei sistemi di involucro verticale a cui abbiamo confrontato il caso studio del componente dinamico di facciata abbiamo sviluppato una scheda di sintesi nella quale sono indicate le caratteristiche degli elementi considerati caso per caso ed i risultati raggiunti in termini di:

- consumi per il condizionamento estivo ed invernale;
- fabbisogno di energia primaria totale;
- consumi di energia elettrica
- emissione di CO₂.

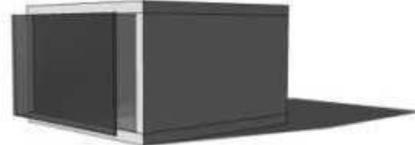
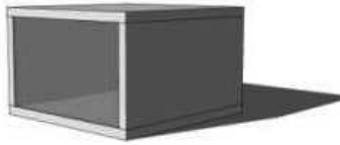
Dati per la monetizzazione del fabbisogno energetico per il riscaldamento	
COP	4,2
Prezzo dell'energia elettrica al kWh	0,19 €
1 kW fornito all'impianto di riscaldamento equivale a: $(1/4,5) \times 0,19$	0,04 €/kW

Dati per la monetizzazione del fabbisogno energetico per il raffrescamento	
EER	3,2
Prezzo dell'energia elettrica al kWh	0,19 €
1 kW fornito all'impianto di riscaldamento equivale a: $(1/3,2) \times 0,19$	0,05 €/kW

CALCOLO DELLA CO2 PRODOTTA PER IL RISCALDAMENTO	
COP	4,2
CO2 immessa nell'atmosfera per produrre 1 kWh (corrente elettrica)	0,58 kg di CO2
1 kW fornito all'impianto di riscaldamento equivale a: $(1/4,2) \times 0,58$	0,13 kg di CO2

CALCOLO DELLA CO2 PRODOTTA PER IL RAFFRESCAMENTO	
EER	3,2
CO2 immessa nell'atmosfera per produrre 1 kWh (corrente elettrica)	0,58 kg di CO2
1 kW fornito all'impianto di riscaldamento equivale a: $(1/3,2) \times 0,58$	0,18 kg di CO2

6.6.2 SCHEDE DI ANALISI DEL FABBISOGNO DI ENERGIA PRIMARIA PER IL RISCALDAMENTO ED IL RAFFRESCAMENTO

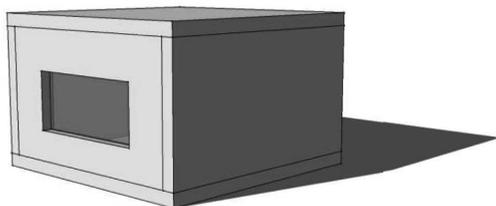


CASO 1, MURATURA E FINESTRA

Il caso base è stato analizzato per quattro orientamenti in 3 località geografiche diverse (Milano, Firenze, Palermo) su di esso si basano le simulazioni chiamate Caso_0 da 1 a 12

Software di simulazione termodinamica Trnsys

Strumento di analisi Test room virtuale

**DATI DIMENSIONALI**

Dimensioni lorde in pianta 5,00 x 5,00 m.

Altezza 3,00 m

Orientamento parete test Nord

Est

Ovest

Sud

Dimensione apertura sulla parete analizzata 3,00 x 1,35 m

37% della parete

Sistema di schermatura solare Assente

LOCALIZZAZIONE

Localizzazione 1 Milano Zona climatica E Gradi giorno 2404

Localizzazione 2 Firenze Zona climatica D Gradi giorno 1821

Localizzazione 3 Palermo Zona climatica B Gradi giorno 796

VENTILAZIONE

Ricambi d'aria per ventilazione naturale 0,6 h⁻¹

Sistema di ventilazione meccanica Assente

SISTEMA DI RISCALDAMENTO ATTIVO

Combustibile Elettricità

Temperatura che determina l'entrata in funzione del sistema di riscaldamento Minore 21 °C

Periodo di accensione Milano 15 ottobre – 15 aprile

Firenze 1 novembre – 15 aprile

Palermo 1 dicembre – 31 marzo

Schedules 9:00 – 19:00

Da lunedì al venerdì esclusi i festivi

CARATTERISTICHE DELL'INVOLUCRO OPACO

Pareti (intonaco 2,00 cm + 8,00 cm isolante termico EPS + Poroton 25,00 cm + intonaco 2,00 cm) Trasmittanza termica: 0,33 W/mqK

Solaio di copertura (intonaco 2,00 cm + solaio laterocemento 24,00 cm + massetto in c.a. 5,00 cm + barriera al vapore + isolante termico 10,00 cm EPS + impermeabilizzante) Trasmittanza termica: 0,28 W/mqK

Solaio controterra (piastrelle 2,00 cm + massetto in c.a. 4,00 cm isolante termico 8,00 cm EPS + solaio laterocemento 24,00 cm + intercapedine d'aria 60,00 cm + magrone 10,00 cm) Trasmittanza termica: 0,28 W/mqK

Finestra con telaio in alluminio a taglio termico e doppio vetro basso emissivo e con pellicola solare g <0,5 Uw:1,24 W/mqK

FABBISOGNO ENERGETICO VALUTATO PER IL RISCALDAMENTO ED IL RAFFRESCAMENTO

Orientamento	Q_{HEAT}				Q_{COOL}			
	kWh				kWh			
	SUD	OVEST	EST	NORD	SUD	OVEST	EST	NORD
MILANO	5623,49	6920,75	6842,05	7677,02	519,73	688,08	672,17	30,69
FIRENZE	3717,68	5179,38	4829,31	5680,55	907,76	1034,23	1447,16	211,97
PALERMO	220,95	1291,08	1295,46	2058,26	1651,09	2348,83	2283,56	792,74

FABBISOGNO di ENERGIA PRIMARIA TOTALE (kWh)

	Milano	Firenze	Palermo
Sud	1501,34	1168,84	568,57
Ovest	1862,82	1556,38	1041,41
Est	1839,11	1602,07	1022,05
Nord	1837,45	1445,12	737,79

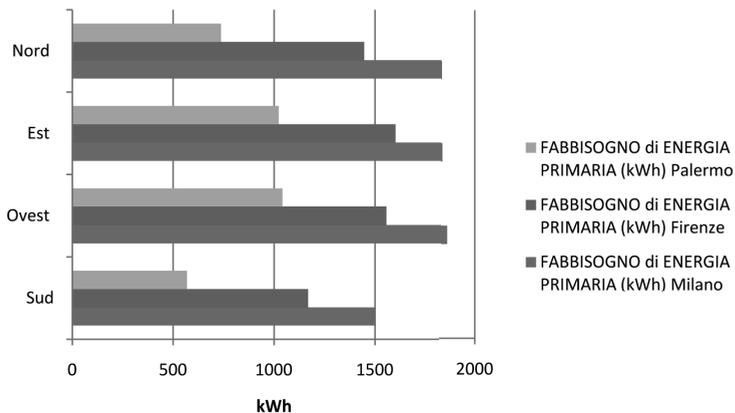
CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA (€)

	Milano	Firenze	Palermo
Sud	52,55	40,91	19,90
Ovest	65,20	54,47	36,45
Est	64,37	56,07	35,77
Nord	64,31	50,61	25,82

EMISSIONI DI CO2 (kg)

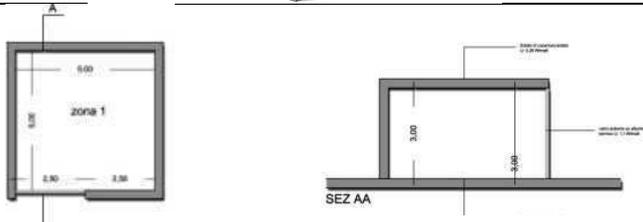
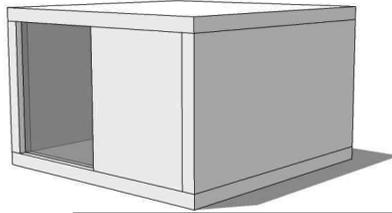
	Milano	Firenze	Palermo
Sud	225,20	175,33	85,29
Ovest	279,42	233,46	156,21
Est	275,87	240,31	153,31
Nord	275,62	216,92	110,67

Fabbisogno di energia primaria totale



CASO 2, MURATURA 50% E FINESTRA 50%

Software di simulazione termodinamica	Trnsys
Strumento di analisi	Test room virtuale

**DATI DIMENSIONALI**

Dimensioni lorde in pianta	5,00 x 5,00 m.
Altezza	3,00 m
Orientamento parete test	Nord
	Est
	Ovest
	Sud
Dimensione apertura sulla parete analizzata	2,50 x 3,00 m
	50% della parete
Sistema di schermatura solare	Assente

LOCALIZZAZIONE

Localizzazione 1	Milano	Zona climatica E	Gradi giorno 2404
Localizzazione 2	Firenze	Zona climatica D	Gradi giorno 1821
Localizzazione 3	Palermo	Zona climatica B	Gradi giorno 796

VENTILAZIONE

Ricambi d'aria per ventilazione naturale	0,6 h ⁻¹
Sistema di ventilazione meccanica	Assente

SISTEMA DI RISCALDAMENTO ATTIVO

Combustibile	Elettricità	
Temperatura che determina l'entrata in funzione del sistema di riscaldamento	Minore 21 °C	
Periodo di accensione	Milano	15 ottobre – 15 aprile
	Firenze	1 novembre – 15 aprile
	Palermo	1 dicembre – 31 marzo
Schedules		9:00 – 19:00
		Da lunedì al venerdì esclusi i festivi

CARATTERISTICHE DELL'INVOLUCRO OPACO

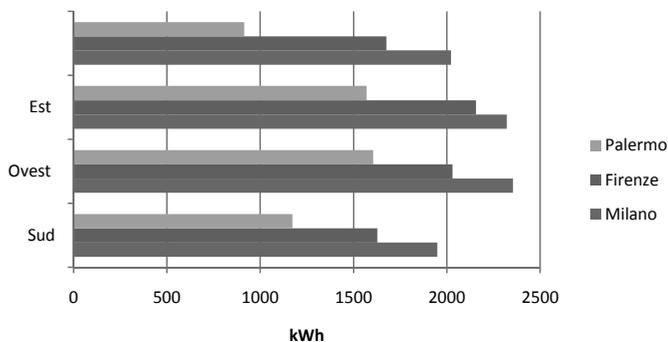
Pareti (intonaco 2,00 cm + 8,00 cm isolante termico EPS + Poroton 25,00 cm + intonaco 2,00 cm)	Trasmittanza termica: 0,33 W/mqK
Solaio di copertura (intonaco 2,00 cm + solaio laterocemento 24,00 cm + massetto in c.a. 5,00 cm + barriera al vapore + isolante termico 10,00 cm EPS + impermeabilizzante)	Trasmittanza termica: 0,28 W/mqK
Solaio controterra (piastrelle 2,00 cm + massetto in c.a. 4,00 cm isolante termico 8,00 cm)	Trasmittanza termica: 0,28 W/mqK

cm EPS + solaio laterocemento 24,00 cm +
intercapedine d'aria 60,00 cm + magrone 10,00
cm)

Finestra con telaio in alluminio a taglio termico Uw:1,24 W/mqK
e doppio vetro basso emissivo e con pellicola
solare g <0,5

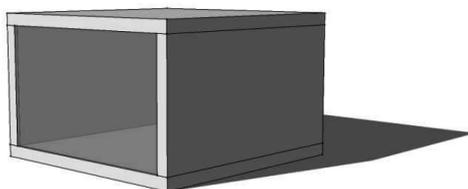
FABBISOGNO ENERGETICO VALUTATO PER IL RISCALDAMENTO ED IL RAFFRESCAMENTO								
Orientamento	Q _{HEAT}				Q _{COOL}			
	kWh				kWh			
	SUD	OVEST	EST	NORD	SUD	OVEST	EST	NORD
MILANO	5699,82	6989,62	6886,81	7860,29	1892,85	2206,75	2181,17	484,21
FIRENZE	3801,07	5228,12	4793,86	5795,49	2312,13	2516,00	3248,79	797,67
PALERMO	1196,59	1424,44	1394,48	2000,78	2841,99	4052,64	3962,74	1401,92
FABBISOGNO di ENERGIA PRIMARIA TOTALE (kWh)								
	Milano			Firenze		Palermo		
Sud	1948,62			1627,56		1173,02		
Ovest	2353,80			2031,04		1605,60		
Est	2321,33			2156,64		1570,37		
Nord	2022,81			1676,69		914,48		
CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA (€)								
	Milano			Firenze		Palermo		
Sud	68,20			56,96		41,06		
Ovest	82,38			71,084		56,19		
Est	81,24			75,48		54,96		
Nord	70,80			58,68		32,01		
EMISSIONI DI CO2 (kg)								
	Milano			Firenze		Palermo		
Sud	292,29			244,13		175,95		
Ovest	353,07			304,65		240,84		
Est	348,20			323,50		235,56		
Nord	303,42			251,50		137,17		

Fabbisogno di energia primaria totale



CASO 3, FACCIATA TRASPARENTE

Software di simulazione termodinamica	Trnsys
Strumento di analisi	Test room virtuale

**DATI DIMENSIONALI**

Dimensioni lorde in pianta	5,00 x 5,00 m.
Altezza	3,00 m
Orientamento parete test	Nord
	Est
	Ovest
	Sud
Dimensione apertura sulla parete analizzata	5,00 x 3,00 m 100% della parete
Sistema di schermatura solare	Assente

LOCALIZZAZIONE

Localizzazione 1	Milano	Zona climatica E	Gradi giorno 2404
Localizzazione 2	Firenze	Zona climatica D	Gradi giorno 1821
Localizzazione 3	Palermo	Zona climatica B	Gradi giorno 796

VENTILAZIONE

Ricambi d'aria per ventilazione naturale	0,6 h ⁻¹
Sistema di ventilazione meccanica	Assente

SISTEMA DI RISCALDAMENTO ATTIVO

Combustibile	Electricità	
Temperatura che determina l'entrata in funzione del sistema di riscaldamento	Minore 21 °C	
Periodo di accensione	Milano	15 ottobre – 15 aprile
	Firenze	1 novembre – 15 aprile
	Palermo	1 dicembre – 31 marzo
Schedules		9:00 – 19:00
		Da lunedì al venerdì esclusi i festivi

CARATTERISTICHE DELL'INVOLUCRO OPACO

Pareti (intonaco 2,00 cm + 8,00 cm isolante termico EPS + Poroton 25,00 cm + intonaco 2,00 cm)	Trasmittanza termica: 0,33 W/mqK
Solaio di copertura (intonaco 2,00 cm + solaio laterocemento 24,00 cm + massetto in c.a. 4,00 cm + barriera al vapore + isolante termico 8,00 cm EPS + impermeabilizzante)	Trasmittanza termica: 0,28 W/mqK
Solaio controterra (piastrelle 2,00 cm + massetto in c.a. 4,00 cm isolante termico 8,00 cm EPS + solaio laterocemento 24,00 cm + intercapedine d'aria 60,00 cm + magrone 10,00 cm)	Trasmittanza termica: 0,28 W/mqK
Facciata continua realizzata con profili in alluminio a taglio termico e vetro-camera basso-emissivo	Trasmittanza termica: Uw:1,20 W/mqK

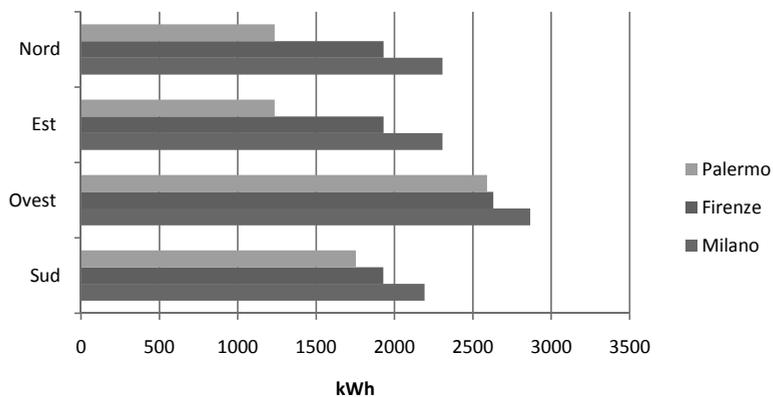
FABBISOGNO ENERGETICO VALUTATO PER IL RISCALDAMENTO ED IL RAFFRESCAMENTO								
	Q _{HEAT}				Q _{COOL}			
	kWh				kWh			
Orientamento	SUD	OVEST	EST	NORD	SUD	OVEST	EST	NORD
MILANO	4236,16	5969,93	5266,03	8415,29	3786,70	4624,43	5224,40	967,28
FIRENZE	2010,35	4239,26	2991,65	5995,17	4640,05	5185,82	7358,30	1607,85
PALERMO	0,00	432,94	198,96	1609,28	5608,35	7957,79	8516,51	2728,58

FABBISOGNO di ENERGIA PRIMARIA TOTALE (kWh)			
	Milano	Firenze	Palermo
Sud	2191,95	1928,67	1752,61
Ovest	2866,55	2629,92	2589,89
Est	2305,92	1929,87	1235,84
Nord	2305,92	1929,87	1235,84

CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA (€)			
	Milano	Firenze	Palermo
Sud	76,72	67,50	61,34
Ovest	100,33	92,05	90,65
Est	101,03	105,41	94,81
Nord	80,71	67,55	43,25

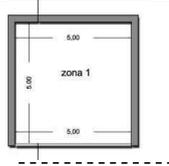
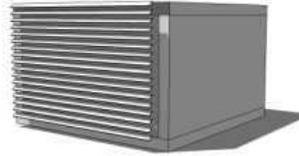
EMISSIONI DI CO2 (kg)			
	Milano	Firenze	Palermo
Sud	328,79	289,30	262,89
Ovest	429,98	394,49	388,48
Est	432,97	451,76	406,32
Nord	345,89	289,48	185,38

Fabbisogno di energia primaria totale



CASO 4, FACCIATA TRASPARENTE con SCHERMATURA FISSA ESTERNA TUTTO L'ANNO

Software di simulazione termodinamica	Trnsys
Strumento di analisi	Test room virtuale

**DATI DIMENSIONALI**

Dimensioni lorde in pianta	5,00 x 5,00 m.
Altezza	3,00 m
Orientamento parete test	Nord
	Est
	Ovest
	Sud
Dimensione apertura sulla parete analizzata	5,00 x 3,00 m 100% della parete
Sistema di schermatura solare	Presente come sistema fisso esterno tutto l'anno

LOCALIZZAZIONE

Localizzazione 1	Milano	Zona climatica E	Gradi giorno 2404
Localizzazione 2	Firenze	Zona climatica D	Gradi giorno 1821
Localizzazione 3	Palermo	Zona climatica B	Gradi giorno 796

VENTILAZIONE

Ricambi d'aria per ventilazione naturale	0,6 h ⁻¹
Sistema di ventilazione meccanica	Assente

SISTEMA DI RISCALDAMENTO ATTIVO

Combustibile	Elettricità	
Temperatura che determina l'entrata in funzione del sistema di riscaldamento	Minore 21 °C	
Periodo di accensione	Milano	15 ottobre – 15 aprile
	Firenze	1 novembre – 15 aprile
	Palermo	1 dicembre – 31 marzo
Schedules		9:00 – 19:00
		Da lunedì al venerdì esclusi i festivi

CARATTERISTICHE DELL'INVOLUCRO OPACO

Pareti (intonaco 2,00 cm + 8,00 cm isolante termico EPS + Poroton 25,00 cm + intonaco 2,00 cm)	Trasmittanza termica: 0,33 W/mqK
Solaio di copertura (intonaco 2,00 cm + solaio laterocemento 24,00 cm + massetto in c.a. 5,00 cm + barriera al vapore + isolante termico 10,00 cm EPS + impermeabilizzante)	Trasmittanza termica: 0,28 W/mqK
Solaio controterra (piastrelle 2,00 cm + massetto in c.a. 4,00 cm isolante termico 8,00 cm EPS + solaio laterocemento 24,00 cm + intercapedine d'aria 60,00 cm + magrone)	Trasmittanza termica: 0,28 W/mqK

10,00 cm)

Finestra con telaio in alluminio a taglio termico e doppio vetro basso emissivo e con pellicola solare g <0,5 Uw:1,24 W/mqK

FABBISOGNO ENERGETICO VALUTATO PER IL RISCALDAMENTO ED IL RAFFRESCAMENTO

Orientamento	Q _{HEAT}				Q _{COOL}			
	kWh				kWh			
	SUD	OVEST	EST	NORD	SUD	OVEST	EST	NORD
MILANO	6642,46	8365,59	8249,08	9357,63	864,76	1085,18	1072,71	85,85
FIRENZE	4300,99	6245,95	5754,34	6920,01	1374,48	1522,33	2114,04	366,92
PALERMO	274,02	1547,20	1490,25	2535,22	2212,54	3221,04	3157,52	1033,14

FABBISOGNO di ENERGIA PRIMARIA TOTALE (kWh)

	Milano	Firenze	Palermo
Sud	1851,78	1453,57	756,66
Ovest	2330,93	1962,86	1374,96
Est	2299,29	2030,72	1341,55
Nord	2254,84	1762,29	926,48

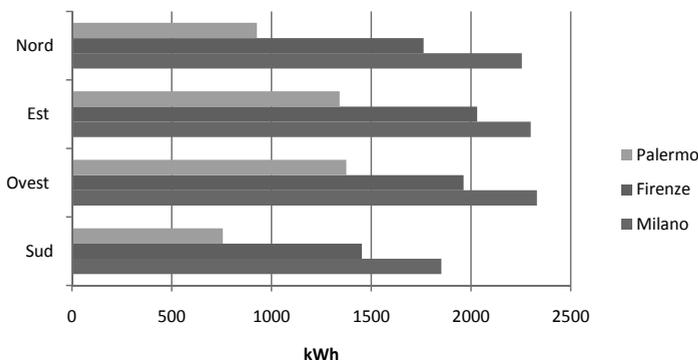
CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA (€)

	Milano	Firenze	Palermo
Sud	64,81	50,87	26,48
Ovest	81,58	68,70	48,12
Est	80,48	71,08	46,95
Nord	78,92	61,68	32,43

EMISSIONI DI CO2 (kg)

	Milano	Firenze	Palermo
Sud	277,76	218,03	113,49
Ovest	349,63	294,42	206,24
Est	344,89	304,60	201,23
Nord	338,23	264,34	138,97

Fabbisogno di energia primaria totale



CASO5, FACCIATA TRASPARENTE con SCHERMATURA MOBILE ESTERNA PRESENTE SOLO NEI MESI ESTIVI

Software di simulazione termodinamica	Trnsys
Strumento di analisi	Test room virtuale


DATI DIMENSIONALI

Dimensioni lorde in pianta	5,00 x 5,00 m.
Altezza	3,00 m
Orientamento parete test	Nord
	Est
	Ovest
	Sud
Dimensione apertura sulla parete analizzata	5,00 x 3,00 m 100% della parete
Sistema di schermatura solare	Presente come sistema mobile esterno

LOCALIZZAZIONE

Localizzazione 1	Milano	Zona climatica E	Gradi giorno 2404
Localizzazione 2	Firenze	Zona climatica D	Gradi giorno 1821
Localizzazione 3	Palermo	Zona climatica B	Gradi giorno 796

VENTILAZIONE

Ricambi d'aria per ventilazione naturale	0,6 h ⁻¹
Sistema di ventilazione meccanica	Assente

SISTEMA DI RISCALDAMENTO ATTIVO

Combustibile	Elettricità	
Temperatura che determina l'entrata in funzione del sistema di riscaldamento	Minore 21 °C	
Periodo di accensione	Milano	15 ottobre – 15 aprile
	Firenze	1 novembre – 15 aprile
	Palermo	1 dicembre – 31 marzo
Schedules		9:00 – 19:00
		Da lunedì al venerdì esclusi i festivi

CARATTERISTICHE DELL'INVOLUCRO OPACO

Pareti (intonaco 2,00 cm + 8,00 cm isolante termico EPS + Poroton 25,00 cm + intonaco 2,00 cm)	Trasmittanza termica: 0,33 W/mqK
Solaio di copertura (intonaco 2,00 cm + solaio laterocemento 24,00 cm + massetto in c.a. 5,00 cm + barriera al vapore + isolante termico 10,00 cm EPS + impermeabilizzante)	Trasmittanza termica: 0,28 W/mqK
Solaio controterra (piastrelle 2,00 cm + massetto in c.a. 4,00 cm isolante termico 8,00 cm EPS + solaio laterocemento 24,00 cm + intercapedine d'aria 60,00 cm + magrone 10,00 cm)	Trasmittanza termica: 0,28 W/mqK
Finestra con telaio in alluminio a taglio termico	Uw:1,24 W/mqK

e doppio vetro basso emissivo e con pellicola solare g <0,5

FABBISOGNO ENERGETICO VALUTATO PER IL RISCALDAMENTO ED IL RAFFRESCAMENTO

Orientamento	Q _{HEAT}				Q _{COOL}			
	kWh				kWh			
	SUD	OVEST	EST	NORD	SUD	OVEST	EST	NORD
MILANO	4242,27	6873,96	6656,44	8460,04	865,09	1085,63	1073,03	85,86
FIRENZE	2010,46	4889,39	4019,74	6011,71	1374,66	1524,62	2119,77	366,97
PALERMO	0,00	511,52	454,96	1609,35	2225,76	3336,91	3237,45	1033,23

FABBISOGNO di ENERGIA PRIMARIA TOTALE (kWh)

	Milano	Firenze	Palermo
Sud	1280,41	908,26	695,55
Ovest	1975,92	1640,58	1164,58
Est	1920,19	1619,51	1120,02
Nord	2041,12	1546,04	706,06

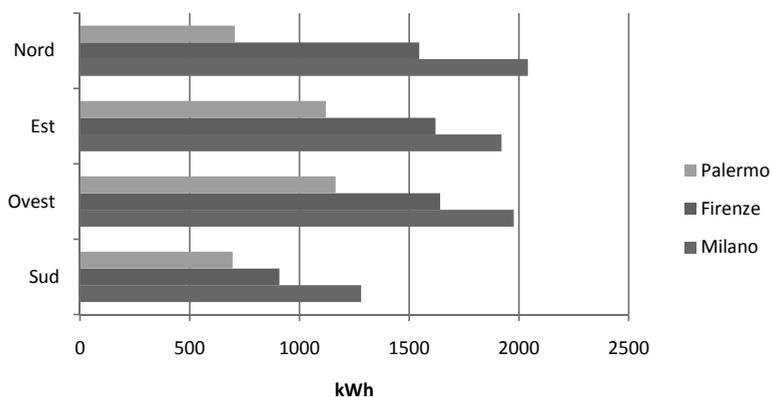
CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA (€)

	Milano	Firenze	Palermo
Sud	44,81	31,79	24,34
Ovest	69,16	57,42	40,76
Est	67,21	56,68	39,20
Nord	71,44	54,11	24,71

EMISSIONI DI CO2 (kg)

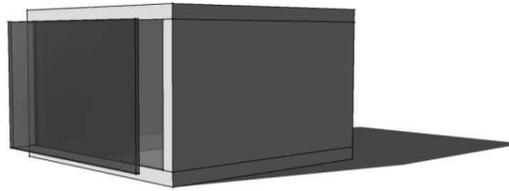
	Milano	Firenze	Palermo
Sud	192,06	136,24	104,33
Ovest	296,39	246,09	174,69
Est	288,03	242,93	168,00
Nord	306,17	231,91	105,91

Fabbisogno di energia primaria totale



CASO 6, FACCIATA TRASPARENTE + PELLE ESTERNA DI VETRO

Software di simulazione termodinamica	Trnsys
Strumento di analisi	Test room virtuale

**DATI DIMENSIONALI**

Dimensioni lorde in pianta	5,00 x 5,00 m.
Altezza	3,00 m
Orientamento parete test	Nord
	Est
	Ovest
	Sud
Dimensione apertura sulla parete analizzata	5,00 x 3,00 m 100% della parete
Sistema di schermatura solare	Assente

LOCALIZZAZIONE

Localizzazione 1	Milano	Zona climatica E	Gradi giorno 2404
Localizzazione 2	Firenze	Zona climatica D	Gradi giorno 1821
Localizzazione 3	Palermo	Zona climatica B	Gradi giorno 796

VENTILAZIONE

Ricambi d'aria per ventilazione naturale	0,6 h ⁻¹
Sistema di ventilazione meccanica	Assente

SISTEMA DI RISCALDAMENTO ATTIVO

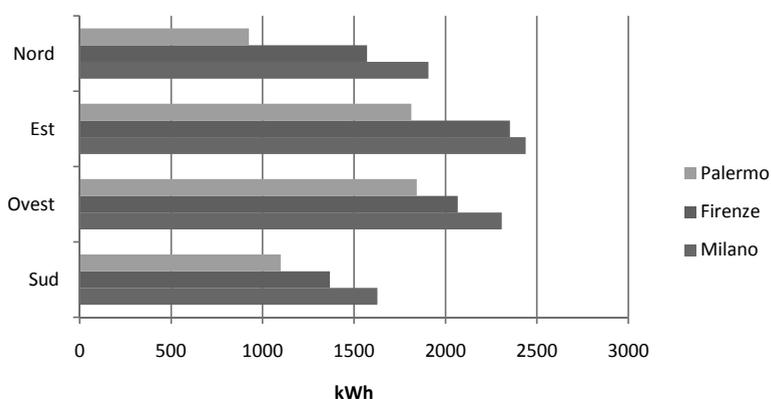
Combustibile	Elettricità	
Temperatura che determina l'entrata in funzione del sistema di riscaldamento	Minore 21 °C	
Periodo di accensione	Milano	15 ottobre – 15 aprile
	Firenze	1 novembre – 15 aprile
	Palermo	1 dicembre – 31 marzo
Schedules	9:00 – 19:00	
	Da lunedì al venerdì esclusi i festivi	

CARATTERISTICHE DELL'INVOLUCRO OPACO

Pareti (intonaco 2,00 cm + 8,00 cm isolante termico EPS + Poroton 25,00 cm + intonaco 2,00 cm)	Trasmittanza termica: 0,33 W/mqK
Solaio di copertura (intonaco 2,00 cm + solaio laterocemento 24,00 cm + massetto in c.a. 4,00 cm + barriera al vapore + isolante termico 8,00 cm EPS + impermeabilizzante)	Trasmittanza termica: 0,28 W/mqK
Solaio Contro terra (piastrelle 2,00 cm + massetto in c.a. 4,00 cm isolante termico 8,00 cm EPS + solaio laterocemento 24,00 cm + intercapedine d'aria 60,00 cm + magrone 10,00 cm)	Trasmittanza termica: 0,28 W/mqK
Pelle interna. Facciata continua realizzata con profili in alluminio a taglio termico e vetro-camera basso-emissivo	Trasmittanza termica: Uw:1,2 W/mqK
Pelle esterna facciata in alluminio con profili FW60+ e vetro visarm 4+4	Trasmittanza termica: Uw:3,36 W/mqK

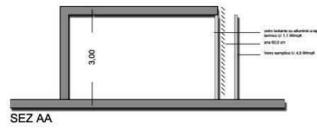
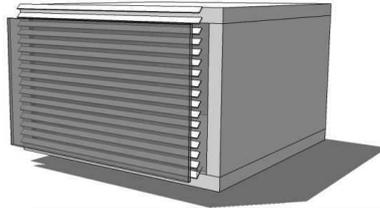
FABBISOGNO ENERGETICO VALUTATO PER IL RISCALDAMENTO ED IL RAFFRESCAMENTO								
Orientamento	Q _{HEAT}				Q _{COOL}			
	kWh				kWh			
	SUD	OVEST	EST		SUD	OVEST	EST	
MILANO	4154,47	6251,55	7130,74	7419,38	2044,40	2620,70	2368,42	450,24
FIRENZE	2216,08	4576,83	4733,41	5389,49	2688,81	3126,09	3921,08	923,93
PALERMO	12,63	664,18	954,79	1613,78	3507,43	5393,42	5077,34	1733,31
FABBISOGNO di ENERGIA PRIMARIA TOTALE (kWh)								
	Milano		Firenze		Palermo			
Sud	1628,04		1367,89		1099,08			
Ovest	2307,43		2066,62		1843,58			
Est	2437,93		2352,34		1814,00			
Nord	1907,22		1571,94		925,89			
CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA (€)								
	Milano		Firenze		Palermo			
Sud	56,98		47,88		38,47			
Ovest	80,76		72,33		64,53			
Est	85,33		82,33		63,49			
Nord	66,75		55,02		32,41			
EMISSIONI DI CO2 (kg)								
	Milano		Firenze		Palermo			
Sud	244,206		205,1835		164,862			
Ovest	346,1145		309,993		276,537			
Est	365,6895		352,851		272,1			
Nord	286,08		235,79		138,88			

Fabbisogno di energia primaria totale



CASO 7, FACCIATA TRASPARENTE + PELLE ESTERNA DI VETRO + SISTEMA DI SCHEMRATURA FISSO

Software di simulazione termodinamica	Trnsys
Strumento di analisi	Test room virtuale


DATI DIMENSIONALI

Dimensioni lorde in pianta	5,00 x 5,00 m.
Altezza	3,00 m
Orientamento parete test	Nord Est Ovest Sud
Dimensione apertura sulla parete analizzata	5,00 x 3,00 m 100% della parete
Sistema di schermatura solare	Presente come sistema fisso

LOCALIZZAZIONE

Localizzazione 1	Milano	Zona climatica E	Gradi giorno 2404
Localizzazione 2	Firenze	Zona climatica D	Gradi giorno 1821
Localizzazione 3	Palermo	Zona climatica B	Gradi giorno 796

VENTILAZIONE

Ricambi d'aria per ventilazione naturale	0,6 h ⁻¹
Sistema di ventilazione meccanica	Assente

SISTEMA DI RISCALDAMENTO ATTIVO

Combustibile	Electricità
Temperatura che determina l'entrata in funzione del sistema di riscaldamento	Minore 21 °C
Periodo di accensione	Milano 15 ottobre – 15 aprile Firenze 1 novembre – 15 aprile Palermo 1 dicembre – 31 marzo
Schedules	9:00 – 19:00 Da lunedì al venerdì esclusi i festivi

CARATTERISTICHE DELL'INVOLUCRO OPACO

Pareti (intonaco 2,00 cm + 8,00 cm isolante termico EPS + Poroton 25,00 cm + intonaco 2,00 cm) Trasmittanza termica: 0,33 W/mqK

Solaio di copertura (intonaco 2,00 cm + solaio laterocemento 24,00 cm + massetto in c.a. 5,00 cm + barriera al vapore + isolante termico 10,00 cm EPS + impermeabilizzante	Trasmittanza termica: 0,28 W/mqK
Solaio controterra (piastrelle 2,00 cm + massetto in c.a. 4,00 cm isolante termico 8,00 cm EPS + solaio laterocemento 24,00 cm + intercapedine d'aria 60,00 cm + magrone 10,00 cm)	Trasmittanza termica: 0,28 W/mqK
Pelle interna. Facciata continua realizzata con profili in alluminio a taglio termico e vetro-camera basso-emissivo	Trasmittanza termica: Uw:1,2 W/mqK
Pelle esterna facciata in alluminio con profili FW60+ e vetro visarm 4+4	Trasmittanza termica: Uw:3,36 W/mqK

FABBISOGNO ENERGETICO VALUTATO PER IL RISCALDAMENTO ED IL RAFFRESCAMENTO

	Q _{HEAT}				Q _{COOL}			
	kWh							
Orientamento	SUD	OVEST	EST	NORD	SUD	OVEST	EST	NORD
MILANO	6130,47	7392,31	7314,63	8088,85	377,34	559,05	523,69	15,91
FIRENZE	4146,44	5565,96	5221,57	6051,86	703,01	882,77	1265,67	158,22
PALERMO	439,53	1548,50	1553,05	2280,86	1417,06	2103,89	2039,78	693,69

FABBISOGNO di ENERGIA PRIMARIA TOTALE (kWh)

	Milano	Firenze	Palermo
Sud	1577,56	1206,94	547,48
Ovest	1934,78	1601,09	1026,16
Est	1905,23	1638,75	1007,20
Nord	1930,89	1490,36	759,84

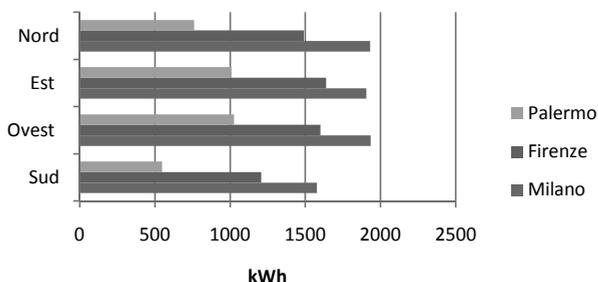
CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA (€)

	Milano	Firenze	Palermo
Sud	55,21	42,24	19,16
Ovest	67,72	56,04	35,92
Est	66,68	57,36	35,25
Nord	67,58	52,16	26,59

EMISSIONI DI CO2 (kg)

	Milano	Firenze	Palermo
Sud	236,634	181,041	82,122
Ovest	290,217	240,1635	153,924
Est	285,7845	245,8125	151,08
Nord	289,63	223,55	113,98

Fabbisogno di energia primaria totale

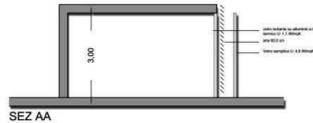
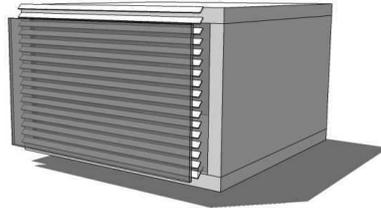


CASO 8, FACCIATA TRASPARENTE + PELLE ESTERNA DI VETRO + SISTEMA DI SCHEMRATURA MOBILE SOLO NEI MESI ESTIVI
Software di simulazione
termodinamica

Trnsys

Strumento di analisi

Test room virtuale


DATI DIMENSIONALI

Dimensioni lorde in pianta 5,00 x 5,00 m.

Altezza 3,00 m

Orientamento parete test
Nord
Est
Ovest
SudDimensione apertura sulla parete
analizzata 5,00 x 3,00 m
100% della parete

Sistema di schermatura solare Presente come sistema MOBILE

LOCALIZZAZIONE

Localizzazione 1 Milano Zona climatica E Gradi giorno 2404

Localizzazione 2 Firenze Zona climatica D Gradi giorno 1821

Localizzazione 3 Palermo Zona climatica B Gradi giorno 796

VENTILAZIONE
Ricambi d'aria per ventilazione
naturale 0,6 h⁻¹

Sistema di ventilazione meccanica Assente

SISTEMA DI RISCALDAMENTO ATTIVO

Combustibile Elettricità

Temperatura che determina l'entrata
in funzione del sistema di
riscaldamento Minore 21 °C

Periodo di accensione Milano 15 ottobre – 15 aprile

Firenze 1 novembre – 15 aprile

Palermo 1 dicembre – 31 marzo

Schedules 9:00 – 19:00

Da lunedì al venerdì esclusi i festivi

CARATTERISTICHE DELL'INVOLUCRO OPACO
Pareti (intonaco 2,00 cm + 8,00 cm isolante
termico EPS + Poroton 25,00 cm + intonaco
2,00 cm) Trasmittanza termica: 0,33 W/mqKSolaio di copertura (intonaco 2,00 cm +
solaio laterocemento 24,00 cm + massetto
in c.a. 5,00 cm + barriera al vapore +
isolante termico 10,00 cm EPS +
impermeabilizzante) Trasmittanza termica: 0,28 W/mqK

Solaio controterra (piastrelle 2,00 cm + massetto in c.a. 4,00 cm isolante termico 8,00 cm EPS + solaio laterocemento 24,00 cm + intercapedine d'aria 60,00 cm + magrone 10,00 cm) Trasmittanza termica: 0,28 W/mqK

Pelle interna. Facciata continua realizzata con profili in alluminio a taglio termico e vetro-camera basso-emissivo Trasmittanza termica: Uw:1,2 W/mqK

Pelle esterna facciata in alluminio con profili FW60+ e vetro visarm 4+4 Trasmittanza termica: Uw:3,36 W/mqK

FABBISOGNO ENERGETICO VALUTATO PER IL RISCALDAMENTO ED IL RAFFRESCAMENTO

	Q _{HEAT}				Q _{COOL}			
	kWh							
Orientamento	SUD	OVEST	EST	NORD	SUD	OVEST	EST	NORD
MILANO	4171,02	6306,97	6135,66	7459,12	377,40	559,52	523,87	15,91
FIRENZE	2216,38	4581,42	3903,94	5409,39	703,44	883,26	1266,44	158,24
PALERMO	12,63	665,10	607,44	1613,97	1417,44	2145,05	2054,02	693,82

FABBISOGNO di ENERGIA PRIMARIA TOTALE (kWh)

	Milano	Firenze	Palermo
Sud	1111,04	747,53	445,96
Ovest	1676,51	1366,83	828,69
Est	1624,58	1325,27	786,51
Nord	1780,95	1337,40	601,10

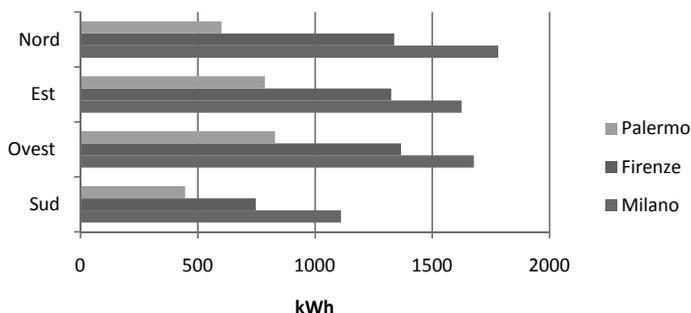
CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA (€)

	Milano	Firenze	Palermo
Sud	38,89	26,16	15,61
Ovest	58,68	47,84	29,00
Est	56,86	46,38	27,53
Nord	62,33	46,81	21,04

EMISSIONI DI CO2 (kg)

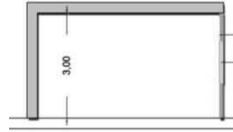
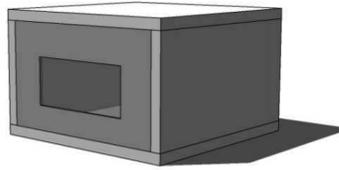
	Milano	Firenze	Palermo
Sud	166,656	112,1295	66,894
Ovest	251,4765	205,0245	124,3035
Est	243,687	198,7905	117,9765
Nord	267,14	200,61	90,16

Fabbisogno di energia primaria totale



CASO 9, FACCIATA CONTINUA IN ALLUMINIO COIBENTATO

Software di simulazione termodinamica	Trnsys
Strumento di analisi	Test room virtuale

**DATI DIMENSIONALI**

Dimensioni lorde in pianta	5,00 x 5,00 m.
Altezza	3,00 m
Orientamento parete test	Nord
	Est
	Ovest
	Sud
Dimensione apertura sulla parete analizzata	3,00 x 1,35 m 30% della parete
Sistema di schermatura solare	Assente

LOCALIZZAZIONE

Localizzazione 1	Milano	Zona climatica E	Gradi giorno 2404
Localizzazione 2	Firenze	Zona climatica D	Gradi giorno 1821
Localizzazione 3	Palermo	Zona climatica B	Gradi giorno 796

VENTILAZIONE

Ricambi d'aria per ventilazione naturale	0,6 h ⁻¹
Sistema di ventilazione meccanica	Assente

SISTEMA DI RISCALDAMENTO ATTIVO

Combustibile	Electricità
Temperatura che determina l'entrata in funzione del sistema di riscaldamento	Minore 21 °C
Periodo di accensione	Milano 15 ottobre – 15 aprile
	Firenze 1 novembre – 15 aprile
	Palermo 1 dicembre – 31 marzo
Schedules	9:00 – 19:00 Da lunedì al venerdì esclusi i festivi

CARATTERISTICHE DELL'INVOLUCRO OPACO

Pareti (intonaco 2,00 cm + 8,00 cm isolante termico EPS + Poroton 25,00 cm + intonaco 2,00 cm)	Trasmittanza termica: 0,33 W/mqK
Solaio di copertura (intonaco 2,00 cm + solaio laterocemento 24,00 cm + massetto in c.a. 5,00 cm + barriera al vapore + isolante termico 10,00 cm EPS + impermeabilizzante)	Trasmittanza termica: 0,28 W/mqK
Solaio controterra (piastrelle 2,00 cm + massetto in c.a. 4,00 cm isolante termico 8,00 cm EPS + solaio laterocemento 24,00 cm + intercapedine d'aria 60,00 cm + magrone 10,00 cm)	Trasmittanza termica: 0,28 W/mqK
Facciata continua realizzata con tamponamento opaco in alluminio e polistirene espanso e infisso in vetro con alluminio e taglio termico	Tamponamento opaco: Uw:0,38 W/mqK Finestra: Uw:1,2 W/mqK

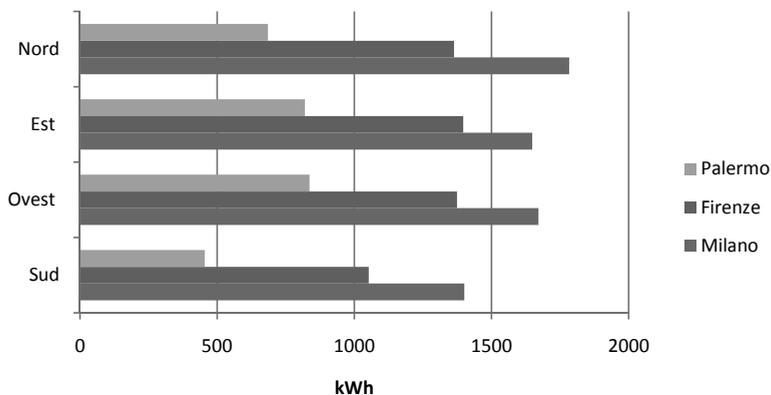
FABBISOGNO ENERGETICO VALUTATO PER IL RISCALDAMENTO ED IL RAFFRESCAMENTO								
	Q _{HEAT}				Q _{COOL}			
	kWh				kWh			
Orientamento	SUD	OVEST	EST	NORD	SUD	OVEST	EST	NORD
MILANO	5818,40	6860,98	6814,46	7487,31	240,84	362,55	317,58	0,00
FIRENZE	4003,39	5186,23	4922,76	5609,53	464,10	647,72	915,25	89,70
PALERMO	514,80	1500,03	1544,64	2146,36	1164,26	1677,27	1581,49	558,14

FABBISOGNO di ENERGIA PRIMARIA TOTALE (kWh)			
	Milano	Firenze	Palermo
Sud	1400,85	1052,30	454,75
Ovest	1671,18	1374,57	836,84
Est	1648,80	1397,33	820,18
Nord	1782,69	1363,63	685,46

CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA (€)			
	Milano	Firenze	Palermo
Sud	49,03	36,83	15,92
Ovest	58,49	48,11	29,29
Est	57,71	48,91	28,71
Nord	62,39	47,73	23,99

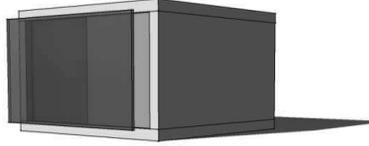
EMISSIONI DI CO2 (kg)			
	Milano	Firenze	Palermo
Sud	210,13	157,85	68,21
Ovest	250,68	206,19	125,53
Est	247,32	209,60	123,03
Nord	267,40	204,54	102,82

Fabbisogno di energia primaria totale



CASO 10, COMPONENTE DI FACCIATA INTELLIGENTE CONFORMAZIONE INVERNALE

Software di simulazione termodinamica	Trnsys
Strumento di analisi	Test room virtuale

**DATI DIMENSIONALI**

Dimensioni lorde in pianta	5,00 x 5,00 m.
Altezza	3,00 m
Orientamento parete test	Nord
	Est
	Ovest
	Sud
Dimensione apertura sulla parete analizzata	2,50 x 3,00 m 50% della parete
Sistema di schermatura solare	Assente

LOCALIZZAZIONE

Localizzazione 1	Milano	Zona climatica E	Gradi giorno 2404
Localizzazione 2	Firenze	Zona climatica D	Gradi giorno 1821
Localizzazione 3	Palermo	Zona climatica B	Gradi giorno 796

VENTILAZIONE

Ricambi d'aria per ventilazione naturale	0,6 h ⁻¹
Sistema di ventilazione meccanica	Assente

SISTEMA DI RISCALDAMENTO ATTIVO

Combustibile	Elettricità	
Temperatura che determina l'entrata in funzione del sistema di riscaldamento	Minore 21 °C	
Periodo di accensione	Milano	15 ottobre – 15 aprile
	Firenze	1 novembre – 15 aprile
	Palermo	1 dicembre – 31 marzo
Schedules		9:00 – 19:00
		Da lunedì al venerdì esclusi i festivi

CARATTERISTICHE DELL'INVOLUCRO OPACO

Pareti (intonaco 2,00 cm + 8,00 cm isolante termico EPS + Poroton 25,00 cm + intonaco 2,00 cm)	Trasmittanza termica: 0,33 W/mqK
Solaio di copertura (intonaco 2,00 cm + solaio laterocemento 24,00 cm + massetto in c.a. 5,00 cm + barriera al vapore + isolante termico 10,00 cm EPS + impermeabilizzante)	Trasmittanza termica: 0,28 W/mqK
Solaio controterra (piastrelle 2,00 cm + massetto in c.a. 4,00 cm isolante termico 8,00 cm EPS + solaio laterocemento 24,00 cm + intercapedine d'aria 60,00 cm + magrone 10,00 cm)	Trasmittanza termica: 0,28 W/mqK
Facciata continua realizzata con tamponamento opaco in alluminio e polistirene espanso	Tamponamento opaco: Uw:0,43 W/mqK
Pelle interna. Facciata continua realizzata con profili in alluminio a taglio termico e vetro-camera basso-emissivo	Trasmittanza termica: Uw:1,2 W/mqK

Pelle esterna facciata in alluminio con profili FW60+ e vetro visarm 4+4 Trasmittanza termica: Uw:3,36 W/mqK

FABBISOGNO ENERGETICO VALUTATO PER IL RISCALDAMENTO ED IL RAFFRESCAMENTO

Orientamento	Q _{HEAT}				Q _{COOL}			
	kWh				kWh			
	SUD	OVEST	EST	NORD	SUD	OVEST	EST	NORD
MILANO	5460,94	6552,45	6476,16	7246,00	1022,03	1287,72	1254,69	226,66
FIRENZE	3716,63	4952,50	4611,02	5398,41	1337,73	1540,09	2047,67	456,50
PALERMO	1055,99	1418,03	1405,68	1958,42	1818,49	2757,48	2669,14	916,39

FABBISOGNO di ENERGIA PRIMARIA TOTALE (kWh)

	Milano	Firenze	Palermo
Sud	1619,61	1302,95	819,70
Ovest	1619,61	1302,95	819,70
Est	1934,03	1737,76	1168,79
Nord	1796,07	1427,99	752,66

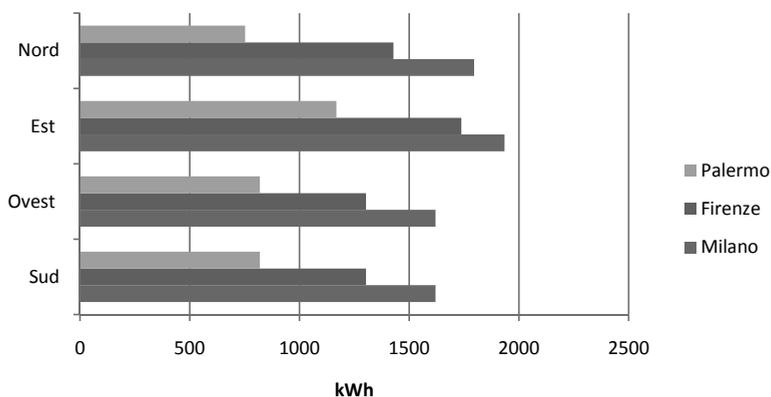
CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA (€)

	Milano	Firenze	Palermo
Sud	56,69	45,60	28,69
Ovest	56,69	45,60	28,69
Est	67,69	60,82	40,91
Nord	62,86	49,98	26,34

EMISSIONI DI CO2 (kg)

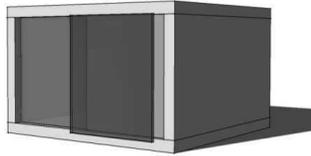
	Milano	Firenze	Palermo
Sud	242,94	195,44	122,96
Ovest	242,94	195,44	122,96
Est	290,10	260,66	175,32
Nord	269,41	214,20	112,90

Fabbisogno di energia primaria totale



CASO 11, COMPONENTE DI FACCIATA INTELLIGENTE CONFORMAZIONE ESTIVA

Software di simulazione termodinamica	Trnsys
Strumento di analisi	Test room virtuale

**DATI DIMENSIONALI**

Dimensioni lorde in pianta	5,00 x 5,00 m.
Altezza	3,00 m
Orientamento parete test	Nord
	Est
	Ovest
	Sud
Dimensione apertura sulla parete analizzata	2,50 x 3,00 m 50% della parete
Sistema di schermatura solare	Assente

LOCALIZZAZIONE

Localizzazione 1	Milano	Zona climatica E	Gradi giorno 2404
Localizzazione 2	Firenze	Zona climatica D	Gradi giorno 1821
Localizzazione 3	Palermo	Zona climatica B	Gradi giorno 796

VENTILAZIONE

Ricambi d'aria per ventilazione naturale	0,6 h ⁻¹
Sistema di ventilazione meccanica	Assente

SISTEMA DI RISCALDAMENTO ATTIVO

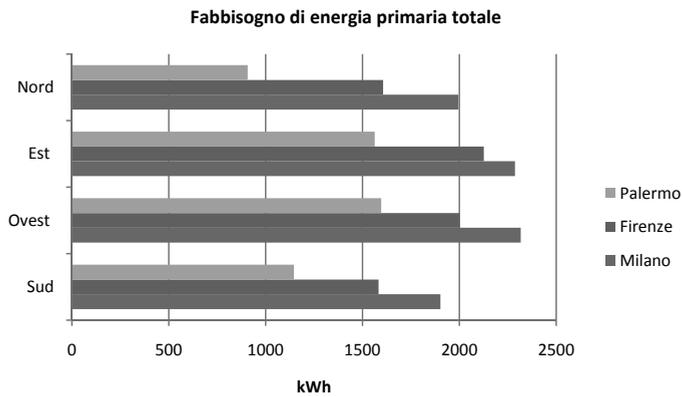
Combustibile	Elettricità	
Temperatura che determina l'entrata in funzione del sistema di riscaldamento	Minore 21 °C	
Periodo di accensione	Milano	15 ottobre – 15 aprile
	Firenze	1 novembre – 15 aprile
	Palermo	1 dicembre – 31 marzo
Schedules		9:00 – 19:00
		Da lunedì al venerdì esclusi i festivi

CARATTERISTICHE DELL'INVOLUCRO OPACO

Pareti (intonaco 2,00 cm + 8,00 cm isolante termico EPS + Poroton 25,00 cm + intonaco 2,00 cm)	Trasmittanza termica: 0,33 W/mqK
Solaio di copertura (intonaco 2,00 cm + solaio laterocemento 24,00 cm + massetto in c.a. 5,00 cm + barriera al vapore + isolante termico 10,00 cm EPS + impermeabilizzante)	Trasmittanza termica: 0,28 W/mqK
Solaio controterra (piastrelle 2,00 cm + massetto in c.a. 4,00 cm isolante termico 8,00 cm EPS + solaio laterocemento 24,00 cm + intercapedine d'aria 60,00 cm + magrone 10,00 cm)	Trasmittanza termica: 0,28 W/mqK
Facciata continua realizzata con tamponamento opaco in alluminio e polistirene espanso	Tamponamento opaco: Uw:0,38 W/mqK
Facciata continua realizzata con profili in alluminio a taglio termico e vetro-camera basso-emissivo	Uw:1,2 W/mqK

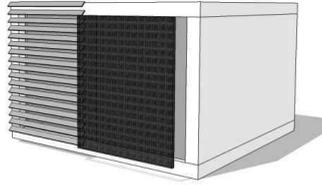
FABBISOGNO ENERGETICO VALUTATO PER IL RISCALDAMENTO ED IL RAFFRESCAMENTO

Orientamento	Q _{HEAT}				Q _{COOL}			
	kWh				kWh			
	SUD	OVEST	EST	NORD	SUD	OVEST	EST	NORD
MILANO	5503,10	6840,09	6742,80	7743,73	1892,92	2204,09	2180,63	484,59
FIRENZE	3614,84	5105,12	4667,49	5700,68	2312,41	2513,60	3248,59	798,28
PALERMO	1050,06	1337,65	1322,77	1956,20	2868,47	4090,96	3992,27	1413,60
FABBISOGNO di ENERGIA PRIMARIA TOTALE (kWh)								
	Milano			Firenze			Palermo	
Sud	1901,80			1583,30			1146,41	
Ovest	2317,37			2001,00			1596,91	
Est	2286,88			2126,49			1562,53	
Nord	1995,18			1606,77			907,51	
CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA (€)								
	Milano			Firenze			Palermo	
Sud	66,56			55,42			40,12	
Ovest	81,11			70,04			55,89	
Est	80,04			74,43			54,69	
Nord	69,83			56,24			31,76	
EMISSIONI DI CO2 (kg)								
	Milano			Firenze			Palermo	
Sud	825,465			1026,014			1011,42	
Ovest	542,226			765,768			700,1235	
Est	157,509			200,6475			198,4155	
Nord	299,28			241,01			136,13	



CASO 12, COMPONENTE DI FACCIATA INTELLIGENTE CONFORMAZIONE ESTIVA CON SCHERMATURA

Software di simulazione termodinamica	Trnsys
Strumento di analisi	Test room virtuale


DATI DIMENSIONALI

Dimensioni lorde in pianta	5,00 x 5,00 m.
Altezza	3,00 m
Orientamento parete test	Nord Est Ovest Sud
Dimensione apertura sulla parete analizzata	2,50 x 3,00 m 50% della parete
Sistema di schermatura solare	Presente esterno al componente trasparente

LOCALIZZAZIONE

Localizzazione 1	Milano	Zona climatica E	Gradi giorno 2404
Localizzazione 2	Firenze	Zona climatica D	Gradi giorno 1821
Localizzazione 3	Palermo	Zona climatica B	Gradi giorno 796

VENTILAZIONE

Ricambi d'aria per ventilazione naturale	0,6 h ⁻¹
Sistema di ventilazione meccanica	Assente

SISTEMA DI RISCALDAMENTO ATTIVO

Combustibile	Electricità
Temperatura che determina l'entrata in funzione del sistema di riscaldamento	Minore 21 °C
Periodo di accensione	Milano 15 ottobre – 15 aprile Firenze 1 novembre – 15 aprile Palermo 1 dicembre – 31 marzo
Schedules	9:00 – 19:00 Da lunedì al venerdì esclusi i festivi

CARATTERISTICHE DELL'INVOLUCRO OPACO

Pareti (intonaco 2,00 cm + 8,00 cm isolante termico EPS + Poroton 25,00 cm + intonaco 2,00 cm)	Trasmittanza termica: 0,33 W/mqK
Solaio di copertura (intonaco 2,00 cm + solaio laterocemento 24,00 cm + massetto in c.a. 5,00 cm + barriera al vapore + isolante termico 10,00 cm EPS + impermeabilizzante)	Trasmittanza termica: 0,28 W/mqK
Solaio controterra (piastrelle 2,00 cm + massetto in c.a. 4,00 cm isolante termico 8,00 cm EPS + solaio laterocemento 24,00 cm + intercapedine d'aria 60,00 cm + magrone 10,00 cm)	Trasmittanza termica: 0,28 W/mqK
Facciata continua realizzata con tamponamento	Tamponamento opaco: Uw:0,43 W/mqK

opaco in alluminio e polistirene espanso

Facciata continua realizzata con profili in alluminio Uw:1,2 W/mqK
a taglio termico e vetro-camera basso-emissivo

FABBISOGNO ENERGETICO VALUTATO PER IL RISCALDAMENTO ED IL RAFFRESCAMENTO

	Q _{HEAT}				Q _{COOL}			
	kWh				kWh			
Orientamento	SUD	OVEST	EST	NORD	SUD	OVEST	EST	NORD
MILANO	5336,66	6951,59	6903,99	7766,60	422,89	506,30	453,99	43,38
FIRENZE	3614,61	5106,11	4668,05	5708,96	682,12	749,16	1047,39	179,84
PALERMO	1050,05	1337,61	1322,77	1956,26	1177,31	1736,90	1676,28	566,29

FABBISOGNO di ENERGIA PRIMARIA TOTALE (kWh)

	Milano	Firenze	Palermo
Sud	1402,79	1868,30	2011,71
Ovest	1813,36	1449,85	857,72
Est	1785,68	1438,75	838,78
Nord	1862,75	1415,48	642,74

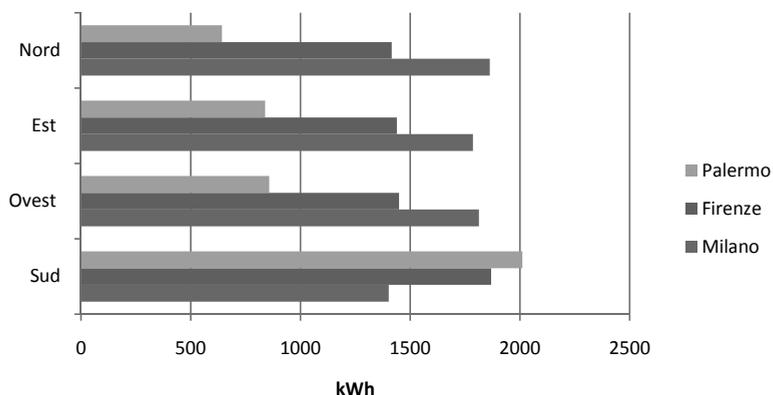
CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA (€)

	Milano	Firenze	Palermo
Sud	49,10	65,39	70,41
Ovest	63,47	50,74	30,02
Est	62,50	50,36	29,36
	65,20	49,54	22,50

EMISSIONI DI CO2 (kg)

	Milano	Firenze	Palermo
Sud	210,42	280,25	301,76
Ovest	272,00	217,48	128,66
Est	267,85	215,81	125,82
Nord	279,41	212,32	96,41

Fabbisogno di energia primaria totale



6.6.2 Valutazione dei risultati e individuazione delle criticità

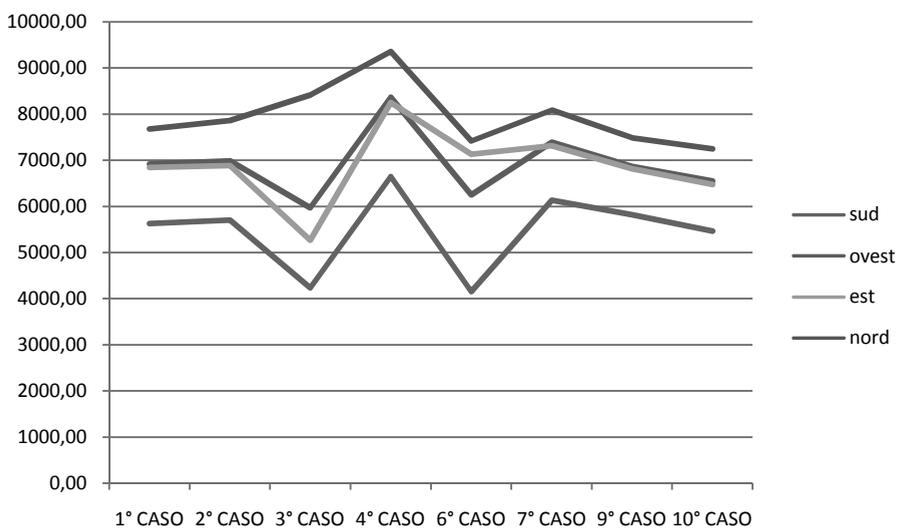
Le simulazioni condotte sui dodici tipi di involucro verticale scelti per analizzare le prestazioni del componente di facciata dinamica hanno dimostrato che:

1. Per l'area geografica di Milano, caratterizzata da inverni freddi ed estati calde

- Le tipologie di tamponamento che garantiscono risultati migliori in termini di isolamento termico nei mesi invernali sono quelle nelle quali è presente una grande superficie vetrata che incrementa l'effetto serra e determina una riduzione del fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento (caso 3 e caso 6), mentre si hanno consumi maggiori in relazione alla riduzione della superficie finestrata e delle prestazioni della componente opaca, con un fabbisogno che può andare da più di 6500 a 9200 kWh nel caso involucro vetrato a cui si sovrappone un sistema di schermatura fisso a lamelle (caso 4), che riduce i benefici della radiazione solare diretta peggiorando l'illuminamento degli spazi. Chiaramente i consumi sono influenzati dall'orientamento della facciata, riducendosi proporzionalmente per facciate orientate a sud.

L'involucro dinamico sperimentale nella sua configurazione invernale (caso 11) garantisce buone prestazioni, in particolare se orientato a sud, in quei casi, quindi, dove la presenza di una partizione vetrata a tutta superficie e di un intercapedine d'aria contribuiscono a ridurre le dispersioni verso l'esterno beneficiando dei contributi solari passivi. Se orientato a nord garantisce prestazioni maggiorate rispetto ai sistemi di facciata continua trasparente e doppia pelle in vetro, grazie alla presenza della partitura opaca.

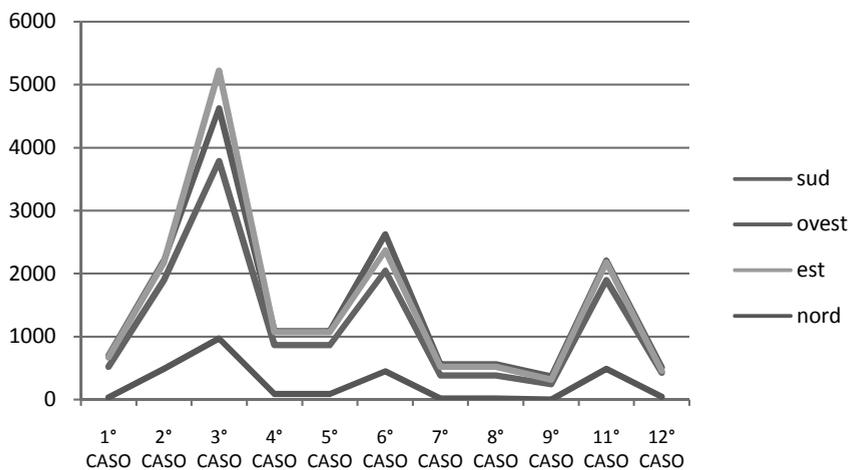
- Le soluzioni che garantiscono una riduzione del fabbisogno di energia primaria per il raffrescamento sono quelle caratterizzate da un sistema di schermatura esterno o da una ridotta superficie trasparente (caso 1, caso 4, caso 5, caso 7, caso 8, caso 9, caso 12). L'involucro dinamico sperimentale, nella sua configurazione estiva con pannello schermante posto dinanzi la componente trasparente (caso 12), garantisce buone prestazioni con un fabbisogno di energia primaria massimo di 500 kWh.



Tab. 6.4. Milano. Consumi di energia primaria per il riscaldamento (kWh)

Nella soluzione senza schermatura esterna si evince comunque una riduzione del fabbisogno energetico rispetto ai casi di facciata continua trasparente e doppia pelle non schermate (caso 3, caso 6).

2. Per l'area geografica di Firenze, caratterizzata da inverni freddi ed estati calde
 - L'analisi dei dati conferma il contributo dato in termini di riduzione del fabbisogno energetico da grandi superfici trasparenti; i risultati migliori si hanno infatti in corrispondenza del caso 3 e del caso 7 con orientamento a sud. L'involucro dinamico sperimentale nella sua configurazione invernale (caso 10) garantisce buone prestazioni per tutti gli orientamenti, con un fabbisogno che si attesta tra i 3715 kWh e i 5398 kWh, inferiore a quello di una muratura tradizionale (caso 1) o assemblata a secco con finestra (caso 10). Anche a Firenze Le soluzioni che



Tab. 6.5. Milano. Consumi di energia primaria per il raffrescamento (kWh)

garantiscono una riduzione del fabbisogno di energia primaria per il raffrescamento sono quelle caratterizzate da un sistema di schermatura esterno o da una ridotta superficie trasparente (caso 1, caso 7, caso 8, caso 9, caso 13).

L'involucro dinamico sperimentale, nella sua configurazione estiva, garantisce buone prestazioni, in particolare nella configurazione con pannello schermante posto dinanzi la componente trasparente. Nella soluzione senza schermatura esterna si evince comunque una riduzione del fabbisogno energetico rispetto ai casi di facciata continua trasparente (caso 3) e doppia pelle (caso 6) non schermate.

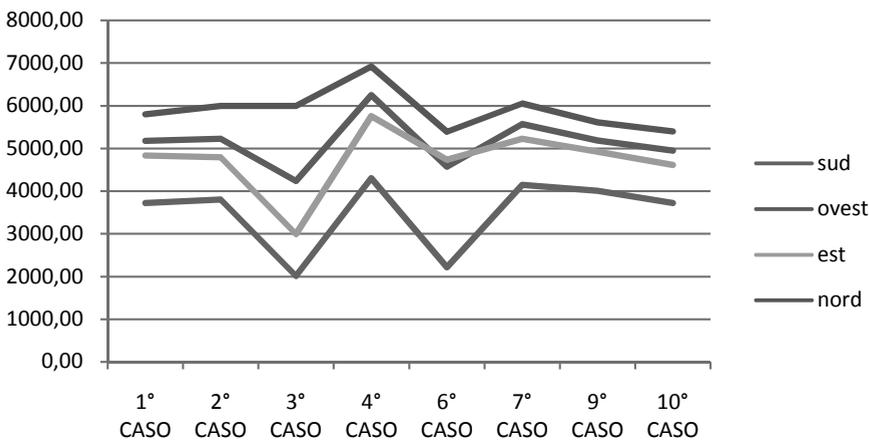
3. Per l'area geografica di Palermo, caratterizzata da inverni miti ed estati calde
 - Si registra per tutti i casi la riduzione del fabbisogno di energia primaria da consumi di 8000/9000 kWh di Milano e Firenze a 2500 kWh. È interessante notare che ambienti orientati a sud e confinati con facciate continue trasparenti o doppia pelle non necessitano di riscaldamento grazie all'effetto passivo determinato dalla presenza delle grandi superfici vetrate. Per orientamenti a nord i consumi energetici maggiori si rilevano nel caso di facciata continua in vetro (caso 4) e doppia pelle trasparente (caso 7) con schermatura fissa esterna.

L'involucro dinamico sperimentale nella sua configurazione invernale (caso 11) garantisce buone prestazioni se orientato a est, ovest e nord, rispetto alla soluzione in muratura con la stessa conformazione geometrica (caso 2) e da una parete assemblata a secco costituita da alluminio e isolante termico (caso 10), oltre che

naturalmente alle soluzioni con sistemi schermanti fissi esterni (caso 4, caso 7, caso 9, caso 10). Si rileva invece un incremento del fabbisogno energetico nel caso con orientamento a sud, rispetto ai casi 3 e 6, dovuto probabilmente: alla riduzione del contributo dato dall'irraggiamento diretto e diffuso a causa della riduzione della superficie finestrata; alla riduzione della temperatura superficiale della componente opaca e trasparente.

- L'involucro dinamico sperimentale, nella sua configurazione estiva, con pannello schermante posto dinanzi al componente trasparente (caso 12) garantisce ottime prestazioni in termini di riduzione del carico energetico. Nella soluzione senza schermatura esterna si evince comunque una riduzione del fabbisogno energetico rispetto ai casi di facciata continua trasparente (caso 3) e doppia pelle (caso 6) non schermate. È interessante notare come per la soluzione con schermatura (caso 12) la prestazione energetica raggiunta sia assimilabile a quella di una facciata tradizionale in muratura con finestra (caso 1), pur presentando una superficie trasparente di dimensioni maggiori.

Il componente di facciata dinamica garantisce buone prestazioni, paragonabili a quelle di facciate continue in muratura o assemblate a secco, in termini di isolamento termico nei mesi invernali; confrontato a sistemi di facciata continua o doppia pelle trasparente, pur causando un incremento del fabbisogno di energia primaria nei mesi



Tab. 6.6. Firenze. Consumi di energia primaria per il riscaldamento (kWh)

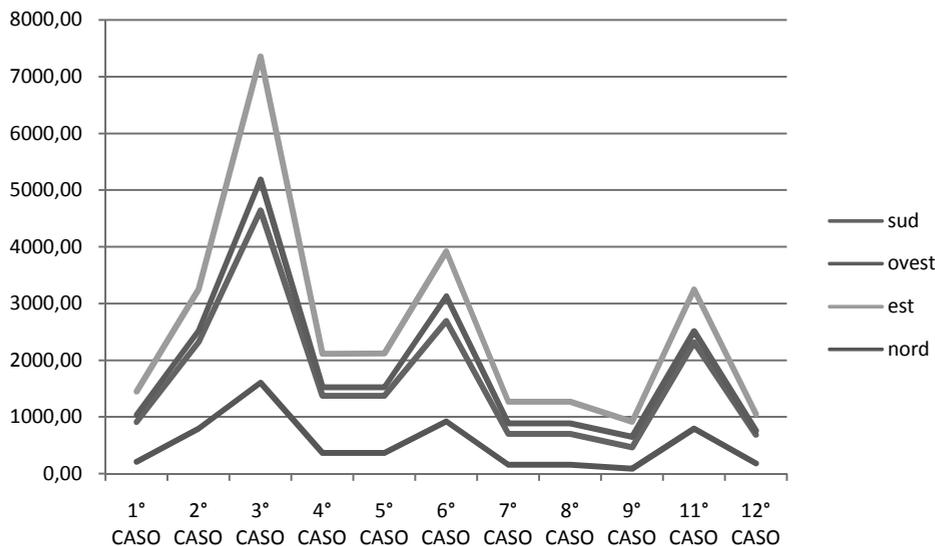
più freddi, permette di ridurre i consumi legati al raffrescamento nei mesi estivi, grazie al contributo del pannello mobile con schermatura che garantisce l'ombreggiamento della pelle trasparente ed evita fenomeni di surriscaldamento.

Il fabbisogno di energia primaria varia in relazione all'orientamento della facciata; dalle simulazioni condotte si evince che:

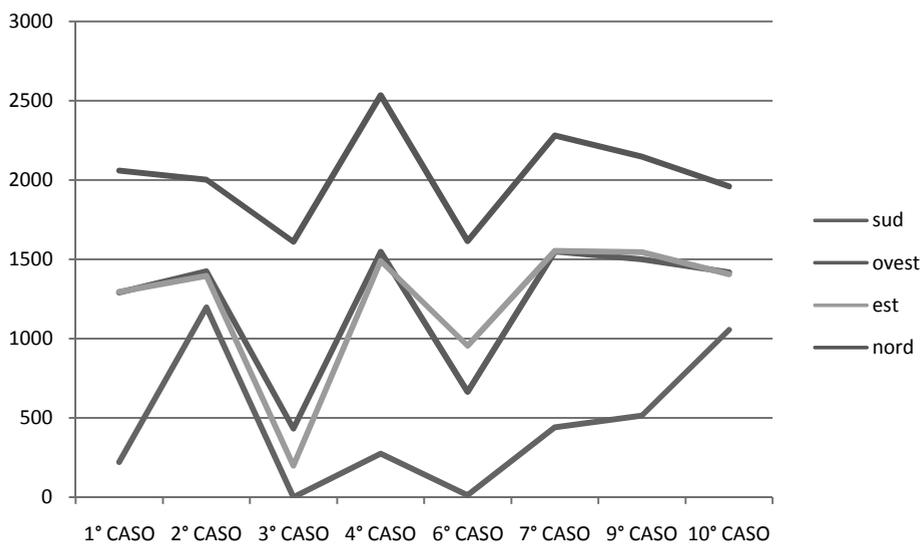
- Se si vuole incrementare il contributo degli apporti solari passivi per ridurre i consumi per il riscaldamento sarà preferibile orientare il modulo di facciata verso sud;
- Se si vuole ridurre il carico termico sull'involucro, favorendo la riduzione dei consumi per il condizionamento estivo, sarà opportuno orientare il modulo di facciata verso sud o verso nord.

- L'orientamento più favorevole durante tutto l'arco dell'anno risulta essere quello a sud, con riduzione del 40% del fabbisogno di energia primaria, rispetto ad orientamenti ad est ed ovest, a Firenze e Palermo.

E' interessante ricordare che nelle simulazioni non è stato possibile valutare il beneficio, in termini di prestazione termo igrometrica nei mesi invernali, dato dalla presenza del pannello fotovoltaico nella parte opaca, il pannello infatti oltre a produrre energia elettrica, provoca un aumento della temperatura dell'aria nell'intercapedine, aria che potrebbe essere recuperata all'interno dell'ambiente e che comunque contribuisce a ridurre le dispersioni termiche nei mesi invernali.



Tab. 6.7. Firenze. Consumi di energia primaria per il raffrescamento (kWh)

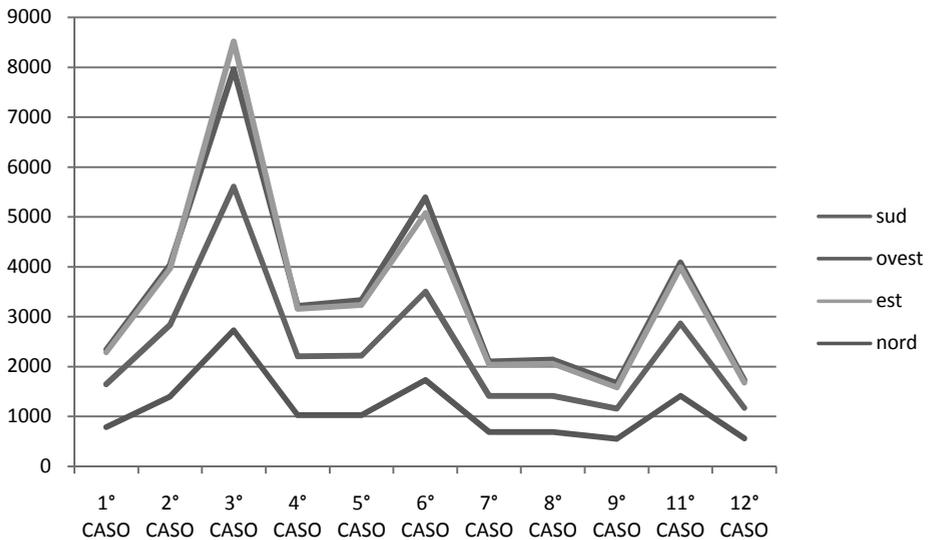


Tab. 6.8. Palermo. Consumi di energia primaria per il riscaldamento (kWh)

Rispetto alla possibilità di incrementare le prestazioni termo igrometriche del componente di facciata dinamico, potrebbe essere interessante in futuro prevedere :

- l'applicazione sulla componente opaca fissa e sul pannello scorrevole (in cui nell'ipotesi sviluppata prevediamo l'alloggiamento di un vetro stratificato 4+4), di materiali isolanti tralucenti (TIM), o di materiali a cambiamento di fase (PCM) che incrementano la trasmittanza termica del pacchetto e non incidono sul contributo solare passivo nei mesi invernali.

Nella tabella di seguito riassumiamo in termini di giudizio qualitativo i risultati raggiunti per ognuno dei casi analizzati, indicando alcune soluzioni per migliorarne le performance energetiche. Si tratta di semplici indicazioni preliminari che contribuirebbero a ridurre il fabbisogno di energia primaria per ognuno dei casi analizzati.



Tab. 6.9. Palermo. Consumi di energia primaria per il raffrescamento (kWh)

6.7 Analisi del comfort visivo, con valutazione dell'illuminamento sul piano di lavoro secondo il modello predeterminato

Per verificare il comfort visivo dell'ambiente in cui è installato il componente dinamico di facciata abbiamo effettuato delle simulazioni finalizzate alla valutazione dell'illuminamento sul piano di lavoro dello spazio confinato, analizzando le prestazioni che si raggiungono con nove configurazioni diverse di facciata in tre località geografiche diverse d'Italia ed individuando conseguentemente le strategie correttive necessarie per migliorare il comfort visivo in quei casi in cui il fattore di illuminamento risultava insufficiente.

Le simulazioni sono state condotte con il software Relux⁷, verificando i valori di illuminamento e la distribuzione della luce. Valori di illuminamento di 500 lux sul piano di lavoro sono stati considerati soddisfacenti, così come previsto per gli spazi destinati ad uffici dalla norma UNI EN 12464-1:2004, negli altri casi sono state individuate delle strategie correttive d'intervento.

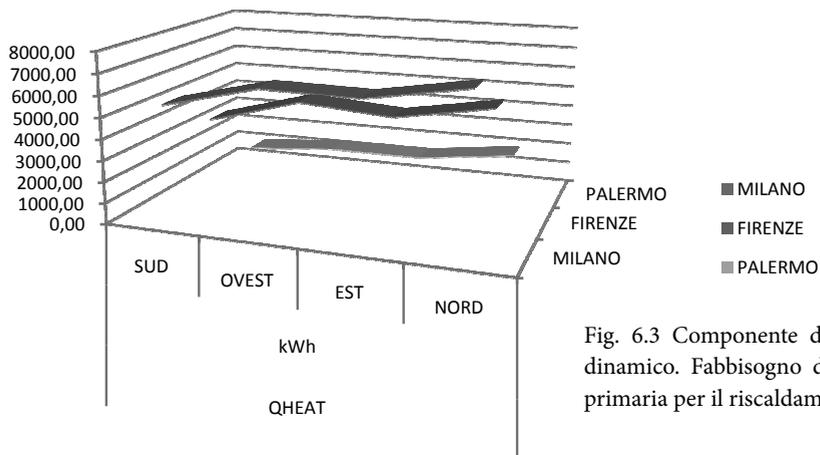


Fig. 6.3 Componente di facciata dinamica. Fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento

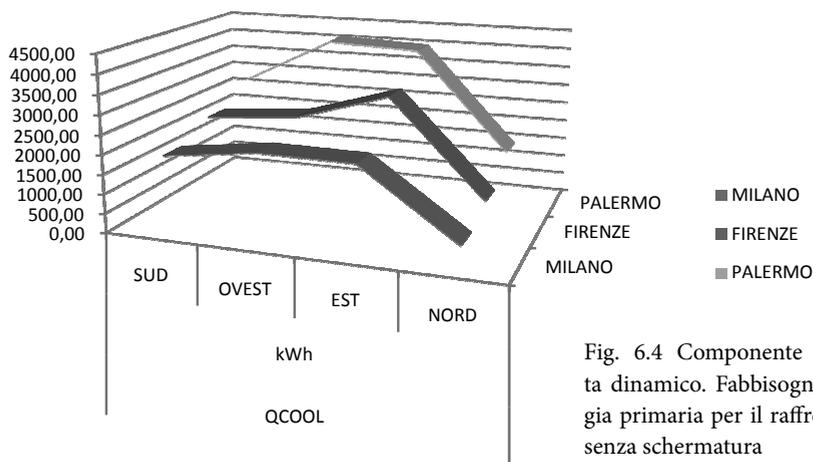


Fig. 6.4 Componente di facciata dinamica. Fabbisogno di energia primaria per il raffrescamento senza schermatura

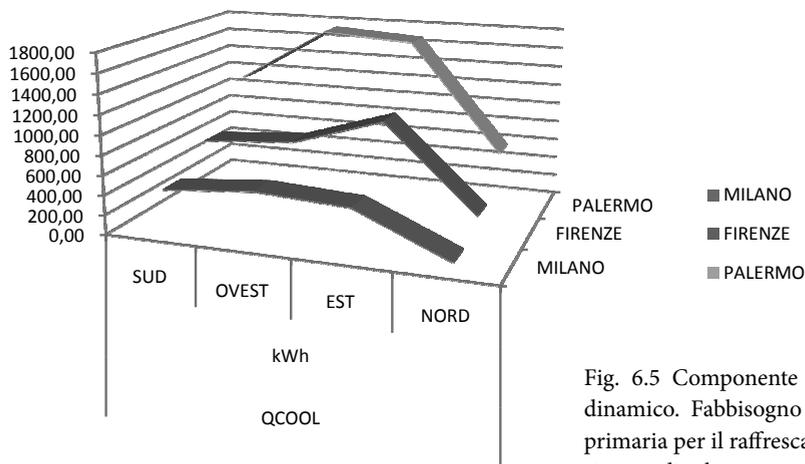


Fig. 6.5 Componente di facciata dinamica. Fabbisogno di energia primaria per il raffrescamento con sistema di schermatura

L'ambiente scelto per le simulazioni e la stessa test room virtuale che abbiamo analizzato in occasione delle simulazioni energetiche, di dimensioni 5,00 x 5,00 m collocata a Milano, Firenze e Palermo.

Le simulazioni sono state condotte nella condizione di cielo coperto così come indicato dalla normativa tecnica di riferimento, abbiamo valutato la prestazione delle facciate monostrato trasparente, doppia pelle e a schermo avanzato con o senza schermatura, con l'obiettivo di valutare come questo elemento, fondamentale per il comfort termico nei mesi estivi, incida sull'illuminazione dello spazio interno. Il sistema di schermatura considerato è costituito da lamelle orizzontali di alluminio di larghezza corrispondente all'apertura trasparente (5,00 m nel caso di facciata continua a tutta superficie e 1,30 m nel caso del componente dinamico di facciata), profondità pari a 10,00 cm e spessore di 2,00 mm.

6.7.1 Valutazione dei risultati e individuazione delle criticità

Dalle simulazioni condotte è emerso che:

- L'apertura di 3,00 x 1,35 m ($4,05 \text{ m}^2 > 3,125 \text{ m}^2 = 1/8$ sup illuminata), pur soddisfacendo il parametro dimensionale indicato dall' art. 5 del D. M. 5 luglio 1975, "Modificazioni alle istruzioni ministeriali 20 giugno 1896 relativamente all'altezza minima ed ai requisiti igienico-sanitari principali dei locali di abitazione" (che indica come standard di riferimento per definire il minimo di superficie illuminante il rapporto di un ottavo tra superficie illuminante e superficie da illuminare) non soddisfa il requisito di avere un illuminamento medio sul piano di lavoro di 500 lux (si passa dai 240 lux di Palermo ai 197 lux di Milano). La

Caso	Giudizio	Note	
Caso 1	Riscaldamento	+	Aumentare l'isolamento termico della muratura per incrementarne la trasmittanza termica
	Raffrescamento	++	Prevedere un sistema di schermatura esterno per la superficie trasparente
Caso 2	Riscaldamento	+	Aumentare l'isolamento termico della partizione in muratura per incrementarne la trasmittanza termica
	Raffrescamento	-	Prevedere un sistema di schermatura esterno per la superficie trasparente
Caso 3	Riscaldamento	++	La superficie trasparente contribuisce ad incrementare l'effetto serra con una conseguente riduzione dei consumi per il riscaldamento
	Raffrescamento	--	Prevedere un sistema di schermatura esterno per la superficie trasparente
Caso 4	Riscaldamento	--	La presenza di una superficie schermante esterna fissa incide sulla riduzione del guadagno termico passivo. E' opportuno prevedere un sistema di schermatura mobile che permetta la variabilità delle configurazioni nelle varie stagioni dell'anno
	Raffrescamento	+	Per ridurre la temperatura dell'ambiente interno dovrebbero essere scelti materiali porosi e non riflettenti che non contribuiscano negativamente all'incremento della temperatura.
Caso 5	Riscaldamento	++	Vedi Caso 3

	Raffrescamento	+	Per ridurre la temperatura dell'ambiente interno dovrebbero essere scelti materiali porosi e non riflettenti che non contribuiscano negativamente all'incremento della temperatura.
Caso 6	Riscaldamento	++	La superficie trasparente contribuisce ad incrementare l'effetto serra con una conseguente riduzione dei consumi per il riscaldamento
	Raffrescamento	--	Prevedere un sistema di schermatura esterno per la superficie trasparente
Caso 7	Riscaldamento	-	La presenza di una superficie schermante esterna fissa incide sulla riduzione del guadagno termico passivo. E' opportuno prevedere un sistema di schermatura mobile che permetta la variabilità delle configurazioni nelle varie stagioni dell'anno
	Raffrescamento	+	La presenza della schermatura evita il surriscaldamento della pelle interna con un conseguente vantaggio in termini di fabbisogno energetico per il raffrescamento estivo
Caso 8	Riscaldamento	++	Vedi caso 6
	Raffrescamento	+	La presenza della schermatura evita il surriscaldamento della pelle interna con un conseguente vantaggio in termini di fabbisogno energetico per il raffrescamento estivo, il sistema in elementi di alluminio potrebbe essere sostituito con un sistema in elementi realizzati con materiale poroso e con un basso coefficiente di riflessione
Caso 9	Riscaldamento	+	Aumentare l'isolamento termico all'interno della componente assembla a secco per incrementarne la trasmittanza termica
	Raffrescamento	++	Prevedere un sistema di schermatura esterno per la superficie trasparente ed una finitura superficiale diversa dall'alluminio per ridurre le temperature superficiali della facciata
Caso 10	Riscaldamento	++	La presenza della doppia pelle garantisce una riduzione delle dispersioni termiche e un incremento dei guadagni solari passivi per orientamenti adeguati
	Raffrescamento		Vedi caso 13
Legenda: (--) cattivo; (-) sufficiente; (+) buono; (++) molto buono			

situazione peggiora ulteriormente se l'apertura è collocata in corrispondenza di una facciata continua che costituisce il layer interno di una doppia pelle, in questo caso il fattore di illuminamento medio scende al di sotto dei 200 lux, obbligando l'utente a ricorrere all'illuminazione artificiale (si passa dai 240 lux di Palermo ai 197 lux di Milano).

- La facciata trasparente, di dimensioni coincidenti con quelli della facciata 5,00 x 3,00 m, soddisfa, superandolo abbondantemente il fattore di illuminamento sul piano di lavoro (si passa dai 1150 lux di Palermo ai 953 lux di Milano). In questo caso la quantità di luce all'interno dell'ambiente risulta addirittura eccessiva, necessitando sia d'estate che d'inverno di essere regolata attraverso un sistema di schermatura, preferibilmente esterno, che permetta di evitare fenomeni di abbagliamento che potrebbero creare discomfort all'utente.

In tal senso è interessante notare che i risultati migliori si ottengono con una schermatura orizzontale, aggettante di 1,20 m rispetto al piano di facciata, con valori di illuminamento medio sul piano di lavoro che si riducono a 600 lx, rispetto all'adozione di un sistema schermante verticale a lamelle di alluminio orizzontali, con una riduzione del fattore di illuminamento medio a 1090 lx.

- La doppia pelle trasparente, di dimensioni coincidenti con quelli della facciata 5,00 x 3,00 m, garantisce una buona illuminazione dello spazio confinato in tutte le località geografiche considerate (si passa dai 550 lux di Palermo ai 497 lux di Milano). In questo caso il sistema di schermatura può contribuire a regolare l'illuminamento in alcuni periodi dell'anno quando la radiazione solare diretta potrebbe causare fenomeni di abbagliamento e di surriscaldamento interno a causa dell'angolo di incidenza della radiazione solare. Dalle simulazioni condotte inserendo un sistema di schermature a lamelle di alluminio all'interno dell'intercapedine si evince che l'illuminamento medio si riduce a valori molto bassi (circa 85 lx nei tre casi considerati), la situazione migliora inserendo un'apertura nella facciata contrapposta a quella doppia pelle, raggiungendo i 517 lx.
- La Smart Facade caratterizzata da un'apertura di dimensioni 1,50 x 3,00 m garantisce buone prestazioni nei mesi estivi (con valori di illuminamento dell'ordine di 592 lux), mentre nei mesi invernali quando alla superficie trasparente sarà sovrapposto il pannello esterno in vetro i valori di illuminamento risultano insufficienti (con valori di illuminamento dell'ordine di 300 lux).

La presenza del sistema schermante riduce i valori di illuminamento medio a circa 250 lux, per riportare questi valori a 500 lx anche in questo caso inserire delle aperture nella facciata contrapposta.

Analizzando le isolinee relative all'illuminamento della superficie del piano di lavoro si evidenzia come, per ambienti di dimensioni analoghe a quelle della test room, la distribuzione della luce è sufficiente solo nella zona collocata in prossimità della parete che ospita l'apertura trasparente: la rimanente superficie è sempre scarsamente illuminata (con valori che scendono sotto i 100 lux) e quindi necessità di illuminazione artificiale. Per limitare i consumi energetici relativi a questa diversa distribuzione della luce si dovrà quindi prevedere:

- a collocazione di un'apertura sulla facciata contrapposta a quella in cui si trova l'elemento finestrato o di facciata che garantisca una migliore distribuzione delle luce all'interno dello spazio confinato;
- l'integrazione di un sistema di illuminazione artificiale a zone con sensori che accendono i corpi illuminanti solo nelle parti di ambiente in cui lo spazio confinato non garantisce di soddisfare l'adeguato illuminamento sul piano di lavoro,

Tipo d'interno, uso o attività	Em (lx)
Archiviazione, copiatura, ecc..	300
Scrittura, battitura, lettura, trattamento dati	500
Disegno tecnico	750
Stazioni di lavoro CAD	500
Sale conferenza e riunioni	500
Zona reception	300
Archivi	200

Tab. 6.10. Valori minimi di illuminamento in alcuni spazi di lavoro così come previsto dalle norma UNI EN 12464 - 1:2004

soprattutto in tutti quei casi in cui non è possibile collocare aperture sulla parete contrapposta.

In merito alla Smart Facade avendo valutato le problematiche relative alla distribuzione della luce ed all'illuminamento nei mesi invernali se ne consiglia l'installazione in ambienti che possano beneficiare di aperture contrapposte alla collocazione del componente.

Nell'edificio della Camera di Commercio di Lucca, in cui il componente verrà installato, abbiamo previsto, infatti, l'apertura di una superficie vetrata in corrispondenza di uno spazio interno coperto da una serra trasparente. La presenza di due aperture speculari ha permesso di raggiungere valori medi di illuminamento sul piano di lavoro di circa 453 lux, abbastanza buoni viste le dimensioni degli spazi che presentano una superficie rettangolare con un profondità di 11,00 m a fronte di una larghezza di 6,00 m.

Conclusioni

Le simulazioni relative alle prestazioni energetiche (termo igrometriche e d'illuminamento) condotte in questo capitolo hanno permesso di valutare le caratteristiche del componente di facciata dinamico e la sua capacità di contribuire alla riduzione del fabbisogno energetico di un ambiente confinato.

Rimandiamo a futuri sviluppi della ricerca valutazioni analitiche di dettaglio in merito all'analisi della fluidodinamica dell'intercapedine (movimento dei moti d'aria e reale trasmittanza del componente calcolate in funzione delle temperature superficiali reali) e della prestazione di isolamento acustico, poiché, come precedentemente ricordato, queste valutazioni possono essere fatte solo in una fase conseguente ad un monitoraggio in opera del componente e ad una successiva simulazione con software dedicati.

Dai risultati ottenuti attraverso le valutazioni analitiche condotte con il software Trnsys si evince che:

1. il componente di facciata garantisce buone prestazioni di isolamento termico nei mesi invernali e nei mesi estivi grazie alla presenza dei pannelli scorrevoli che gli permettono di variare configurazione in relazione alle condizioni climatiche

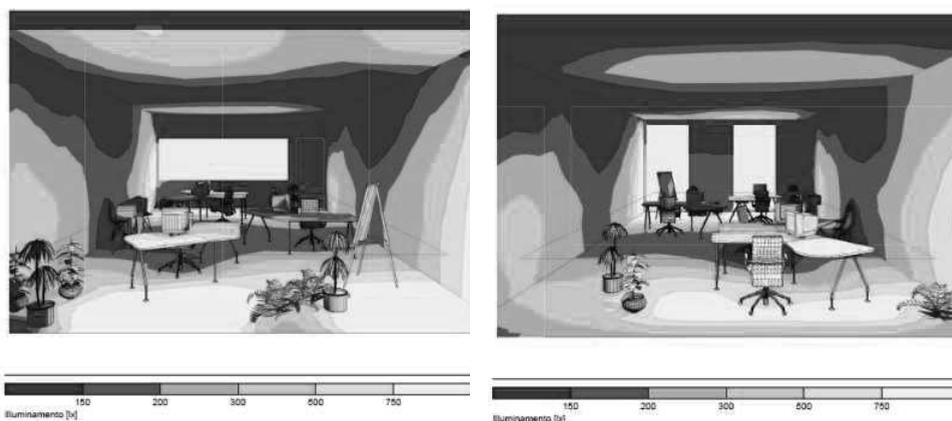


Fig. 6.6. Simulazione dell'illuminamento di uno degli spazi ufficio del Centro in ICT e ambienti virtuali della Camera di Commercio di Lucca. Em: 460 lx E min: 115 lx E max: 1180 lx

esterne. Non potendo valutare le prestazioni estive in termini di inerzia termica e sfasamento abbiamo condotto un'analisi del fabbisogno dell'energia primaria per il condizionamento che ci ha permesso di valutare il contributo dato dal sistema tecnologico proposto durante tutto l'arco dell'anno. Da queste valutazioni è risultato che:

- Nei mesi invernali, il fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento dell'involucro dinamico è inferiore a quello di una partitura di facciata con le stesse caratteristiche geometriche ma realizzata in muratura tradizionale (Caso 2, 50% di componente finestrata e 50% di componente in muratura: 4500 kWh) attestandosi, per le tre località scelte ed i quattro orientamenti considerati, intorno a 4380 kWh. Il fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento risulta superiore a quello di una facciata trasparente monostrato e di una doppia pelle trasparente (caso 3: 3450 kWh e caso 6: 3750 kWh), poiché al diminuire della superficie trasparente si riduce anche il contributo passivo degli apporti solari. È interessante notare che la configurazione del componente come doppia pelle, con pannello di vetro aperto, permette di ridurre del 5% il fabbisogno termico invernale. Per incrementare la prestazione invernale senza compromettere i risultati raggiunti nella valutazione del contributo dato al fabbisogno di energia primaria nei mesi estivi, potrebbe essere interessante in futuro valutare il contributo dell'adozione di materiali a cambiamento di fase traslucenti per tamponare i pannelli della componente opaca fissa e soprattutto del pannello mobile, nel quale nella soluzione proposta è stato alloggiato un vetro stratificato 4+4.
- Nei mesi estivi l'involucro dinamico garantisce ottime prestazioni in termini di riduzione del fabbisogno di energia primaria per il raffrescamento nella configurazione con pannello schermante aperto e collocato dinanzi alla partitura trasparente, con un fabbisogno della test room virtuale che si assesta intorno a circa 770,00 kWh, inferiori a quelli di quelli di una facciata monostrato in vetro e ad una doppia pelle trasparente con sistema schermante

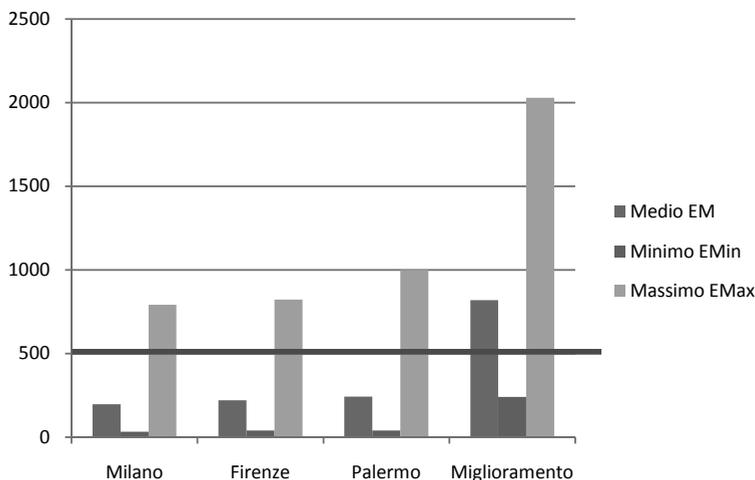


Fig. 6.7. Confronto dei valori di illuminamento medio della facciata con finestra di 3,00 x 1,35.

fisso (caso 4: 1500 kWh, caso 7: 895,00 kWh) o mobile (caso 5: 1527 kWh, caso 8: 899,00 kWh). Il pannello di schermatura mobile garantisce inoltre, rispetto alla stessa soluzione d'involucro senza sistema di ombreggiamento (caso 11: 2970 kWh), una riduzione di circa il 70% del fabbisogno di energia primaria dell'edificio per il raffrescamento.

In merito alle simulazioni condotte con il software Relux per valutare l'efficacia del componente di facciata dinamica in relazione alla riduzione dei consumi energetici legati all'illuminazione naturale, i risultati hanno dimostrato che la Smart Facade, caratterizzata da due aperture di dimensioni 1,50 x 3,00 m garantisce:

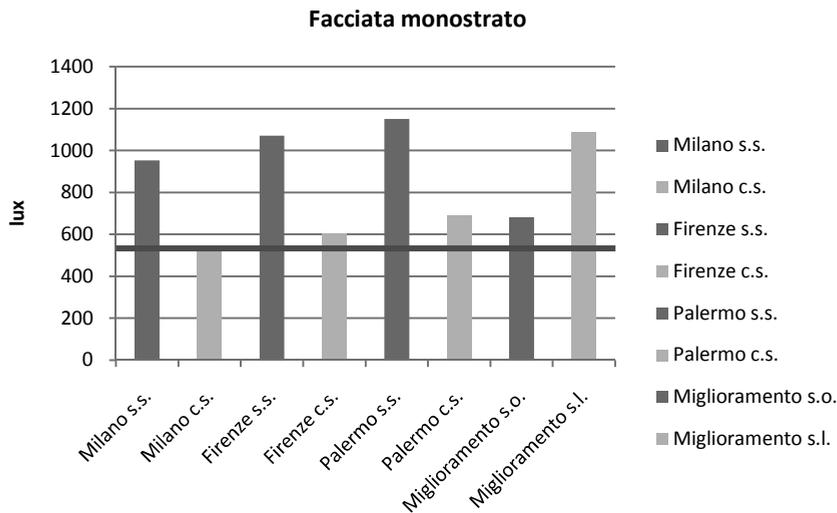


Fig. 6.8. Confronto dei valori di illuminamento medio della facciata monostrato con e senza sistema di schermatura.

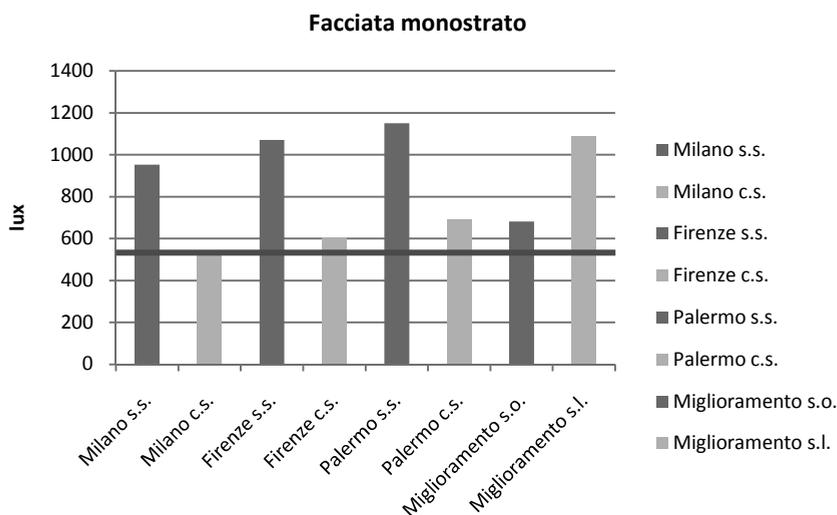


Fig. 6.9. Confronto dei valori di illuminamento medio della facciata doppia pelle trasparente con e senza sistema di schermatura.

- buone prestazioni nei mesi estivi (con valori di illuminamento dell'ordine di 592 lux);
- prestazioni insufficienti nei mesi invernali quando alla superficie trasparente viene sovrapposto il pannello esterno in vetro i valori di illuminamento risultano insufficienti (con valori di illuminamento dell'ordine di 300 lux).
- il sistema di schermatura, fondamentale per ridurre il fabbisogno di energia primaria dello spazio confinato nei mesi estivi, può incidere negativamente sull'illuminamento medio abbassandolo di circa il 50 % rispetto alla condizione in cui la schermatura è assente.

Risulta quindi fondamentale prevedere la collocazione di questo tipo di facciata in spazi rispetto ai quali sia possibile avere un'apertura finestrata contrapposta a quella del fronte in cui alloggia il componente e preferibilmente dotati di un sistema di controllo elettronico dell'illuminazione artificiale che garantisca l'accensione dei corpi illuminati solo nelle zone della stanza che non sono raggiunte dalla radiazione solare diretta e che presentano fattore insufficienti di illuminamento o nelle ore del giorno in cui, a causa di fattori climatici esterni, il fattore medio di illuminazione di 500 lux non è garantito sul piano di lavoro.

Per non ridurre l'illuminamento sul piano di lavoro nella configurazione con schermatura attiva, oltre all'apertura contrapposta, si può prevedere l'adozione di lamelle realizzate con materiali altamente tralucanti, come il vetro o materiali trasparenti innovativi (TIM, PCM, Aereogel) che garantiscono una minima riduzione del carico termico senza limitare il passaggio della luce.

Note

¹ Pari al 30% della superficie esterna della parete e in conformità con il Decreto Ministeriale del 5 luglio 1975, maggiore di un ottavo della superficie interna analizzata

² Pari al 30% della superficie esterna della parete e in conformità con il Decreto Ministeriale del 5 luglio 1975, maggiore di un ottavo della superficie interna analizzata.

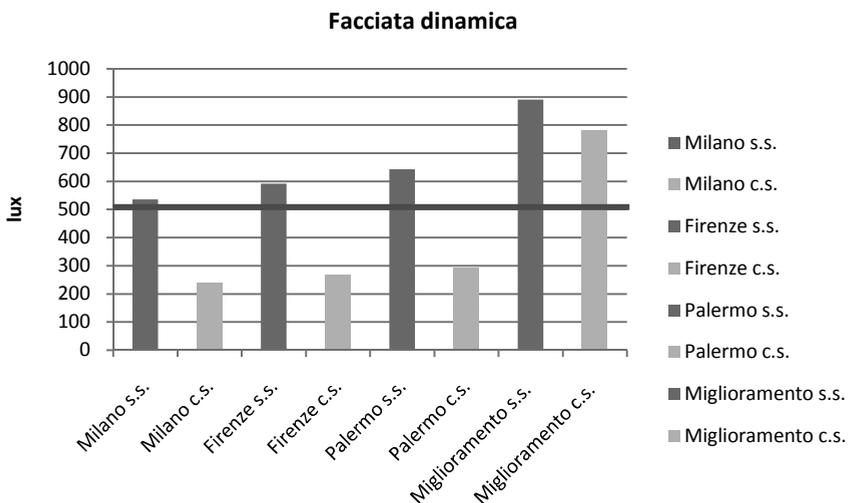


Fig. 6.10. Confronto dei valori di illuminamento medio della facciata dinamica con e senza sistema di schermatura

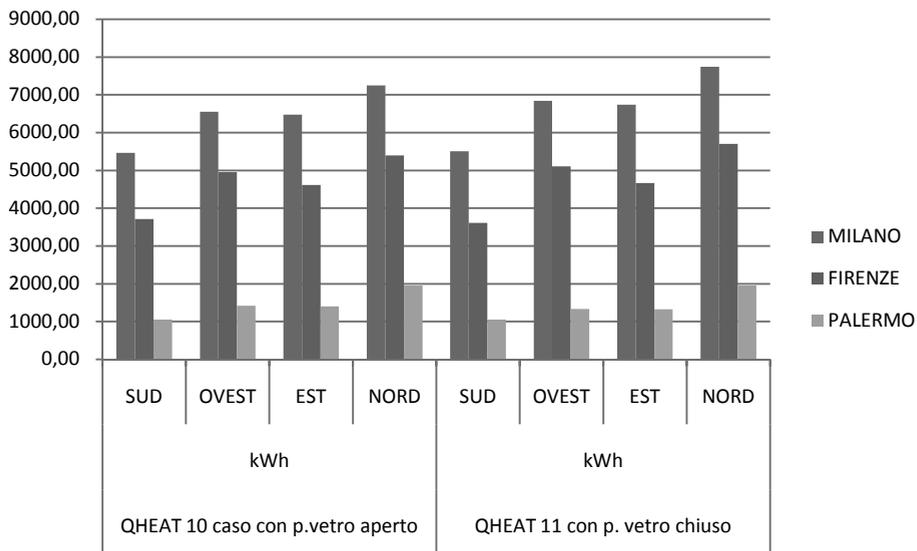


Fig. 6.11. Componente di facciata dinamica. Confronto del fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento a sinistra nella configurazione doppia pelle a destra nella configurazione con vetro monostrato

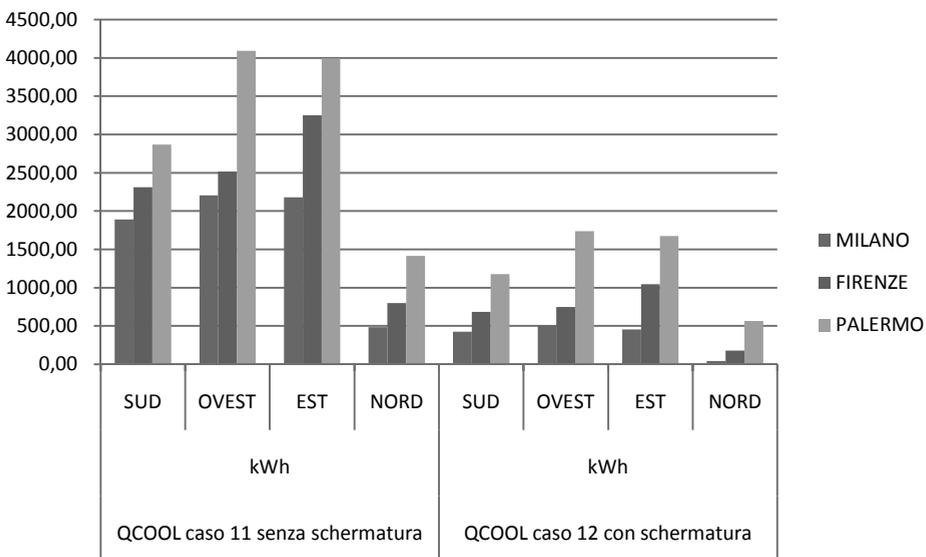


Fig. 6.12. Componente di facciata dinamica. Confronto del fabbisogno di energia primaria per il raffrescamento con o senza sistema schermante.

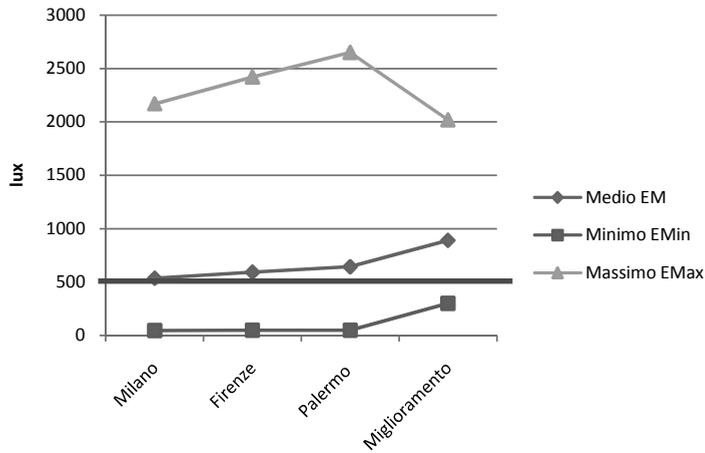


Fig. 6.13. Componente di facciata dinamica. Analisi dell'illuminamento con pannello di vetro chiuso

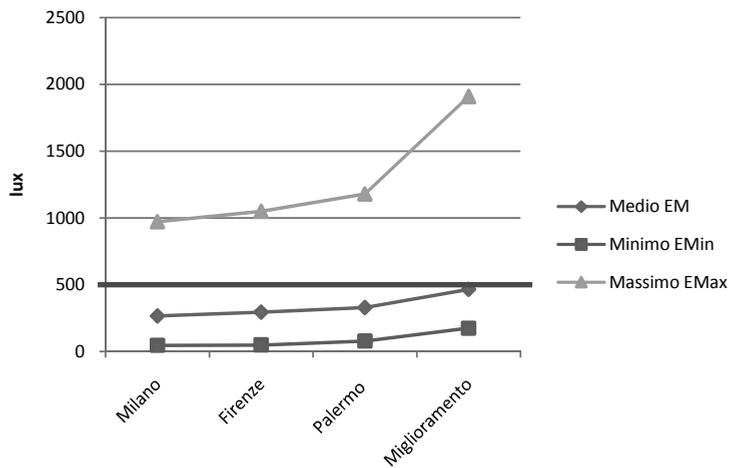


Fig. 6.14. Componente di facciata dinamica. Analisi dell'illuminamento con il pannello di vetro aperto.

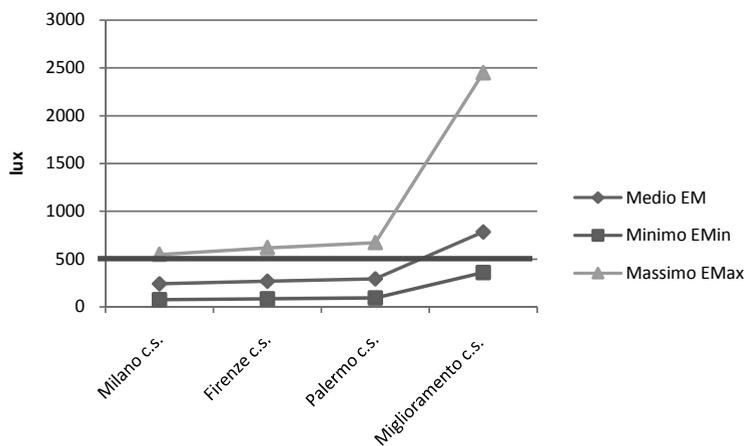
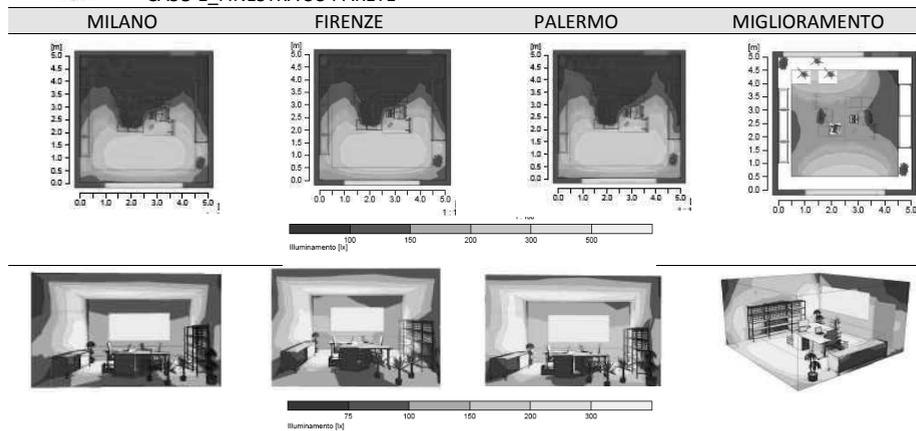


Fig. 6.15. Componente di facciata dinamica. Analisi dell'illuminamento con il sistema di schermatura aperto.



CASO 1_FINESTRA SU PARETE

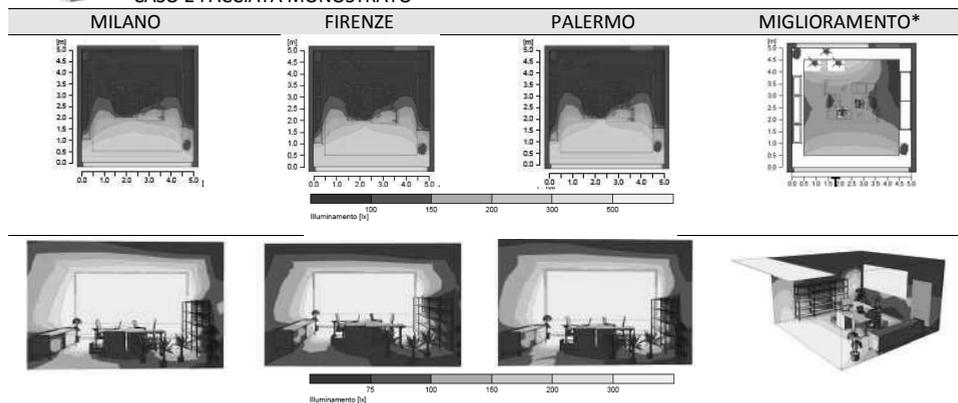


Medio EM	197	Medio EM	220	Medio EM	242	Medio EM	820
Minimo EMin	32	Minimo EMin	40	Minimo EMin	41	Minimo EMin	240
Massimo EMax	792	Massimo EMax	823	Massimo EMax	1000	Massimo EMax	2030

Per migliorare la distribuzione della radiazione luminosa all'interno dell'ambiente abbiamo valutato il contributo di una finestra di 3,00 x 1,35 m inserita nella parete opposta a quella in cui si trova la doppia pelle.



CASO 2_FACCIATA MONOSTRATO

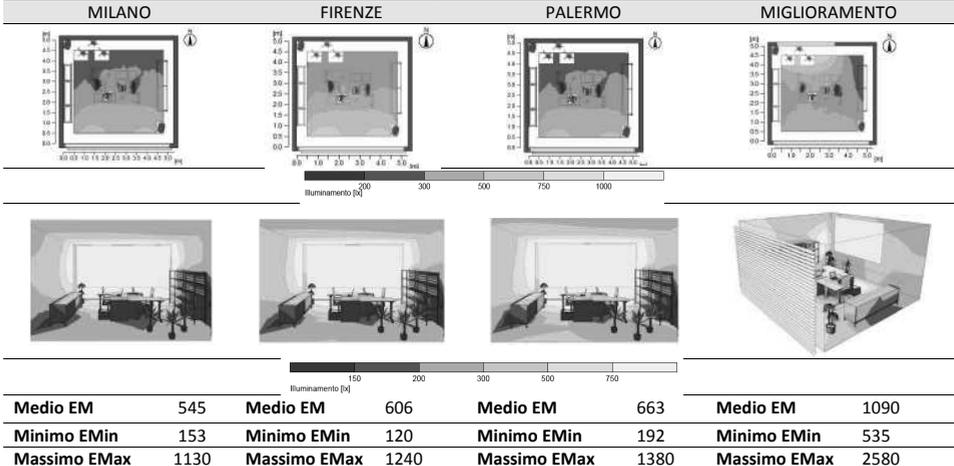


Medio EM	953	Medio EM	1070	Medio EM	1150	Medio EM	681
Minimo EMin	76	Minimo EMin	79	Minimo EMin	75	Minimo EMin	150
Massimo EMax	2950	Massimo EMax	3300	Massimo EMax	3950	Massimo EMax	1860

Per limitare i fenomeni di abbagliamento ed eccessivo illuminamento del piano di lavoro è stato necessario inserire uno schermo orizzontale di 1,5 m nella parte superiore della facciata trasparente ed integrare una finestra nella parete contrapposta a quella della facciata.



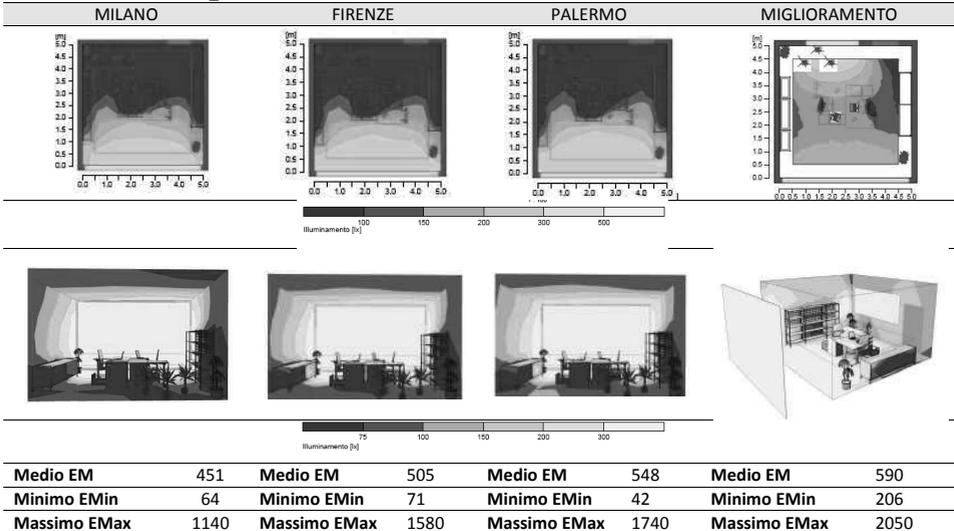
CASO 3 FACCIATA MONOSTRATO_CON SCHERMATURA



Per limitare i fenomeni di abbagliamento ed eccessivo illuminamento del piano di lavoro è stato necessario inserire uno schermo orizzontale di 1,5 m nella parte superiore della facciata trasparente ed integrare una finestra nella parete contrapposta a quella della facciata.



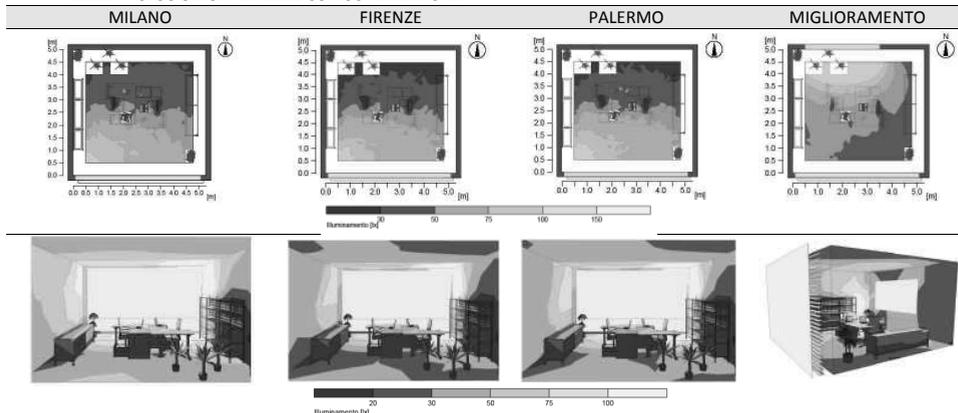
CASO 4_DOPPIA PELLE



Per migliorare la distribuzione della radiazione luminosa all'interno dell'ambiente abbiamo valutato il contributo di una finestra di 2,00 x 1,35 m inserita nella parete opposta a quella in cui si trova la doppia pelle.



CASO 5 DOPPIA PELLE CON SCHERMATURA

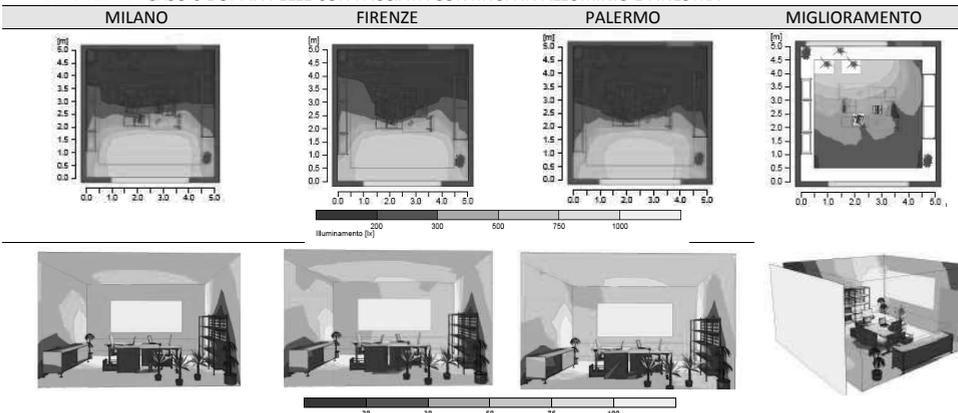


Medio EM	80	Medio EM	89	Medio EM	96	Medio EM	517
Minimo EMin	26	Minimo EMin	30	Minimo EMin	33	Minimo EMin	198
Massimo EMax	223	Massimo EMax	243	Massimo EMax	265	Massimo EMax	2070

Per migliorare la distribuzione della radiazione luminosa all'interno dell'ambiente abbiamo valutato il contributo di una finestra di 2,00 x 1,35 m inserita nella parete opposta a quella in cui si trova la doppia pelle.



CASO 6 DOPPIA PELLE CON FACCIAIA CONTINUA IN ALLUMINIO E FINESTRA

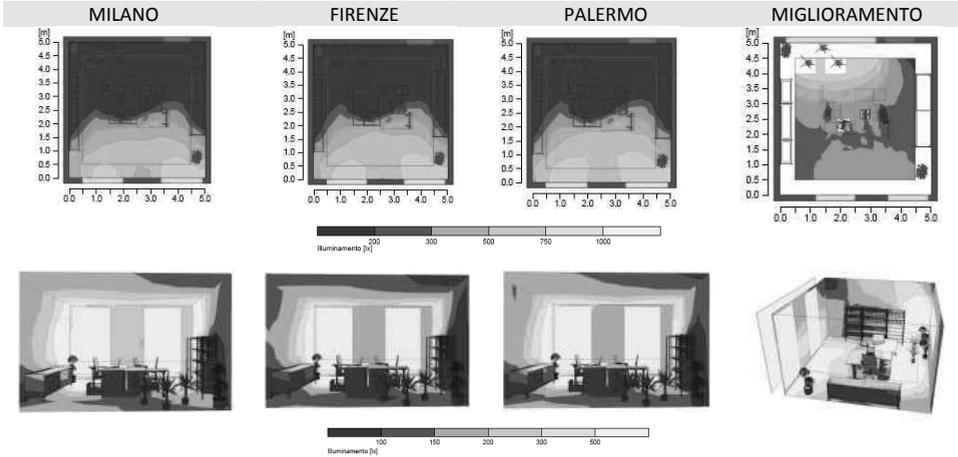


Medio EM	106	Medio EM	121	Medio EM	134	Medio EM	399
Minimo EMin	26	Minimo EMin	27	Minimo EMin	30	Minimo EMin	126
Massimo EMax	312	Massimo EMax	358	Massimo EMax	396	Massimo EMax	1900

Per migliorare la distribuzione della radiazione luminosa all'interno dell'ambiente abbiamo valutato il contributo di una finestra di 2,00 x 1,35 m inserita nella parete opposta a quella in cui si trova la doppia pelle.



CASO 7 SMART FACADE_configurazione invernale

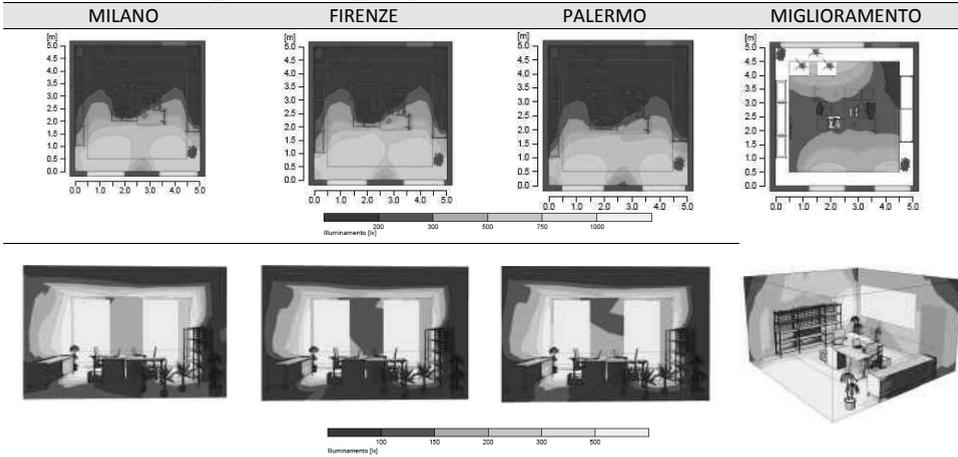


Medio EM	267	Medio EM	296	Medio EM	330	Medio EM	466
Minimo EMin	47	Minimo EMin	50	Minimo EMin	80	Minimo EMin	175
Massimo EMax	972	Massimo EMax	1050	Massimo EMax	1180	Massimo EMax	1910

Per migliorare la distribuzione della radiazione luminosa all'interno dell'ambiente abbiamo valutato il contributo di una finestra di 3,00 x 1,35 m inserita nella parete opposta a quella in cui si trova la doppia pelle.



CASO 8 SMART FACADE_configurazione estiva senza sistema schermante

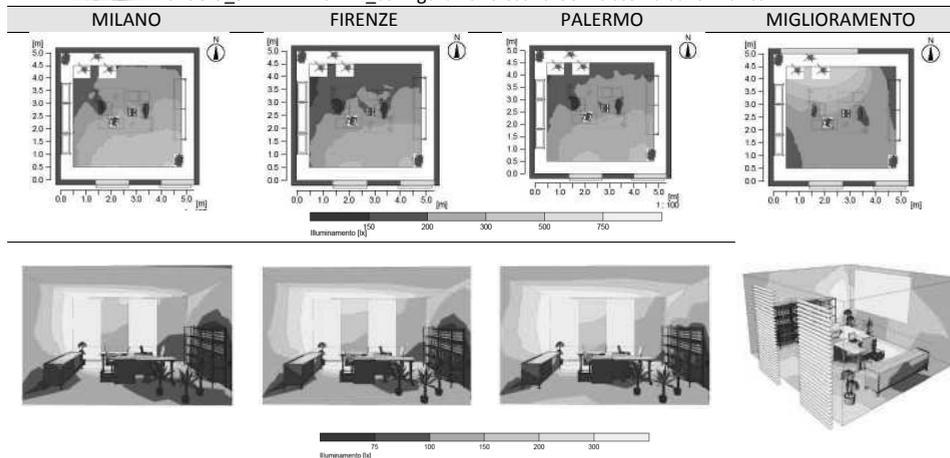


Medio EM	536	Medio EM	592	Medio EM	643	Medio EM	890
Minimo EMin	46	Minimo EMin	50	Minimo EMin	50	Minimo EMin	300
Massimo EMax	2170	Massimo EMax	2420	Massimo EMax	2650	Massimo EMax	2020

Per migliorare la distribuzione della radiazione luminosa all'interno dell'ambiente abbiamo valutato il contributo di una finestra di 3,00 x 1,35 m inserita nella parete opposta a quella in cui si trova la doppia pelle.



CASO 9 SMART FACADE_configurazione estiva CON sistema schermante



Medio EM	240	Medio EM	267	Medio EM	292	Medio EM	784
Minimo EMin	75	Minimo EMin	84	Minimo EMin	93	Minimo EMin	360
Massimo EMax	548	Massimo EMax	619	Massimo EMax	671	Massimo EMax	2450

Per migliorare la distribuzione della radiazione luminosa all'interno dell'ambiente abbiamo valutato il contributo di una finestra di 3,00 x 1,35 m inserita nella parete opposta a quella in cui si trova la doppia pelle.

³La prestazione termica di un modulo multistrato è variabile e dipende dalle temperature che l'intercapedine può raggiungere grazie all'irraggiamento solare.

Le aziende che producono questi sistemi di facciata doppia pelle procedono infatti alla loro verifica solo dopo il monitoraggio di un prototipo messo in opera per almeno 18 mesi, valutando in una fase successiva, attraverso un software di simulazione dinamica, le prestazioni raggiunte in termini di isolamento termico. Monitoraggi condotti attualmente su componenti di facciata analoghi a quello proposto nell'ambito di questa tesi di dottorato, presso il Centro di Ricerca della Schueco a Bielefeld in Germania, hanno evidenziato che per una esposizione SUD il risparmio delle dispersioni termiche è variabile da un 10-12% al 30%, in funzione di come sono realizzate le aperture di ventilazione e cioè sempre aperte o operabili (Chiusa - aperta). Un altro metodo di valutazione è legato al dimensionamento degli impianti a servizio dello spazio confinato con la quantificazione dell'energia primaria richiesta per la climatizzazione: in questo caso si può procedere valutando il contributo della facciata doppia pelle in relazione al valore della trasmittanza termica della pelle interna, o si può considerare un coefficiente di adduzione esterno diverso, perché a schermo esterno chiuso le modalità di trasmissione del calore vengono modificate in relazione al fatto che il vento esterno non agisce più direttamente sulla pelle interna e l'intercapedine d'aria contribuisce ad incrementare l'inerzia termica del sistema tecnologico di chiusura. Un'analisi preliminare delle isoterme può, invece, solo indicare eventuali punti deboli della struttura.

⁴ Norma UNI 10339:1995 – impianti area ulici a fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti.

⁵ Il coefficiente di prestazione (COP) di un generatore può essere definito come l'energia utile totale all'uscita, diviso la sola energia immessa dall'operatore per il suo funzionamento. L'efficienza di una pompa di calore è misurata dal suo Coefficiente di Prestazione (COP) che solitamente è circa 3, ma può arrivare a valori relativamente molto alti (per esempio 10 o 15) in condizioni estremamente favorevoli, dipendendo dalla differenza delle temperature tra ambiente interno ed esterno. Una pompa di calore con COP uguale a 3 ha bisogno di 1 kW di energia primaria per produrre 3 kW di energia termica, attingendo i 2 kW rimanenti dall'ambiente esterno.

⁶ In fase di raffreddamento la prestazione di una pompa di calore è descritta dall'EER (energy efficiency ratio) o dal SEER (seasonal energy efficiency ratio), migliori quanto più elevati.

⁷ Il software Relux Professional, sviluppato dagli svizzeri dall'Informatic AG, consente di sviluppare simulazioni della luce artificiale in conformità alle seguenti normative: per interni e impianti esterni conformemente a EN 12464, per l'illuminazione d'emergenza conformemente a EN 1838, per le strade conformemente a EN 13201, per campi sportivi e luce naturale conformemente a CIE.

Capitolo 7

Conclusioni

Dall'analisi preliminare, avviata nel capitolo 1, sulla situazione energetica globale e locale e gli sviluppi sociali e d economici ad essa legati, è emerso come le strategie e le politiche internazionali siano orientate a diminuire i consumi energetici per ridurre conseguentemente l'emissione di sostanze nocive in atmosfera e alleviare l'impatto ambientale dell'umanità.

Uno dei settori su cui è necessario intervenire, con investimenti che riguardano prevalentemente lo sviluppo tecnologico, è sicuramente quello delle costruzioni, che concorre quasi e quanto il settore dell'industria ad inquinare il Pianeta. Una rilevante inefficienza nei consumi finali di energia è imputabile ai settori dell'edilizia residenziale e terziaria; settori rispetto ai quali sono stati emanati negli ultimi decenni, a scala internazionale e locale, provvedimenti normativi atti ad incrementarne le prestazioni. Se l'edilizia residenziale è quella che necessita delle maggiori attenzioni perché energeticamente più inefficiente del settore terziario, quest'ultimo presenta delle problematiche legate alla gestione dei sistemi di illuminazione e condizionamento estivo che richiedono interventi nel breve termine. Intervenire su edifici non residenziali permette di dimostrare l'efficacia dell'adozione di nuove tecnologie d'involucro e d'impianto destinate al contenimento dei consumi energetici ed alla produzione di energia da fonti rinnovabili.

Emerge la necessità di trovare nuovi modelli costruttivi che garantiscano condizioni di comfort estivo e non solo invernale, introducendo nuovi parametri di verifica delle prestazioni dell'involucro, quali l'inerzia termica e/o il controllo dell'assorbimento solare da parte delle superfici trasparenti, attraverso il ripensamento di alcune tecnologie (pareti multistrato iperisolate, facciate trasparenti, sistemi di ventilazione meccanica e controllata) che spesso sono state importate dal Nord al Sud Europa senza valutarne l'impatto negativo nelle stagioni dell'anno più calde.

In Europa ed in Italia sono state avviate negli ultimi anni interessanti ricerche finalizzate a proporre nuovi modelli di edifici a zero emissioni e/o passivhouse adatte al clima Mediterraneo, e si registra la volontà, sottolineata in più sedi istituzionali riconosciute, di promuovere nei prossimi decenni l'innovazione tecnologica legata alle prestazioni dell'edificio nei mesi estivi.

L'input dato dall'apparato normativo europeo, in merito alla necessità di riformulare le prestazioni dell'involucro edilizio trasparente, ha permesso al settore industriale coinvolto di resistere alla crisi economica degli ultimi anni, puntando alla ricerca ed allo sviluppo di nuovi prodotti (dalle finestre ai componenti di facciata), capaci di rispondere alle indicazioni prescrittive di carattere normativo, garantendo la riduzione dei consumi energetici a scala dell'edificio.

La ricerca in oggetto si è posta quindi l'obiettivo di indagare, nell'ambito degli edifici per uffici, nuove soluzioni di involucro dinamico e trasparente, con l'obiettivo di permettere l'adozione di questa tecnologia, che continua a trovare largo successo

nel mondo delle costruzioni, anche in una fascia climatica temperata nella quale senza l'opportuna adozione di accorgimenti atti a limitare gli apporti solari, potrebbe incrementare i consumi energetici degli edifici.

Nel capitolo 2 abbiamo cercato di sintetizzare, attraverso una classificazione prestazionale, l'evoluzione tecnologica, legata alle istanze di efficienza energetica, dell'involucro edilizio. Emerge con forza la tendenza alla smaterializzazione degli elementi di chiusura verticale e orizzontale, che negli anni, parallelamente all'evoluzione della complessità dei sistemi di condizionamento a servizio dello spazio confinato, sono diventati esempio di una ricerca estetico formale dell'architettura minimalista o altamente tecnologica, per cui l'edificio è stato realmente assimilato al concetto di *machine à habiter* lecorbusieriano, dimenticando totalmente il suo ruolo primario di elemento filtro regolatore dei flussi energetici tra interno ed esterno. La crisi energetica degli anni settanta, accompagnata dalle prime e sempre più frequenti riflessioni globali sulla situazione ambientale, ha condotto all'inizio degli anni novanta a riformulare il concetto di involucro e di architettura, con una nuova presa di coscienza del ruolo etico e sociale che entrambi i temi possono rivestire nell'ambito della cultura contemporanea.

L'architettura, opera d'arte ed immagine di un tempo e di un retaggio conoscitivo che l'ha generata, diviene nuovamente il fulcro di una nuova corrente di sperimentazione formale e tecnologica, e l'involucro è l'elemento principe attraverso cui si rispecchia questo cambiamento. Si affermano così nuovi modelli di chiusura, che seppur in molti casi non rinunciano all'evanescenza dimensionale della propria conformazione, declinano in una complessità stratigrafica i sub sistemi necessari a trasformarli da scenografie statiche ad elementi dinamici, osmoticamente attivi.

L'involucro a schermo avanzato, eco-efficiente e sostenibile interagisce e regola i flussi energetici ed in taluni casi diventa esso stesso sistema impiantistico in grado di produrre energia, termica o elettrica, e di distribuirla a scala edilizia o, addirittura, urbanistica. La ricerca dei prossimi decenni si concentrerà sicuramente nello sviluppo di questi nuovi sistemi di chiusura verticale e orizzontale a tutta superficie, dotati del dinamismo meccanico necessario a renderli realmente tecnologie variabili ed energeticamente efficienti.

L'analisi delle caratteristiche tecnologiche e la definizione delle prestazioni delle facciate doppia pelle trasparente, condotta nell'ambito del capitolo 3, è stata necessaria per individuare un modello di riferimento per lo sviluppo del concept di facciata e la realizzazione del prototipo, affrontate nella fase propositiva della tesi di dottorato. La classificazione relativa alle caratteristiche geometriche del sistema, del tipo di ventilazione e delle peculiarità dell'intercapedine, oltre all'indagine relativa alla definizione delle performance in termini di comfort termoigrometrico, visivo, acustico, ci ha inoltre permesso di rilevare dei dati quantitativi che ci sono serviti nella fase di stesura meta-progettuale. In particolar modo, è stato possibile comprendere quali elementi adottare e come combinarli declinandoli sistematicamente nell'area di applicazione del Sud Europa, per promuovere l'efficienza energetica di un sistema tecnologico, quale quello della facciata trasparente doppia pelle, che comporta numerose problematiche in relazione alla climatizzazione estiva.

Tra gli elementi individuati in questa fase, riproposti poi nell'ambito di elaborazione del componente dinamico di facciata, ricordiamo quelli relativi a

- Conformazione geometrica: abbiamo deciso di sviluppare un componente del tipo *box facade* perché in grado di garantirci facilità di messa in opera, maggiori prestazioni acustiche e minori rischi in caso d'incendio;
- Ventilazione dell'intercapedine: abbiamo adottando un sistema di ventilazione

naturale, la cui efficienza è garantita dall'altezza del modulo di facciata e dalla profondità dell'intercapedine

- Sistema schermante mobile, capace di ottimizzare l'illuminamento dello spazio confinato, ma soprattutto di limitare gli apporti energetici nei mesi estivi: abbiamo integrato nel componente un pannello schermante mobile. Rispetto al tema della schermatura è stato determinante valutare, attraverso l'analisi di ricerche condotte in Germania, come la schermatura incida maggiormente sul bilancio energetico estivo se collocata all'interno di due superfici trasparenti e come invece il fabbisogno di energia primaria per il condizionamento decresca se l'elemento oscurante viene posto all'esterno di una superficie vetrata monostrato.

Queste riflessioni ci hanno condotto a sviluppare un sistema di facciata, che attraverso la possibilità di muovere i layer che lo costituiscono, garantisca una conformazione:

- a doppia pelle nei mesi invernali, quando i guadagni solari passivi possono limitare, alle nostre latitudini, i consumi per il riscaldamento,
- a vetro singolo e schermatura esterna nei mesi estivi così da ridurre le problematiche legate al surriscaldamento dell'intercapedine.

Nel capitolo 4, l'approfondimento analitico ha riguardato l'indagine del processo di innovazione tecnologica che nell'ultimo decennio ha riguardato i materiali di tamponamento trasparenti, che sono stati oggetto di interessanti sperimentazioni, che hanno portato sul mercato nuovi prodotti con prestazioni termo-igroscopiche assimilabili a quelle dei materiali da costruzione opachi. La ricerca condotta nell'ultimo decennio, infatti, oltre a interessare la produzione del vetro è stata caratterizzata dal trasferimento tecnologico nel settore delle costruzioni di nuovi materiali, quali gli aerogel, i TIM e i PCM, che grazie all'ottimizzazione dei costi di produzione hanno cominciato a trovare applicazione anche nelle realizzazioni correnti. Le ricerche avviate in ambito europeo per monitorarne le prestazioni hanno inoltre dimostrato che questi materiali intelligenti, talora capaci di cambiare conformazione in relazione alle condizioni a contorno esterne, garantiscono ottime prestazioni anche in regioni con clima temperato e mediterraneo, dove solitamente le superfici trasparenti hanno sempre contribuito ad incrementare il carico termico interno degli edifici. I materiali a cambiamento di fase o i nanogel si prestano pertanto ad essere integrati in sistemi di facciata innovativi doppia pelle, dove installati su pannelli mobili o utilizzati come sistemi di schermatura interna o esterna, possono contribuire ulteriormente a incrementare l'efficienza del sistema involucro in relazione alla necessità di ridurre i carichi termici dell'edificio durante tutto l'arco dell'anno.

La fase analitica, accompagnata dall'indagine diretta sul campo, avvenuta tramite il contatto con le aziende di settore ed i progettisti di involucri doppia pelle ci ha portato ad individuare una serie di casi studio, interessanti per definire le caratteristiche che dovrebbe avere un componente di facciata innovativo trasparente proposto in clima continentale temperato. In particolare sono emerse le seguenti tendenze:

- Si adottano sistemi doppia pelle trasparente caratterizzati da involucri esterni mobili, costituiti da lamelle frangisole o pannelli scorrevoli;
- Nella doppia pelle sono integrati sistemi di schermatura esterna orizzontale o sistemi di schermatura verticali fissi e mobili, posti nell'intercapedine;
- Si utilizzano materiali innovativi, a cambiamento di fase o pannelli fotovoltaici, trasformando il sistema di facciata in un componente capace di contribuire alla riduzione del fabbisogno termico dell'edificio e contemporaneamente di produrre energia;
- Il componente di facciata diventa elemento d'impianto che provvede a garantire il

comfort indoor riuscendo a modulare le sue prestazioni in relazione alle condizioni climatiche esterne;

- La necessità di poter regolare l'involucro in relazione alle condizioni climatiche, infine, induce ad adottare sistemi di automazione che permettono alla facciata di assumere molteplici configurazioni nel tempo trasformandola in un'entità mobile e dinamica talora indipendente dalle necessità dell'utenza.

La volontà di ridurre i carichi energetici che una facciata doppia pelle trasparente può comportare a causa dell'incremento di fenomeni come l'effetto serra nei mesi estivi induce ad adottare sistemi con layer esterni mobili o con efficaci sistemi di schermatura. Inoltre si evince come la tendenza sia quella di abbandonare i modelli di facciata attiva ed interattiva a ventilazione meccanica dell'intercapedine, adottando sistemi a ventilazione naturale, con buffer zone spesso accessibili all'utente che diventano spazi accessori per la sosta del resto dell'edificio.

L'analisi del comfort visivo e dell'illuminamento del piano di lavoro ci ha permesso di valutare l'incidenza talvolta negativa di avere pelli esterne configurate totalmente come sistemi di schermatura fissa, poiché, spesso, in questo caso la distribuzione della luce non risulta essere uniforme all'interno dell'ambiente e si limita molto la visibilità dell'utente dall'interno verso l'esterno, peggiorando il suo stato psicologico.

Risulta interessante notare che in tutti gli esempi analizzati le prestazioni di isolamento termico sono delegate al sistema di facciata interno, che è sempre costituito da infissi realizzati con profilati a taglio termico e doppi (talora anche tripli) vetri basso-emissivi. Questa scelta dipende dal fatto che in questo modo si garantisce una prestazione minima accettabile del sistema di facciata trasparente, le cui performance vengono poi incrementate dalla presenza della camera d'aria e della pelle esterna. Come abbiamo visto precedentemente, infatti, non esistono ancora metodologie riconosciute che permettono di valutare in modo efficace e rapido le prestazioni di questi complessi sistemi di facciata, valutazioni queste che possono essere fatte solo attraverso i software di modellazione energetica dinamica che permettono di valutare la temperatura e la velocità dell'aria dell'intercapedine e conseguentemente le prestazioni in termini di trasmittanza termica dell'elemento.

Un ultimo elemento interessante è relativo alle caratteristiche ed alla posizione del sistema di schermatura, che è realizzato nella maggioranza dei casi con elementi a lamelle d'alluminio posti all'interno dell'intercapedine ad una certa distanza dalla pelle interna (almeno 30,00 cm), così da evitare fenomeni di surriscaldamento della stessa durante la stagione calda. Gli schermi orizzontali esterni o interni sono invece risolti come elementi oscuranti e riflettenti, in grado di direzionare il flusso luminoso e incrementare l'illuminazione naturale degli spazi interni.

Nella fase propositiva della tesi, la volontà di proporre un sistema di facciata che, attraverso la variabilità degli elementi che lo compongono, permetta di raggiungere buone prestazioni in termini di contenimento dei consumi energetici in edifici destinati al terziario in area a clima temperato, ci ha condotto a sviluppare il concept di un sistema di facciata doppia pelle caratterizzato dalla presenza di elementi scorrevoli che permettono di regolare i flussi di energia termica passanti garantendo buone prestazioni, grazie al sistema di schermatura, anche nei mesi estivi.

Nella fase meta-progettuale abbiamo analizzato e definito le caratteristiche tecnologiche ed il soddisfacimento di alcuni requisiti prestazionali, quali sicurezza strutturale, benessere acustico, durabilità e facilità di messa in opera, che sono stati necessari per sviluppare il prototipo del componente e proporre poi la sua applicazione in un caso concreto.

L'approfondimento descrittivo delle peculiarità tecnologiche adottate, relativo alla definizione di ogni elemento che costituisce il sistema, è stato condotto con la volontà di poter fornire varie opzioni realizzative in relazione alle prestazioni che si vogliono raggiungere in contesti geografici e climatici diversi. Il componente di facciata proposto costituito da elementi lineari di sostegno ad elementi scatolari opachi e trasparenti, garantisce l'intercambiabilità di alcune parti (componente opaca e trasparente, pannelli scorrevoli) e permette di raggiungere buone prestazioni in termini di:

- Trasmissione termica, la sola parete interna presenta un valore di trasmittanza pari a 1,2 W/mqK nella componente trasparente e di 0,30 W/mqK nella componente opaca;
- Isolamento acustico, l'intero sistema garantisce un indice di isolamento acustico standardizzato della facciata di 50 dB;
- Resistenza meccanica, con la capacità di resistere in modo soddisfacente a deformazioni indotte da carichi accidentali e dinamici ed una buona resistenza al fuoco;
- Permeabilità all'aria ed al vapore, grazie alle soluzioni di raccordo adottate che evitano la formazione di condense e garantiscono un'ottima tenuta all'aria;
- Manutenibilità, incrementata dalla modularità dei sub-sistemi sui quali è possibile intervenire isolatamente senza compromettere la prestazione generale del componente.

Le simulazioni relative alle prestazioni energetiche (termo igrometriche e d'illuminamento) condotte nella parte finale della tesi hanno permesso di valutare le caratteristiche del componente di facciata dinamico e la sua capacità di contribuire alla riduzione del fabbisogno energetico di un ambiente confinato.

Rimandando a futuri sviluppi della ricerca valutazioni analitiche di dettaglio in merito all'analisi della fluidodinamica dell'intercapedine (movimento dei moti d'aria e reale trasmittanza del componente calcolate in funzione delle temperature superficiali reali) e della prestazione di isolamento acustico, poiché queste valutazioni possono essere fatte solo in una fase conseguente ad un monitoraggio in opera del componente e ad una successiva simulazione con software dedicati, in questo momento di indagine scientifica ci siamo concentrati sulle simulazioni del fabbisogno di energia primaria per il condizionamento per comprendere se il componente sviluppato garantisce migliori prestazioni rispetto ad una soluzione doppia pelle tradizionale.

Dai risultati ottenuti attraverso le valutazioni analitiche condotte con il software Trnsys si è rilevato che:

Il componente di facciata garantisce buone prestazioni di isolamento termico nei mesi invernali e nei mesi estivi grazie alla presenza dei pannelli scorrevoli che gli permettono di variare configurazione in relazione alle condizioni climatiche esterne. Non potendo valutare le prestazioni estive in termini di inerzia termica e sfasamento abbiamo condotto un'analisi del fabbisogno dell'energia primaria per il condizionamento che ci ha permesso di valutare il contributo dato dal sistema tecnologico proposto durante tutto l'arco dell'anno. Da queste valutazioni è risultato che:

- Nei mesi invernali, il fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento dell'involucro dinamico è inferiore a quello di una partitura di facciata con le stesse caratteristiche geometriche ma realizzata in muratura tradizionale (Caso 2, 50% di componente finestrata e 50% di componente in muratura: 4500 kWh) attestandosi, per le tre località scelte ed i quattro orientamenti considerati, intorno a 4380 kWh. Il fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento risulta superiore a quello di una facciata trasparente mostrato

e di una doppia pelle trasparente (caso 3: 3450 kWh e caso 6: 3750 kWh), poiché al diminuire della superficie trasparente si riduce anche il contributo passivo degli apporti solari. È interessante notare che la configurazione del componente con pannello di vetro aperto permette di ridurre del 5% il fabbisogno termico invernale. Per incrementare la prestazione invernale senza compromettere i risultati raggiunti nella valutazione del contributo dato al fabbisogno di energia primaria nei mesi estivi, potrebbe essere interessante in futuro valutare il contributo dell'adozione di materiali a cambiamento di fase traslucenti per tamponare i pannelli della componente opaca fissa e soprattutto del pannello mobile, nel quale nella soluzione proposta è stato alloggiato un vetro stratificato 4+4.

- Nei mesi estivi l'involucro dinamico garantisce ottime prestazioni in termini di riduzione del fabbisogno di energia primaria per il raffrescamento nella configurazione con pannello schermante aperto e collocato dinanzi alla partitura trasparente, con un fabbisogno della test room virtuale che si assesta intorno a 770,00 kWh, addirittura inferiori a quelli di una facciata in muratura tradizionale con finestra centrale (caso 1: 1100,00 kWh), e sicuramente meno elevati di quelli di una facciata monostrato in vetro e ad una doppia pelle trasparente con sistema schermante fisso (caso 4: 1500 kWh, caso 7: 895,00 kWh) o mobile (caso 5: 1527 kWh, caso 8: 899,00 kWh). Il pannello di schermatura mobile garantisce inoltre, rispetto alla stessa soluzione d'involucro senza sistema di ombreggiamento (caso 11: 2970 kWh), una riduzione di circa il 70% del fabbisogno di energia primaria dell'edificio per il raffrescamento.

In merito alle simulazioni condotte con il software Relux per valutare l'efficacia del componente di facciata dinamico in relazione alla riduzione dei consumi energetici legati all'illuminazione naturale, i risultati hanno dimostrato che la Smart Façade, caratterizzata da due aperture di dimensioni 1,50 x 3,00 m garantisce:

- buone prestazioni nei mesi estivi (con valori di illuminamento dell'ordine di 592 lux);
- prestazioni insufficienti nei mesi invernali quando alla superficie trasparente viene sovrapposto il pannello esterno in vetro i valori di illuminamento risultano insufficienti (con valori di illuminamento dell'ordine di 300 lux).

Risulta quindi fondamentale prevedere la collocazione di questo tipo di facciata in spazi rispetto ai quali sia possibile avere un'apertura finestrata contrapposta a quella del fronte in cui alloggia il componente e preferibilmente dotati di un sistema di controllo elettronico dell'illuminazione artificiale, che garantisca l'accensione dei corpi illuminati solo nelle zone della stanza che non sono raggiunte dalla radiazione solare diretta e che presentano insufficienti fattori di illuminamento.

Bibliografia

La ricerca è stata accompagnata da un'indagine bibliografica finalizzata a individuare le nuove tendenze nell'ambito dell'innovazione tecnologia dei componenti di involucro, progettati con l'obiettivo di interagire e ridurre il fabbisogno energetico degli edifici. In una prima fase di indagine generale, relativa al tema dell'architettura bioclimatica e del risparmio energetico, sono stati consultati manuali e testi topici con l'obiettivo di comprendere come le tematiche relative alle prestazioni di involucro abbiano accompagnato negli anni questo settore della ricerca architettonica. Siamo passati quindi alla lettura ed all'approfondimento di testi dedicati prevalentemente all'involucro a schermo avanzato o ben temperato ed ai sistemi di facciata complessi, focalizzando gli argomenti relativi al tema delle doppie pelli trasparenti ed ai materiali innovativi. La necessità di individuare i requisiti prestazionali ed essenziali necessari allo sviluppo di un concept di facciata innovativo e dinamico, ci hanno spinto ad analizzare articoli pubblicati su riviste scientifiche di settore relativi alla definizione dei parametri descrittivi delle doppie pelli trasparenti dinamiche. E' stato necessario fare riferimento prevalentemente a pubblicazioni e ricerche sviluppate in Germania e negli Stati Uniti, Paesi nei quali l'indagine scientifica legata a questi componenti di involucro è stata avviata e condotta in modo produttivo sin dagli anni novanta. Una parte dell'indagine bibliografica ha riguardato gli strumenti per la valutazione delle performance energetiche dei componenti di facciata doppia pelle, dovendo definire una metodologia di analisi e valutazione delle prestazioni delle facciate dinamiche e scegliere gli strumenti di simulazione e verifica adeguati.

I. Riferimenti bibliografici di carattere generale

AA. VV., *Libro bianco "Energia-ambiente- Edificio"*, Edizione il sole 24 ore, Milano, 2004

AA. VV., *Manuale di progettazione edilizia. Fondamenti, strumenti, norme*. Volume 2. criteri ambientali e impianti, Editore Ulrico HOEPLI, Milano, 1998

AA. VV., *Architectures for a sustainable planet. Zaragoza Kioto, Spain's Sociedad Estatal para Exposiciones Internacionales (SEEI)*, Saragozza, 2008

AA. VV., *Manuale pratico di edilizia sostenibile*, Esselibri, Napoli, 2008

AA. VV., *Rapporto Energia e Ambiente 2008*. Analisi e Scenari, ENEA, Roma, Settembre 2009,

BUTERA, F.M., *Architettura e ambiente*, Milano, ETASLIBRI, 1995

BEHLING ST., BEHLING SO., *Sol Power, La evolucion de la arquitectura sostenible*, Ed-

itorial Gustavo Gili, Barcellona 2002

FANGER P.O., *Thermal comfort*, Mc Graw Hill Book Company, New York, 1972

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

CIRIBINI G., *Tecnologia e progetto*, Celid, Torino, 1984

COSTA DURAN S., *Case ecologiche*, Logos, Modena, 2009

DEL NORD R., FELLI P., TORRICELLI M.C., *Materiali e Tecnologie dell'Architettura*, Laterza, Bari, 2005

DE PASCALIS S., *Progettazione Bioclimatica*, Dario Flaccovio Editore s.r.l, Palermo 2005

ENERGY RESEARCH GROUP, *Clime, nature and architecture*, James and James, Londra 1994

GANGEMI V. (a cura di), *Emergenza ambiente: teorie e sperimentazioni della progettazione ambientale*, Napoli, Clean edizioni, 2001

GIVONI B., *Man, climate and architecture*, Applied Sciences Publisher, London, 1971.

GONZALO R., HABERMANN, K. J, *Energy-efficient architecture. Basics for planning and construction*, Birkhauser, Basel – Boston – Berlin, 2006

HEGGER M., FUCHS M., STARK T., ZEUMER M., *Atlante della sostenibilità e della efficienza energetica degli edifici*, UTET, 2008

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

GRATIA E., DEHERDE A., *Solar Energy in European Office Buildings*, Altener publisher,

GROSSO M., *Il raffrescamento passive degli edifici in zone a clima temperato*, Maggioli Editore, 2008

LO SASSO M., *Architettura tecnologia e complessità*, Clean, Napoli 1991

MASERA G., *Residenze e Risparmio energetico*, Edizioni Il Sole 24 Ore, Milano 2004

T.A.MARKUS, E.N.MORRIS, *Buildings, Climate and energy*, Pitman, London, 1980

NARDI G., *Tecnologia dell'architettura e industrializzazione nell'edilizia*, Franco Angeli, Milano, 1982

NARDI G., CAMPIOLI A., MANGIAROTTI A., *Frammenti di coscienza tecnica. Tecniche esecutive e cultura del costruire*, Franco Angeli, Milano, 1994

NASTRI M., *La costruzione dell'architettura. Strumenti e procedure operative per l'elaborazione del tecnica del progetto*, Franco Angeli, Milano, 2009

OLGYAY, V., *Progettare con il clima. Un approccio bioclimatico al regionalismo architettonico*, Franco Muzzio Editore, Padova, 1981

PEGUIRON G., *Il progetto esecutivo in architettura*, in LA CRETA R. E TRUPPI C. , (a cura di), *L'architetto tra tecnologia e progetto*, FrancoAngeli, Milano, 1994

PESTILENZA PUGLISI L., *Hiper Architettura. Spazi nell'età dell'elettronica*, Universale di Architettura, Testo & Immagini, Torino, 1998

PESTILENZA PUGLISI L., *Silenziose avanguardie. Una storia dell'architettura 1976-2001*, Testo & immagine, Torino, 2001

PESTILENZA PUGLISI L., *This is Tomorrow*, Controsegna, Testo & Immagini, Torino, 1999

RICHARZ C., SCHULZ C., ZEITLER F., *Energy-Efficiency Upgrades Energy: principles, details, examples*, Detail – Birkhauser, Monaco, 2007

SALA M., (a cura di) *I percorsi della progettazione per la sostenibilità ambientale*, Alinea editrice, Firenze, 2004

SCHITTICH C., (a cura di) *Involucri edilizi. Progetti, strati funzionali, materiali.*, Detail – Birkhauser, Monaco – Basilea, 2003

SZIGETI F., DAVIS G., *Performance Based Building: Conceptual Framework*, CIBdf, The Netherlands, 2005

WIENKLE U., *Aria Calore Luce. Il comfort ambientale negli edifici*, DEI Tipografia del Genio Civile, Roma, 2005

WIENKLE U., *Manuale di Bioedilizia*, DEI Tipografia del Genio Civile, Roma, 2004

II. Riferimenti bibliografici di carattere specifico

AA. VV., *Ove Arup & partners*, Arup, London, 1994

AA.VV., *NEXT- Mostra internazionale di Architettura 2002*, Marsilio, Venezia, 2002

AGHEMO C., AZZOLINO C., *Il progetto dell'elemento di involucro opaco*, Torino, CELID, 1996

ALAGNA A., *Tecnologie per le forme dell'architettura contemporanea. I sistemi di chiusura: qualità ed efficienza energetica*, Alinea, Firenze, 2007

ALDOMONTE S., *L'involucro architettonico come interfaccia dinamica. Strumenti e criteri per un'architettura sostenibile*, Editrice Alinea, Firenze, 2004

ATKIN B., *Intelligent Buildings: applications of IT and Building Automation to High Technology Construction Projects*, Kogan Page, 1988

BANHAM R., *The Architecture of the Well – Tempered Environment*, Architectural Press, Londra, 1969

BBRI, *Source book for a better understanding of conceptual and operational aspects of active facades*, Department of Building Physics, Indoor Climate and Building Service, Belgian Building Research Institute, 2002

CAPASSO A., *Architettura e leggerezza*, Maggioli, Rimini, 1998

CECCHERINI NELLI L., *Fotovoltaico in architettura*, Alinea, Firenze, 2006

CECCHERINI NELLI L., *Schermature Fotovoltaiche*, Alinea, Firenze, 2007

CECCHERINI NELLI L., D'AUDINO E., TROMBADORE A., *Schermature solari*, Alinea, Firenze, 2007

CLAYTON D., CHATA A., *Building Automation Systems Worldwide Outlook*, ARC Advisory Group

CHAMPAGNE C., *Computational fluid dynamics and double skin facades*, Assignment for the architectural Engineering Computer Labs, Pennsylvania State Institute, USA, 2002

CLAUDI DE SAINT MIHIEL A., *Superfici mutevoli. Tecnologie innovative per involucri trasparenti a prestazioni variabili*, Clean, Napoli, 2007

COLAFRANCESCHI D., *Sull'involucro in architettura: Herzog, Nouvel, Perrault, Piano, Prix, Suzuki, Venturi, Wines*, Librerie Dedalo, Roma, 1996

COLAFRANCESCHI D., *Architettura in superficie. Materiali, figure e tecnologie delle nuove facciate urbane*, Gangemi Editore, Roma, 1995

COMPAGNO A., *Intelligent Glass Façades - Material, Pratiche, Design*, Arthemis Verlags – AG, Basilea, 1995

COPPA A., *Facciate a secco*, Federico Motta Editore, Milano 2006

FILIPPI M., *L'involucro edilizio: passivo, attivo o ibrido?, da Progettare l'involucro edil-*

izio: correlazioni tra il sistema edificio ed i sistemi impiantistici, Aicarr, 2001

FLAMANT G., HEIJMANS N., GUIOT E., *Determination of the energy performances of ventilated double facades by the use of simulation integrating the control aspects. Modelling aspects and assessment of the applicability of several simulation software*, Belgian Building Research Institute, 2004

FRANCO G., *L'involucro edilizio. Guida alla progettazione e manutenzione delle chiusure verticali portanti e portate*, EPC LIBRI, Roma, 2003

HARRISON K. & MEYER-BOAKE T., *The Tectonics of the Environmental Skin*, University of Waterloo, School of Architecture, 2003

HERZOG, T., KRIPPNER, R., LANG, W., *Atlante delle facciate*, Utet, Torino, 2005

HODGE, B., (a cura di) *Skin+Bones. Parallel practices in fashion and architecture*, Thames & Hudson, 2006

HUIZENGA C., ZHANG H., MATTELAER P., YU T., ARENS E., LYONS P., *Window performance for human thermal comfort*, Final Report To The National Fenestration Rating Council, University Of California, Berkeley, February 2006

KALTENBACH F. A (cura di), *Trasparenze, vetri, plastiche e metalli*, UTET Scienze Tecniche, Torino, 2007

KLICZKOWSKI H., *Guggenheim. Bilbao*, Onlybook S.L., Madrid, 2003

KÖNIG O., "Pelle", in *Christoph Wulf, a cura di, Cosmo, Corpo, cultura, enciclopedia antropologica*, Bruno Mondadori, Milano, 2002

KOOLHAAS R., (a cura di), *Mutations, catalogo della mostra Mutations*, Arc en Reve, Bordeaux, Actar, 2001

KOSTER H., *Dynamic daylighting architecture. Basics, systems, project*, Birkhauser, Basel – Boston – Berlin, 2004

KWINTER S., *Dynamic Forces. COOP Himmelb(L)au. BMW Welt Munich*, Edizioni Prestel, Munich, 2007

JODDIO P., *Building a new millennium*, Taschen, 2000

JONES D. L., HUDSON, J., *Architecture and the environment. Bioclimatic building design*, Laurence King Publishing, London, 1998

LAVAGNA M., *Sostenibilità e Risparmio energetico, soluzioni tecniche per involucri eco-efficienti*, Clup, Milano, 2006

LECUYER A., *EFTE. Technology and Design*, Birkhauser Verlag AG, Basel, Boston, Berlin, 2008

LEE E., SELKOWITZ S., BAZJANAC V., INKAROJRIT V., KOHLER C., *High-Performance Commercial Building Façades, Building Technologies Program, Environmental Energy Technologies Division*, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley, Giugno 2002

LONCOUR X., DENEYER A., BLASCO M., FLAMANT G., WOUTERS P., *Ventilated Double Facades. Classification and illustration of façade concepts*, Belgian Building Research Institute, 2004

LÉVY P., *L'intelligence collective. Pur une antropologie du cyber space*. La Découverte, Parigi, 2000

LIBESKIND D., *Between the lines*, Prestelm, Munich, 1991

MELLO P., *Ito digitale. Nuovi media, nuovo reale*, EdilStampa, Roma, 2008

MVRDV, *Metacity Datatown*, Olo Publishers, Rotterdam, 1999

NERI P., (a cura di), *Verso la valutazione ambientale degli edifici. Life Cycle Assessment a supporto della progettazione eco-sostenibile*, Alinea, Firenze, 2007

OESTERLE L., LUTZ H., *Double-Skin facades: integrated planning*, Prestel, Munich – London – New York, 2001

OOSERIUS K., *Ipercorpi. Verso un'architettura E-motiva*, Edilsatmpa, Roma, 2007

PAWLEY M., *Norman Foster. Architettura globale*, (traduzione di F. PERACCHINI E M. GIONI), Rizzoli, Milano, 1999

PIANO M., *Energie rinnovabili e domotica*, Franco Angeli Editore, Milano, 2008

POIRAZIS H., *Double Skin facades for office buildings, Division of Energy and Building Design, Department of Costruction and Architecture*, Lund Institute of Technology, Lund University, 2004

QUARANTA G.G., *La domotica per l'efficienza energetica delle abitazioni*, Maggioli Editore, San Marino, 2009

READ, *European Charter for Solar Energy in Architecture and Urban Planning*, Berlino, Marzo 1996

ROGERS R., *Cities for a small placet*, Faber and Faber, London, 1997

SCHITTICH C., STAIB G., BALKOW D., SCHULER M., SOBEK W., *Glass Construction Manual*, Birkhäuser Edition Detail, Basel, Boston, Berlin, 2007

SCHITTICH C., (a cura di), *Involucri edilizi – Progetti, Strati funzionali, Materiali*, Birkhäuser Edition Detail, Basilea, 2003

SCHITTICH C., (a cura di), *Solar architecture: strategies, visions, concepts*, Birkhäuser Edition Detail, Basilea, 2003

SCHULTZ D., *Global Creative Architecture*, Liaoning Science and Technology Press, Singapore, 2008

SLESSOR, C., *Sustainable Architecture and High Technology*, Thames and Hudson, Londra, 1997

STEC, W., A.H.C. *Integration of the double skin facades with the building, energy in built environment, energy technology*, TU Delft, Delft, the Netherlands, 2000

TSCHUMI B., *Architecture and Disjunction*, MIT press, Cambridge Mass., 1996

TUCCI F., *Involucro Ben Temperato*, Alinea, Firenze, 2006

TRAVI V., *Advanced Technologies*, Birkhauser, Basilea 2001

VENTURI R., *Iconography and electronics upon a generic architecture. A view from the drafting room*, MIT press, Boston, 1997

WATERS J. K., *Blobitecture: Waveform and Organic Design*, Rockoport, Gloucester, 2003

WIGGINTON M., HARRIS J., *Intelligent Skyns*, Architectural Press, Oxford, 2002

III. Articoli su Riviste di Settore

AA. VV., *Edifici ed energia*, in Arketipo n. 24, Giugno 2008

AA. VV., *Materie Complesse*, in Materia n. 58, Giugno 2008

AA. VV., *Nuovi involucri*, in Arketipo n. 21, Marzo 2008

ACHILLES A., *Vetro colorato: produzione, lavorazioni e regole di progettazione*, in Detail 1/2, 2007

ALIOTTI E., BIANCHI L., RIGONE P., *Le facciate a doppia pelle*, Quadra tecnica 8/98

ANDREOTTI G., ALBANESE S., *Specchio delle mie brame...*, in Modulo n. 252, Giugno 1999

ARCHEA ASSOCIATI, *La pelle dell'edificio come sistema spaziale*, in Detail n. 10, 2008

AGHENO C., *I problemi del tutto vetro*, in Modulo n. 281, Maggio 2002

BALLARE' S., *Architetture di vetro e metallo*, in Modulo n. 270, Aprile 2001

BALLARE S., *Ad ogni vetrata il suo fissaggio*, in Modulo n. 302, Giugno 2004

- BEGUINOT C., *L'architettura è intelligente se è capace di (inter)connettere*, in *Telèma* 15, inverno 1998/1999
- BEHLING S., FUCHS A., VOLZ T., *Architettura solare- Ricerca e sviluppo*, in *Detail* 6, 2007
- BIANCHETTI F., *Saper costruire l'innovazione dell'involucro*, Faenza Industrie Grafiche, Faenza, 2008
- BIANCHI R., *Tecnologie e sistemi in chiave energetica*, in *Modulo* n. 345, Ottobre 2008
- BRIVIO S. F., *Dispositivi Schermanti*, in *Arketipo* n. 33, Maggio 2009
- CONATO F., *La tecno-architettura delle facciate*, in *Modulo* n°303, Luglio-Agosto 2004
- CULTRONI F., *Costruire la trasparenza*, in *Materia* n. 56, Dicembre 2007
- DAVIES M., *A Wall for all Seasons*, *RIBA Journal*, Vol. 88, n. 2, February, 1981.
- DIETRICH S., *Costruire per la sostenibilità*, in *Detail* 6, 2007
- EISENMAN P., *Vision Unfolding: Architecture in the age of electronic media*, in *Domus*, n. 734, 1992
- GIBERTI, M., *Pelle come involucro. Pelle come interfaccia*, in *Materia* n. 55, *Involucri*, settembre 2007
- GILES H., HEE KIM K., *Transparent façade panel typologies based on hybrid Bio-composite and recyclable polymer materials*, *ARCC Journal*, Maggio 2007
- IANNACCONI G., *Bubbles e Sponges. Come in natura*, in *Modulo* n. 342, Giugno 2008
- IMPERADORI M., *Inerzia termica senza massa?*, *Frames* in 143, novembre - dicembre 2009
- ITO T., *Gardens of microchips: the architectural image of the microelectric age*, in *JA Library* 2, 1993
- ITO T., *L'immagine dell'architettura nell'era dell'elettronica*, in *Domus*, n. 800, 1998
- ITO T., *Tarzan in the media forest*, in *2G* n.2, pp.123,142
- IODICEARCHITETTI, *Utilizzo etico dei materiali*, in *Detail* 5, 2009
- KOSTER H., *Sistemi retro per la gestione energetica della facciata*, in *Casa e Clima* n. 14, settembre 2008
- KOOLHAAS R., *Alla ricerca del nuovo modernismo*, in *Domus*, n. 800, 1998

KRUEGER T., *Like a second skin: living machines*, Architectural Design, Vol. 66, N. 9/10, March/April, 1994.

LATORRE C., *La finestra? Bella, multifunzionale e hi-tech*, in Case e Clima n.15, ottobre 2008

MANCINI R., *Progettare l'involucro*, in Materia 55, Involucri, Settembre 2007

MARTELLOSIO S., *Valutare il sistema vetrocamera*, in Casa e Clima n. 21, ottobre 2009

NARDI G., *La cultura dell'innovazione*, in l'Almanacco dei materiali dell'architettura, supplemento all'Arca, n. 100, 1994

PERCOCO M., *Alterazioni di trasparenza*, in Materia n. 56, Dicembre 2007

PRATI A., *Energia...integrata*, in Modulo n. 345, Ottobre 2008

RICHARD S., *Building Automation using high-voltage technology*, in Detail Green n.2, 2009

RIGONE P., *Una stella come progetto di trasparenza*, in Quadra n. 01, Marzo 2006

ROGERS R., *Pensare e costruire per parti*, In Domus n. 754, 1993

RUSSO ERMOLLI S., *Sheppard Robson*, in Modulo n. 344, Settembre 2008

SCHAEFFER O., *Architettura in movimento: tra ludiche scenografie e costruzioni efficienti*, in Detail 12, 2009

SCHITTICH C., *Vetro, un materiale versatile*, Detail 7/8, 2009

SERRA V., D'ADDERIO L., FILIPPI A., *Trasparenza variabile*, in Modulo n. 205, ottobre 1994

SARTO L., *Cablaggio ed edificio "intelligente"*, in Modulo n. 281, Maggio 2008

TRABUCCO D., *Pelle ed energia*, in Modulo n. 340, aprile 2008

TUCCI F., *Thomas Herzog*, in Modulo n. 302, giugno 2004

VAN UFFELEN C., *Materiali per l'architettura contemporanea. Vetro*, Motta Architettura Editore, 2009

IV. Tesi di dottorato

ALFARANO G., *Le variabili della trasparenza variabile*, Dott. Di Ricerca in Tecnologia X Ciclo, Firenze,

ANDREOTTI G., *Genesi e generazione delle facciate a doppio involucro. analisi criti-*

ca dei sistemi disponibili in riferimento allo stato attuale delle conoscenze, Dottorato Di Ricerca in Tecnologia XIV Ciclo, Università degli Studi di Firenze

CLAUDI DE SAINT MIHIEL A., *Superfici mutevoli. Le tecnologie innovative dei vetri Cromogenici per il progetto di involucri a prestazioni variabili*, Dottorato In Tecnologia e Rappresentazione dell'architettura e Dell'ambiente XVIII Ciclo, Università degli Studi di Napoli

CORSETTI M., *Mediabuilding. L'evoluzione degli edifici multimediali conseguentemente all'avanzamento delle modalità di informazione, gestione e controllo attraverso i sistemi tecnologici avanzati*, Dottorato di ricerca in Progettazione Ambientale XVIII ciclo. Università degli Studi di Roma "La Sapienza"

HAASE M., *Double-skin facades for Hong Kong*, Dipartimento di architettura, Università di Hong Kong, Luglio 2008

MANZOTTI S., *Materiali dell'architettura: Metamorfosi, Trasformazioni e Interazioni*, Dottorato di Ricerca in Tecnologia XVIII Ciclo, Università degli Studi di Firenze

MADEO F., *L'uso del vetro in architettura. Attuali orientamenti delle forme più evolute di tecnologia del vetro. Strategie di applicazione*, Dottorato In Tecnologia dell'Architettura e dell'Ambiente XV ciclo, Consorzio Politecnici di Milano e Torino – Università degli Studi di Napoli e Genova

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*, Dottorato di ricerca in Tecnologia dell'Architettura XXI Ciclo, Università degli Studi di Napoli "Federico II".

SAELENS D., *Energy performance assessment of single storey multiple-skin facades*, Katholieke Universiteit Leuven, Faculteit Toegepaste Wetenschappen, Departement Burgerlijke Bouwkunde, Laboratorium Bouwfysica, Kasteelpark Arenberg 51, B-3001 Leuven, Settembre 2002

VILLALTA M., *L'efficienza energetica dell'involucro edilizio assemblato a secco per climi caldo – umidi. Criteri di progettazione, tecnologie e sistemi costruttivi*, Dottorato di Ricerca in Tecnologia XXI Ciclo, Università degli Studi di Firenze

V. Articoli su pubblicazioni scientifiche

Lemma, AVELLANEDA J., GONZALEZ J.M., CARBONNEL A., D. LÓPEZ, *A sustainable technical system for ventilated façades*, Portugal SB07. Sustainable Construction, Materials and Practices: Challenge of the Industry for the New Millennium. Lisbona: IOS Press, Vol. 1, 2007

Lemma, G. BALDINELLI, *Double skin façades for warm climate regions: Analysis of a solution with an integrated movable shading system*, Building and Environment, Volume 44, Issue 6, June 2009, Pag. 1107-1118

Lemma, B. BAROZZI, L. DANZA, R. LOLLINI, I. MERONI, M. ORLANDI, *Valutazione delle prestazioni di un sistema di involucro dinamico*, atti del seminario "Ricerca e innovazione nel settore costruzioni", PTIC Piattaforma tecnologica delle costruzioni – seminario, 3 maggio 2007, Bologna, pp. 60 – 65

Lemma, CARDOSO D., MICHAUD D., SASS L., *Soft Façade: Steps into the Definition of a Responsive ETFE Façade for High-rise Buildings*, eCAADe 25 FH Wiesbaden and FH Frankfurt, Settembre 2007

Lemma, DE BARTOLOMEIS W. L., *Edifici sensoriali e adattivi: prodotti, processi e materiali industriali al servizio dell'architettura*, in *La produzione industriale eco-orientata*, a cura di Antonio Passaro, Atti del Convegno Abitare Verde 2007, Luciano Editore, Napoli, 2007

Lemma, DOEBBER I., MCCLINTOCK M., *Analysis Process For Designing Double Skin Facades And Associated Case Study*, Proceedings of SimBuild 2006, held at MIT in Cambridge, Mass., August 2-4, 2006

Lemma, CLAUDI DE SAINT MIHIEL A., *Interattività degli involucri edilizi trasparenti e prestazioni di benessere ambientale*, in *La produzione industriale eco-orientata*, a cura di Antonio Passaro, Atti del Convegno Abitare Verde 2007, Luciano Editore, Napoli, 2007

Lemma, D'ALENÇON CASTRILLÓN R., *Integration of Active and Passive Systems in Glass Façades*, 8th International Conference on Sustainable Energy Technologies, Aachen, Germany, August 31st to 3rd September 2009

Lemma, EICKER U., FUXA V., BAUER U., MEI L., INFELD D., *Facades and summer performance of buildings*, Energy and Buildings 40, 2008, 600–611

Lemma, FIORITO F., FUZIO G., *L'involucro edilizio. Evoluzione della progettazione e del processo realizzativi*, Atti del convegno "Involucro edilizio. Innovazione e sostenibilità", Bari 24 Aprile 2004

Lemma, FLAMANT G., LONCOUR X., WOUTERS P., *Performance Assessment of active Facades in Outdoor Test Cells*, AIVC 23rd conference - EPIC 2002 AIVC (in conjunction with 3rd European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings) - 23-26 October 2002 - Lyon - France - vol 2

Lemma, GONZÁLEZ M., BLANCO E., LUIS RÍO J., PISTONO J., SAN-JUAN C., 447: *Numerical study on thermal and fluid dynamic behaviour of an open-joint ventilated façade*, PLEA 2008 – 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Dublin, 22nd to 24th October 2008

GRATIA E., DE HERDE A., *Are energy consumptions decreased with the addition of a double-skin?*, Energy and Buildings, Volume 39, Issue 5, May 2007, Pages 605-619

Lemma, HAMZA N., *Double versus single skin facades in hot arid areas*, Energy and Buildings 40 (2008) 240–248

Lemma, HADDEN D., LEE A., *The role of External Façade in Protecting Building Occupants against Terrorism and Impacts*, Material Science and Technology in Engineering Conference 2005, Hong Kong, 26-28 May 2005.

Lemma, HAASE M., AMATO A., *Development of a double-skin facade system that combines airflow windows with solar chimneys*, The 2005 World Sustainable Building Conference, Tokyo, 27-29 September 2005

Lemma, HAASE M., AMATO A., *Ventilated façade design in hot and humid climate*, PLEA2006 - The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland, 6-8 September 2006

Lemma, HAMMAD F. ABU-HIJLEH B., *The energy savings potential of using dynamic external louvers in an office building*, in *Energy and Buildings. An international journal devoted to investigations of energy use and efficiency in buildings*, v. 42, pag. 1888 1895, ELSEVIER, 2010

Lemma, HENSEN J., BARTAK M., DRKAL F., *Modeling and Simulation of a Double-Skin Façade System*, in *ASHRAE Transactions*, Vol 108, Part 2., 2002

Lemma, HOLMES M., PILGRIM M., *Natfac: a simple Tool for the comparison of options for a double skin façade*, *Facade design and procurement* - 2003

Lemma, JÜRGENS J., DESAI V., ASCHENBRENNER P., ANTHONY O. PEREIRA, *Building Integrated Facades In New York, Using High Efficient Back Contact Solar Cells*, IEEE 4th WCPEC, May 7-12, 2006, Waikoloa, Hawaii

Lemma, IMPERATORI M., *Phase Change materials in concrete building elements: performances characterisation*, *Atti del XXX IAHS World Congress on Housing*, Coimbra, Settembre 2002.

Lemma, IMPERATORI M., *Materiali a cambiamento di fase per l'incremento dell'inerzia termica nelle costruzioni leggere*, *atti del convegno costruire l'architettura: i materiali, i componenti, le tecniche*, Luciano Editore, Napoli, Ottobre 2001.

Lemma, YUAN S., CHEN LIN CHIU M., *Designing Smart Skins for Adaptive Environments. A fuzzy logic approach to smart house design*, in *Computer-Aided Design & Applications*, Vol. 4, No. 6, 2007, pp 751-760

Lemma, YUAN Y., ZENG J., ZHU Y., LIN B., *A Lumped Model Of Double Skin Facade With Cavity Shading*, in *Building Simulation 2007*

Lemma, KRAGH M., *Building envelopes and environmental systems*, Paper presented at *Modern Facades of Office Building Delft Technical University*, the Netherlands, 2000

Lemma, KRAGH M., *Monitoring of Advanced Facades and Environmental Systems, The whole-life performance of facades*, University of Bath, CWCT, Bath, UK, 18/19 April 2001.

Lemma, KOKOGIANNAKIS G., STRACHAN P., *Modelling of double ventilated Façades according to CEN Standard 13790, method and detail simulation*, 2nd PALENC Conference and 28 th AIVC Conference on Building Low Energy cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century, September 2007, Crete Island, Greece

Lemma, MARDALJEVIC J., *Electrochromic glazing and facade photovoltaic panels: a strategic assessment of the potential energy benefits*, Lighting Res. Technol. Vol. 40, No. 1, pp. 55-76, 2008

Lemma, PAPAMICHAEL K., PROTZEN J.P., *The limits of intelligence in design*, in Proceedings of the 4th International Symposium on system Research, Informatics and Cybernetics, Germania, Agosto, 1993

Lemma, PARK C., AUGENBROE G., MESSADI T., *Daylighting optimization in smart façade systems*, in Eighth International IBPSA Conference Eindhoven, Netherlands, August 11-14, 2003, pp 1001-1008

Lemma, RADHI H., *Energy analysis of façade-integrated photovoltaic systems applied to UAE commercial buildings*, Solar Energy Volume 84, Issue 12, December 2010, Pages 2009-2021

Lemma, ROSSI M., *Metodologie di sviluppo e di valutazione nella produzione industriale di sistemi di involucro ad alta efficienza energetica*, in La produzione industrial eco-orientata, a cura di Antonio Passaro, Atti del Convegno Abitare Verde 2007, Luciano Editore, Napoli, 2007

Lemma, SAELENS D., CARMELIET J., AND HENS H., *Energy Performance Assessment of Multiple Skin Facades*, International Journal of HVAC&R Research., vol. 9, nr. 2, pp.167-186, 2003

Lemma, SÁENZ-DÍEZ MURO J.C., BLANCO BARRERO J.M., JIMÉNEZ MACÍAS E., PÉREZ DE LA PARTE M., LATORRE BIEL J.I., *System of Photovoltaic Solar Electric Power for Buildings: "Solar facade with variation of the β -angle"*, International Conference On Renewable Energy And Power Quality, Valencia, Marzo 2007

Lemma, SAFER N., WOLOSZYN M., ROUX J. J., RUSAOUËN G. AND KUZNIK F., *Modeling Of The Double-Skin Facades For Building Energy Simulations: Radiative And Convective Heat Transfer*, Building Simulation 2009, Ninth International IBPSA Conference Montréal, Canada August 15-18, 2005

Lemma, SEDLÁK J., MRÁČEK P., *Simulation of the double facade in the Brno Metropolitan library*, Dynastee 2005 Scientific Conference, 12-14 October, Athens, Greece, 2005

Lemma, SELKOWITZ S., *Integrating Advanced Façades into High Performance Buildings*, 7th International Glass Processing Days June 18-21, 2001 in Tampere, Finland

Lemma, SELKOWITZ S., ASCHEHOUG Ø., S. LEE E., *Advanced Interactive Facades – Critical Elements for Future Green Buildings?*, GreenBuild, the annual USGBC Interna-

tional Conference and Expo, Novembre 2003, pp 1-12

Lemma, SELKOWITZ S.E., LEE E.S., ASCHEHOUG Ø., *Perspectives on Advanced Facades with Dynamic Glazings and Integrated Lighting Controls*, in CISBAT 2003, Innovation in Building Envelopes and Environmental Systems International Conferences on Solar Energy in Buildings, October 8, 2003, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland.

TORCELLINI P., PLESS S., DERU M., *Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition*, Proceedings of the 2006 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, August 13-18, 2006 in Pacific Grove, California

Lemma, VALENTINI F., LOLLINI R., MERONI I., POLLASTRO C., *Serramento domestico a permeabilità e fattore solare variabile*, atti del seminario "Ricerca e innovazione nel settore costruzioni", PTIC Piattaforma tecnologica delle costruzioni – seminario, 3 maggio 2007, Bologna, pp. 55 – 58

Lemma, WHITE A., HOLMES M., *Advanced Simulation Applications Using Room*, Building Simulation conference , 2009

VI. Riferimenti sitografici

www.anshen.com
www.architonic.com
www.arup.com
www.bath.ac.uk/cwct/cladding_org/home.htm
www.bau-muenchen.de
www.bbri.be/activefacades/new/content/1_home/en.html
www.bcj.com
www.behnisch.com
www.building_integrated.it
<http://buildingskins.blogspot.com/>
www.bre.co.uk/directions
<http://bt.mit.edu/>
www.cbe.berkeley.edu/index.htm
<http://cba.mit.edu/events/07.05.energy>
www.chrisbosse.com
<http://cic.nist.gov>
www.cibworld.nl/website
www.civil.uwaterloo.ca/BEG/
www.climalit.it
www.cnr.it/sitocnr/home.html
www.coltgroup.com
www.cstb.fr
www.cwct.co.uk
www.double_skins_frames.com
www.ecaade.org/
www.ecobuilding-club.net/
www.ecobuild-project.org

www.ectp.org
<http://eetd.lbl.gov>
www.energy.soton.ac.uk
www.es-so.com
<http://escholarship.org/uc/item/7p96804v#page-1>
www.facciateventilate.it
www.fosterandpartners.com
<http://gaia.lbl.gov/hpbf/main.html>
www.glasstec-online.com
www.grantadesign.com
www.greenarch.hku.hk
www.greenpix.org
<http://grbes.phys.uoa.gr>
www.jourda-architectes.com
www.ibuilding.gr/definitions.html
www.intelligentbuildings.com/
www.ltlarchitects.com
www.luav.it/homepage/artec
www.icrepq.com/
www.intendesign.com/
www.learn.londonmet.ac.uk
www.lbl.gov
www.materia.nl
<http://web.mit.edu>
www.matech.it
www.materialconnexion.com
www.materioteca.com
www.merlo.it
www.metraarchitettura.it
www.myglaverbel.com
<http://nceub.org.uk>
www.nfrc.org/
www.okalux.de
www.paramodern.com
www.pebbu.nl
www.permasteelisa.com
www.pilkington.com
www.pleotint.com
www.powerfilmsolar.com
www.ptw.com.au/index.html
www.reeep.org/31/home.htm
www.rsh-p.com/rshp_home
www.russellbridge.co.uk
www.saint-gobain-glass.com
www.schueco.it
www.serex.it
www.sgp-architects.com
www.sharp.it
www.smart-eco.eu

www.squintopera.com
www.schwarz-architektur.ch/
www.tech.plym.ac.uk
<http://thecloud.ws>
www.uncsaal.it
www.univ-lr.fr/labo/leptab
www.upc.es/aie
www.wbdg.org/design/env_fenestration_cw.php
www.velux.it
<http://web.mit.edu/>
www.windowmaster.com
<http://windows.lbl.gov/>
www.wipo.int/pctdb/en

VII. Normativa di riferimento

La ricerca si riallaccia al settore scientifico disciplinare legato allo sviluppo ed alla proposizione di sistemi tecnologici innovativi capaci di rispondere alle richieste del mercato conseguenti, in tutti gli stati europei, al recepimento della Direttiva 2002/91 CE, Energy Performance Directive Building. Dopo un primo momento di analisi relativo ai riferimenti normativi internazionali in materia di risparmio energetico nel settore delle costruzioni, abbiamo focalizzato la nostra attenzione sulla normativa nazionale, analizzando la recente legislazione sull'efficienza energetica degli edifici, conseguente al DLgs. 192/2005, e sulle norme UNI adottate nel nostro paese in riferimento alle definizioni delle prestazioni dell'involucro architettonico, delle facciate continue, degli infissi e del vetro.

Direttive Europee

Direttiva Europea 89/106/CEE del 21 dicembre 1988
 Ravvicinamento delle disposizioni legislative, regolamentari e amministrative degli Stati membri concernenti i prodotti da costruzione

Direttiva Europea 93/76/CEE del 13 settembre 1993
 intesa a limitare le emissioni di biossido di carbonio migliorando l'efficienza energetica (SAVE)

Direttiva Europea 2001/77/CE del 27 settembre 2001
 sulla promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno dell'elettricità

Direttiva Europea 2002/91/CE del 16 dicembre 2002
 sul rendimento energetico nell'edilizia

Direttiva Europea 2006/32/CE del 5 aprile 2006
 relativa all'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e abrogazione della direttiva 93/76/CEE.

Legislazione nazionale

Legge 373/76

Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici.

Legge 10/91

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

Legge 47/1995, 4

Legge quadro sull'inquinamento acustico

D.lgs. 192/2005

Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia

D.lgs. 311/2006

Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia

D. M. del 5 luglio 1975

Modificazioni alle istruzioni ministeriali 20 giugno 1896 relativamente all'altezza minima ed ai requisiti igienico sanitari principali dei locali d'abitazione

D. M. 26 giugno 2009

Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici

D. P. R. 2 aprile 2009 n. 59

Regolamento che definisce le metodologie di calcolo e i requisiti minimi per la prestazione energetica degli edifici e degli impianti termici, emanato in attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del Dlgs 192/2005

D.P.C.M. 5 dicembre 97

Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici

Normativa tecnica di riferimento

UNI 8369-2:1987, Edilizia. Pareti perimetrali verticali. Classificazione e terminologia.

UNI 7959: 1988

Edilizia. Pareti perimetrali verticali. Analisi dei requisiti.

UNI 8290-1:1981 + A122:1983, Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia. 01/09/1981

UNI 8290-2:1983, Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Analisi dei requisiti, 30/06/1983

UNI 7357:1974+A101:1983+A83:1979+A3:1989, Calcolo del fabbisogno termico per il

riscaldamento di edifici, 01/12/1974

UNI EN 832:2001, Prestazione termica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento - Edifici residenziali, 30/06/2001

UNI 10349:1994, Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici.

UNI 10339:1995, Impianti aeraulici al fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura

UNI EN ISO 7345:1999, Isolamento termico - Grandezze fisiche e definizioni, 31/07/1999

UNI EN ISO 9288:2000, Isolamento termico - Scambio termico per radiazione - Grandezze fisiche e definizioni, 2000

UNI EN ISO 10211-1:1998, Ponti termici in edilizia - Flussi termici e temperature superficiali - Metodi generali di calcolo, 31/12/1998

UNI EN ISO 10211-2:2003, Ponti termici in edilizia - Calcolo dei flussi termici e delle temperature superficiali - Ponti termici lineari, 01/05/2003

UNI 10351:1994, Materiali da costruzione. Conduttività termica e permeabilità al vapore, 31/03/1994

UNI EN ISO 9251:1998, Isolamento termico - Condizioni di scambio termico e proprietà dei materiali - Vocabolario, 31/12/1998

UNI 10375:1995, Metodo di calcolo della temperatura interna estiva degli ambienti, 30/06/1995

UNI 10379:2005, Riscaldamento degli edifici - Fabbisogno energetico convenzionale normalizzato, 01/07/2005

UNI EN ISO 13788:2003, Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia - Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e condensazione interstiziale - Metodo di calcolo, 01/06/2003

UNI EN ISO 13789:2001, Prestazione termica degli edifici - Coefficiente di perdita di calore per trasmissione - Metodo di calcolo, 31/03/2001

UNI EN ISO 13790:2005, Prestazione termica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento, 01/04/05

UNI 9983:1992, Rivestimenti dell'alluminio e sue leghe. Verniciatura. Requisiti e metodi di prova

UNI 10681:1998, Alluminio e leghe di alluminio - Caratteristiche generali degli strati di ossido anodico per uso decorativo e protettivo

UNI EN ISO 10077-1:2002, Prestazione termica di finestre, porte e chiusure - Calcolo della trasmittanza termica - Metodo semplificato

UNI EN ISO 10077-1:2007, Prestazione termica di finestre, porte e chiusure oscuranti - Calcolo della trasmittanza termica - Parte 1: Generalità

UNI EN ISO 10077-2:2004, Prestazione termica di finestre, porte e chiusure - Calcolo della trasmittanza termica - Metodo numerico per i tela

UNI EN 12412-2:2004, Prestazione termica di finestre, porte e chiusure - Determinazione della trasmittanza termica con il metodo della camera calda - Telai

UNI 4522:1966, Rivestimenti per ossidazione anodica dell' alluminio e delle sue leghe. Classificazione, caratteristiche e collaudo

UNI 4522:1966, Rivestimenti metallici. Metodi di prova per rivestimenti elettrolitici di argento e di leghe di argento. Determinazione dello spessore del rivestimento.

UNI 4522:1966, Rivestimenti metallici. Metodi di prova per rivestimenti elettrolitici d' argento e di leghe d' argento. Prove di aderenza

UNI 4522:1966, Rivestimenti metallici. Metodi di prova per rivestimenti elettrolitici di argento e di leghe di argento. Determinazione della presenza di sali residui

UNI EN 12207:2000, Finestre e porte - Permeabilità all'aria - Classificazione

UNI EN 1026:2001, Finestre e porte - Permeabilità all'aria - Metodo di prova

UNI EN 12208:2000, Finestre e porte - Tenuta all'acqua - Classificazione

UNI EN 1027:2001, Finestre e porte - Tenuta all'acqua - Metodo di prova

UNI EN 12210:2000, Finestre e porte - Resistenza al carico del vento - Classificazione

UNI EN 12211:2000, Finestre e porte - Resistenza al carico del vento - Metodo di prova.

UNI 3952:1998, Alluminio e leghe di alluminio - Serramenti di alluminio e sue leghe per edilizia - Norme per la scelta, l'impiego ed il collaudo dei materiali

UNI EN 14501:2006, Tende e chiusure oscuranti - Benessere termico e visivo - Caratteristiche prestazionali e classificazione

UNI EN 12179:2002 Facciate continue – Resistenza al carico del vento – Metodo di prova

UNI EN 123116:2002, Facciate continue - Resistenza al carico del vento – Requisiti prestazionali

UNI EN 949:2000 Finestre e facciate continue, porte e chiusure oscuranti – Determina-

zione della resistenza delle porte all'urto con corpo molle e pesante

UNI EN 14019:2004 Facciate continue – Resistenza all'urto – Requisiti prestazionali

UNI 7172: 1987, Vetri piani. Vetri stratificati per edilizia ed arredamento.

UNI 9186: 1987, Vetri piani. Vetri stratificati per edilizia e arredamento con prestazioni antivandalismo e anticrimine

UNI 9187: 1987, Vetri piani. Vetri stratificati per l' edilizia e arredamento con prestazioni antiproiettile

UNI EN ISO 140 - 3 : 2006, Acustica. Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio. Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico per via aerea di elementi di edificio

UNI EN ISO 140 - 5 : 2000, Acustica - Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Misurazioni in opera dell'isolamento acustico per via aerea degli elementi di facciata e delle facciate

UNI ISO 140-10 Acustica – Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio – Misurazioni di Laboratorio dell'isolamento per via aerea di piccoli elementi di edificio.

UNI EN ISO 140-16:2006, Acustica - Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 16: Misurazione in laboratorio dell'incremento del potere fonoisolante mediante rivestimento addizionale

UNI EN ISO 140-18:2007, Acustica - Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 18: Misurazione in laboratorio del rumore generato da pioggia battente su elementi di edificio

UNI EN ISO 717 – 1:2007, Acustica - Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 1: Isolamento acustico per via aerea

UNI 11018:2003, Rivestimenti e sistemi di ancoraggio per facciate ventilate a montaggio meccanico - Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione e la manutenzione - Rivestimenti lapidei e ceramici

UNI EN 13363 - 01:2008, Dispositivi di protezione solare in combinazione con vetrate - Calcolo della trasmittanza solare e luminosa - Parte 1: Metodo semplificato

UNI EN 13363 - 02:2008, Dispositivi di protezione solare in combinazione con vetrate - Calcolo della trasmittanza solare e luminosa - Parte 2: Metodo di calcolo dettagliato

UNI 410:2000, Vetro per edilizia - Determinazione delle caratteristiche luminose e solari delle vetrate

UNI EN 13947:2007,

Prestazione termica delle facciate continue - Calcolo della trasmittanza termica

UNI EN ISO 6946:2008, Componenti ed elementi per edilizia – Resistenza termica e trasmittanza termica – Metodo di calcolo

UNI EN 673:2005, Vetro per edilizia - Determinazione della trasmittanza termica (valore U) - Metodo di calcolo

UNI EN 674:1999, Vetro per edilizia - Determinazione della trasmittanza termica (valore U) - Metodo della piastra calda con anello di guardia

UNI EN 675:1999, Vetro per edilizia - Determinazione della trasmittanza termica (valore U) - Metodo dei termoflussimetri

UNI EN ISO 12567-1:2006, Isolamento termico di finestre e porte - Determinazione della trasmittanza termica con il metodo della camera calda - Finestre e porte complete

UNI 10344:1993, Riscaldamento degli edifici. Calcolo del fabbisogno di energia

UNI EN 12464-1:2004 – Luce e illuminazione - Illuminazione dei posti di lavoro - Parte 1: Posti di lavoro in interni.

UNI EN 1364-3:2007, Prove di resistenza al fuoco per elementi non portanti - Parte 3: Facciate continue - Configurazione in grandezza reale (assemblaggio completo); indica le modalita attraverso cui devono essere fatti i test di resistenza al fuoco delle facciate continue.

UNI EN 1364-4:2007, Prove di resistenza al fuoco per elementi non portanti - Parte 4: Facciate continue - Configurazione parziale; indica le modalita attraverso cui devono essere fatti i test di resistenza al fuoco di alcune parti di facciata continua.

UNI EN 13501-5:2009, Classificazione al fuoco dei prodotti e degli elementi da costruzione - Parte 1: Classificazione in base ai risultati delle prove di reazione al fuoco e di riferimento per la classificazione della reazione al fuoco dei componenti di facciata.

PREMIO FIRENZE UNIVERSITY PRESS
TESI DI DOTTORATO

- Coppi E., *Purines as Transmitter Molecules. Electrophysiological Studies on Purinergic Signalling in Different Cell Systems*, 2007
- Natali I., *The Ur-Portrait. Stephen Hero ed il processo di creazione artistica in A Portrait of the Artist as a Young Man*, 2007
- Petretto L., *Imprenditore ed Università nello start-up di impresa. Ruoli e relazioni critiche*, 2007
- Mannini M., *Molecular Magnetic Materials on Solid Surfaces*, 2007
- Bracardi M., *La Materia e lo Spirito. Mario Ridolfi nel paesaggio umbro*, 2007
- Bemporad F., *Folding and Aggregation Studies in the Acylphosphatase-Like Family*, 2008
- Buono A., *Esercito, istituzioni, territorio. Alloggiamenti militari e «case Herme» nello Stato di Milano (secoli XVI e XVII)*, 2008
- Castenasi S., *La finanza di progetto tra interesse pubblico e interessi privati*, 2008
- Gabbiani C., *Proteins as Possible Targets for Antitumor Metal Complexes: Biophysical Studies of their Interactions*, 2008
- Colica G., *Use of Microorganisms in the Removal of Pollutants from the Wastewater*, 2008
- Inzitari M., *Determinants of Mobility Disability in Older Adults: Evidence from Population-Based Epidemiologic Studies*, 2009
- Di Carlo P., *I Kalasha del Hindu Kush: ricerche linguistiche e antropologiche*, 2009
- Pace R., *Identità e diritti delle donne. Per una cittadinanza di genere nella formazione*, 2009
- Macri F., *Verso un nuovo diritto penale sessuale. Diritto vivente, diritto comparato e prospettive di riforma della disciplina dei reati sessuali in Italia*, 2009
- Vignolini S., *Sub-Wavelength Probing and Modification of Complex Photonic Structures*, 2009
- Decorosi F., *Studio di ceppi batterici per il biorisanamento di suoli contaminati da Cr(VI)*, 2009
- Di Patti F., *Finite-Size Effects in Stochastic Models of Population Dynamics: Applications to Biomedicine and Biology*, 2009
- Polito C., *Molecular imaging in Parkinson's disease*, 2010
- Fedi M., *«Tuo lumine». L'accademia dei Risvegliati e lo spettacolo a Pistoia tra Sei e Settecento*, 2010
- Orsi V., *Crisi e Rigenerazione nella valle dell'Alto Khabur (Siria). La produzione ceramica nel passaggio dal Bronzo Antico al Bronzo Medio*, 2010
- Fondi M., *Bioinformatics of genome evolution: from ancestral to modern metabolism. Phylogenomics and comparative genomics to understand microbial evolution*, 2010
- Marino E., *An Integrated Nonlinear Wind-Waves Model for Offshore Wind Turbines*, 2010
- Romano R., *Smart Skin Envelope. Integrazione architettonica di tecnologie dinamiche e innovative per il risparmio energetico*, 2010

Finito di stampare presso
Grafiche Cappelli Srl – Osmannoro (FI)