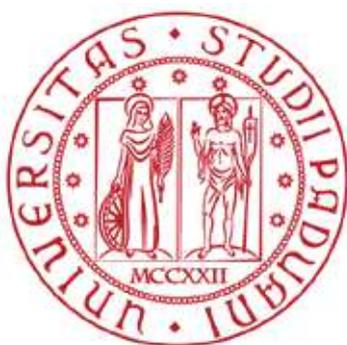


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea in Ingegneria Civile



TESI DI LAUREA

**IL CONTROLLO DELLA LUCE SOLARE NELL'ARCHITETTURA SOSTENIBILE:
Analisi tecnologica dei sistemi di facciata adattivi**

Relatore: Chiar.mo PROF. LIVIO PETRICCIONE

Laureando: ROBERTA TOGNETTO

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

ABSTRACT

L'involucro architettonico vetrato riveste un ruolo centrale nel controllo della luce solare, ottenuto grazie all'integrazione con sistemi di schermatura adattivi, che gli conferiscono il dinamismo necessario ad adattarsi al contesto climatico, soddisfacendo i requisiti di benessere con un approccio sostenibile. A causa dei cambiamenti climatici, nell'architettura contemporanea è stata intrapresa una ricerca di nuovi elementi tecnologici in grado di minimizzare il consumo energetico degli edifici, nell'ottica di sviluppare il modello *nearly Zero Energy Building*.

La presente tesi ha inteso analizzare i sistemi di facciata andando in particolare a focalizzarsi sui sistemi di schermatura solare adattivi. Partendo da un'analisi storica, affiancata da un'analisi tecnologica, è possibile valutare tramite casi di studio, lo stato dell'arte dell'involucro architettonico vetrato. La tesi in conclusione approfondisce gli innovati sistemi di schermatura solare adattivi e passivi che, grazie alle capacità di adattamento generate dalle sole fonti naturali, rappresentano i futuri sviluppi dell'architettura sostenibile.

INDICE

INTRODUZIONE	6
CAPITOLO 1	
ESIGENZE E PRESTAZIONI DELL'INVOLUCRO ARCHITETTONICO	8
1.1 Il sistema esigenziale-prestazionale	11
1.2 Benessere	14
1.2.1 Comfort termico	16
1.2.2 Comfort visivo	21
1.3 Salvaguardia dell'ambiente	24
1.4 Considerazioni finali	29
CAPITOLO 2	
INVOLUCRO ARCHITETTONICO VETRATO: STATO DELL'ARTE	30
2.1 Sistemi di facciata continua	32
2.1.1 Cenni storici	32
2.1.2 Stato dell'arte	38
2.2 Sistemi di schermatura adattivi	54
2.2.1 Cenni storici	54
2.2.2 Stato dell'arte	62
CAPITOLO 3	
SOLUZIONI INNOVATIVE PER SCHERMATURE SOLARI ADATTIVE	70
3.1 Casi di studio	72
3.1.1 Thyssenkrupp quarter	72
3.1.2 Al Bahar towers	74
3.1.3 Head office of AGC glass Europe	76
3.1.4 Campus Kolding	78
3.1.5 Analisi comparativa	81
3.2 Innovazioni e futuri sviluppi	82
3.2.1 La biomimesi	82
3.2.2 Warm Motion System	84
3.2.3 Pho'liage	86
3.2.4 IARC Headquarters	88
3.2.5 Analisi comparativa	91
CONCLUSIONI	92
BIBLIOGRAFIA	96
LISTA DELLE FIGURE	102
LISTA DELLE TABELLE	108

INTRODUZIONE

L'involucro architettonico vetrato riveste un ruolo centrale nella gestione, modulazione e regolazione dei flussi di interazione tra gli spazi interni dell'edificio e l'ambiente circostante. Le sue declinazioni tipologiche, funzionali ed estetiche sono l'oggetto del seguente lavoro di tesi, insieme alle potenzialità derivanti dall'integrazione con sistemi di schermatura solare adattivi.

La metodologia di valutazione utilizzata si basa sull'analisi storica, volta a comprendere le mutazioni formali e funzionali che hanno interessato l'involucro architettonico vetrato, e a cogliere le potenzialità tecnologiche offerte dai sistemi innovativi.

La storia del vetro nell'architettura viene analizzata dalle origini, sviluppate durante la rivoluzione industriale, fino agli esordi dei sistemi di facciata continua, introdotti dal movimento moderno. Tramite le soluzioni tecnologiche presentate, è possibile comprendere i moderni sistemi di facciata continua e le caratteristiche di trasparenza e di permeabilità visiva, alla base dei quattro casi di studio.

Le limitazioni dei sistemi di facciata continua e la necessità di integrazione con sistemi in grado di modulare la luce solare, permettono di concentrare l'attenzione nel fulcro del lavoro di tesi: i sistemi di schermatura solare.

L'approccio storico riprende dall'attenzione posta al contesto climatico nei lavori di Le Corbusier, e si sviluppa nell'architettura contemporanea tramite le elaborazioni di Renzo Piano e di Jean Nouvel. Si osserva come le tematiche della luce naturale riprendano un ruolo primario nell'architettura, tuttavia assieme a una nuova consapevolezza ambientale e una spiccata funzione nell'aspetto dell'edificio.

Il ruolo delle schermature solari nell'estetica dell'involucro è un tema che accomuna i casi di studio sulle schermature solari adattive tuttavia le maggiori potenzialità sono offerte dal dinamismo dei sistemi, in grado di mutare la configurazione spaziale e funzionale per adattarsi alle differenti condizioni climatiche esterne.

L'involucro architettonico trova quindi una nuova funzione di filtro selettivo con l'ambiente circostante, in grado di massimizzare le condizioni di benessere degli utenti, all'interno delle politiche di salvaguardia dell'ambiente. L'analisi delle tematiche di benessere dell'utenza in ambito di comfort termico e luminoso, presentate nel primo capitolo, rappresentano le finalità del sistema edilizio, all'interno del quale i sistemi di schermatura solare sono una soluzione tecnologica che ne permette lo sviluppo in chiave di sostenibilità ambientale e di minimizzazione del consumo energetico.

Il secondo capitolo è incentrato nell'analisi tecnologica dei sistemi di facciata continua e dei sistemi di schermatura solare adattivi, traendo dalle soluzioni tradizionali una chiave di lettura per le innovazioni dell'involucro sviluppate nell'architettura contemporanea.

L'adattabilità diventa la tematica centrale del terzo capitolo, analizzata prima tramite quattro casi di studio in cui i sistemi di schermatura presentano attuatori di tipo elettromagnetico e successivamente tramite due prototipi di sistemi passivi, in cui il motore del dinamismo prende origine da fonti naturali e senza la necessità di apporti elettrici.

L'obiettivo è di investigare le potenzialità dei sistemi di schermatura adattivi nello sviluppo di un'architettura sia ottimizzata al benessere degli utenti sia legata al territorio, il cui interesse è scaturito dall'importanza dello sviluppo sostenibile che permea l'architettura contemporanea.

CAPITOLO 1

**ESIGENZE E PRESTAZIONI
DELL'INVOLUCRO ARCHITETTONICO**

All'involucro edilizio, con lo sviluppo dei modelli di architettura sostenibile, vengono affidate nuove funzioni in ambito di efficienza energetica e controllo del comfort interno.

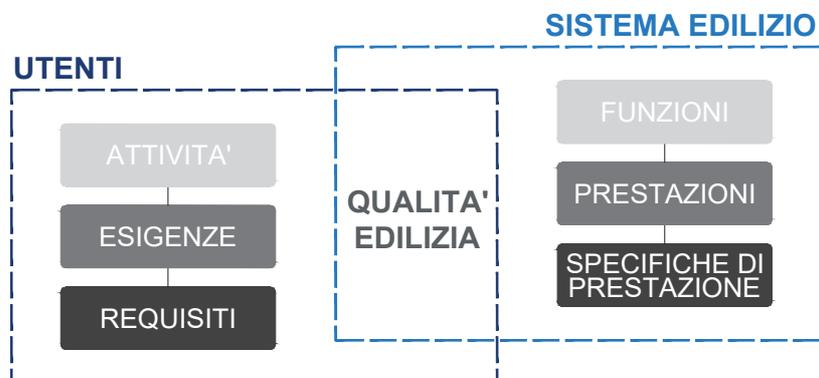
I sistemi di facciata adattivi, elementi tecnici oggetto del seguente lavoro di tesi, grazie alla loro capacità di adattarsi alle sollecitazioni esterne, permettono al sistema edilizio di rispondere alle esigenze dell'utenza e di sfruttare gli apporti solari mantenendo una bassa incidenza nel fabbisogno energetico; ovvero permettono di costituire sistemi edilizi di qualità e a basso impatto ambientale.

La qualità edilizia, nell'ottica della normativa esigenziale - prestazionale, è definibile come la rispondenza delle prestazioni offerte dal sistema edilizio, alle esigenze espresse dagli utenti.

Nella prima parte del capitolo sono definiti gli elementi del sistema esigenziale - prestazionale dal punto di vista teorico e normativo, e successivamente, tramite le definizioni delle esigenze e delle prestazioni, è possibile concretizzare il concetto di qualità edilizia.

Al fine di analizzare la qualità di un sistema edilizio, è altresì necessario trasformare le esigenze in requisiti e le prestazioni in specifiche di prestazione. Esse saranno l'oggetto della seconda parte del capitolo, specificatamente per l'esigenza di benessere, nei requisiti di comfort termico e luminoso, e per la salvaguardia dell'ambiente.

Il sistema edilizio, definibile come "insieme delle parti che compongono un'opera edilizia"¹, rappresenta la parte prestazionale mentre la parte esigenziale è governata dagli utenti, intesi come "le persone che fruiscono degli spazi, delle attrezzature e delle prestazioni di un edificio per lo svolgimento delle proprie attività"². Essi costituiscono le due macro aree del sistema esigenziale - prestazionale, rappresentato schematicamente in Figura 1.1.



1. UNI 10838:1999 Edilizia. Terminologia riferita all'utenza, alle prestazioni, al processo edilizio e alla qualità edilizia.

2. Petriccione, L. (2021). Slide del corso di Architettura tecnica.

3. UNI 8289:1981 Edilizia. Esigenze dell'utenza finale. Classificazione

[1.1] Definizione della qualità edilizia nell'approccio esigenziale-prestazionale. Schema funzionale degli elementi suddivisi tra utenti e sistema edilizio

1.1 IL SISTEMA ESIGENZIALE - PRESTAZIONALE

Il sistema esigenziale - prestazionale è scomponibile in due macro aree che sono tra loro strettamente collegate e cooperanti.

L'area esigenziale è governata dagli utenti, e può essere immaginabile come la domanda che essi pongono al sistema edilizio.

Al fine di poter svolgere delle attività, riguardanti tutti gli ambiti della vita dell'individuo, gli utenti necessitano di spazi che soddisfino determinate caratteristiche.

Le richieste poste dagli utenti sono esprimibili come esigenze: "ciò che di necessità si richiede per il corretto svolgimento di un'attività dell'utente o di una funzione tecnologica"¹.

Per poter definire il sistema delle esigenze è necessario, a monte, analizzare i bisogni da soddisfare, nel determinato contesto socioculturale e ambientale in cui essi si sviluppano.

A livello normativo esigenze "sono viste come esplicitazione di bisogni dell'utenza finale tenuto conto dei vincoli che l'ambiente naturale pone all'ambiente costruito"³. Esse sono suddivise in 7 classi di esigenze: sicurezza, benessere, fruibilità, aspetto, gestione, integrabilità e salvaguardia dell'ambiente, come rappresentato nello schema in Figura 1.2.

Le esigenze, per poter essere correttamente soddisfatte, necessitano di essere tramutate in requisiti: "traduzione di un'esigenza in fattori atti ad individuarne le condizioni di soddisfacimento da parte di un organismo edilizio o di sue parti spaziali o tecniche, in determinate condizioni d'uso e/o di sollecitazione"¹.



[1.2] Schema delle classi di esigenze definite secondo la norma UNI 8289:1981

I requisiti, in quanto trasposizione tecnica delle esigenze dell'utenza per svolgere le attività, sono il risultato della prima macro area che può essere descritta con la seguente cadenza formale:

- Un determinato oggetto
- Sotto l'azione degli agenti
- Nelle condizioni d'uso
- Deve soddisfare il requisito
- Al fine di rispondere alle esigenze.

La normativa fornisce un elenco dei requisiti e una descrizione delle sole caratteristiche funzionali, poiché i parametri necessari a quantificare i requisiti e i valori di soddisfacimento sono trattati dalle specifiche di prestazione.

Dal rapporto tra requisiti e specifiche di prestazione si può già intuire la connessione tra le due macro aree rappresentata dal concetto di qualità edilizia, che rappresenta il fulcro del sistema esigenziale - prestazionale. Si pone ora l'attenzione sulla parte prestazionale che può essere intesa come offerta che il sistema edilizio pone agli utenti per soddisfare i requisiti. Essa non deve essere intesa erroneamente come macro area separa bensì come una risposta che il sistema edilizio pone all'area esigenziale.

Le funzioni sono l'insieme dei compiti affidati al sistema edilizio o a sue specifiche componenti che, se analizzate nel contesto, possono essere tramutate in prestazioni: "comportamento reale dell'organismo edilizio e/o delle sue parti nelle effettive condizioni d'uso e di sollecitazione"¹.

Il sistema esigenziale - prestazionale si basa quindi sul rapporto tra esigenze e prestazioni, ovvero definisce la qualità edilizia come "insieme delle proprietà e delle caratteristiche dell'organismo edilizio o di sue parti che conferiscono ad essi la capacità di soddisfare, attraverso le prestazioni, esigenze espresse o implicite"¹. Essa deve essere vista come la meta da raggiungere quando si progetta e costruisce un qualsiasi sistema edilizio, ricordando che esso deve "fornire una risposta globale alle esigenze complessive"⁴ e non deve essere collegata al funzionamento di un singolo componente bensì di tutto il sistema complesso che è l'organismo edilizio.

4. Sinopoli, N. (1981). La normativa tecnica. In M. Zaffagnini (A cura di), *Progettare nel processo edilizio: la realtà come scenario per l'edilizia residenziale*, 71-94. Bologna: Edizioni Luigi Parma.

Questo approccio normativo all'architettura, che pone la centralità sull'utente finale e sui suoi bisogni, rispecchia una nuova visione del sistema edilizio poiché è possibile interpretare le norme come "la fotografia delle priorità che una società attribuisce a determinati problemi e mutano con il mutare di questi"⁴.

I principali riferimenti normativi, nel quale sono raccolti gli elementi del sistema esigenziale prestazionale, sono:

UNI 8289:1981 Edilizia. Esigenze dell'utenza finale. Classificazione.

UNI 8290-1:1981 Edilizia residenziale. Sistema tecnologico.

Classificazione e terminologia

UNI 8290-2:1983 Edilizia residenziale. Sistema tecnologico.

Analisi dei requisiti

UNI 8290-3:1987 Edilizia residenziale. Sistema tecnologico.

Analisi degli agenti

UNI 10838:1999 Edilizia. Terminologia riferita all'utenza, alle prestazioni, al processo edilizio e alla qualità edilizia.

La qualità edilizia è legata alla rispondenza delle prestazioni ai requisiti per il determinato contesto ambientale analizzato. Per poter applicare il concetto di qualità al progetto, è necessario definire dei parametri tali per cui se rispettati, si può presupporre che i bisogni siano soddisfatti.

La specifica di prestazione, ultimo elemento del sistema, è "un valore di variabili o di attributi, univocamente individuati, che definisce e delimita la risposta progettuale a una o più specificazioni di prestazioni"¹, ovvero sono una misura di quanto il sistema edilizio è in grado di soddisfare le specificazioni di prestazione.

L'obiettivo della seconda parte del capitolo è definire le specificazioni di prestazione per il benessere termico e visivo e per la salvaguardia dell'ambiente, cioè determinare "l'espressione del requisito secondo valori di variabili e/o attributi univocamente determinati che definiscono l'obiettivo di qualità da perseguire attraverso il progetto"¹.

1.2 BENESSERE

Il benessere, o comfort, è “l’insieme delle condizioni relative a stati del sistema edilizio adeguati alla vita, alla salute e allo svolgimento delle attività degli utenti”³.

Le condizioni richieste riguardano i cinque sensi con cui l’individuo interagisce con il mondo che lo circonda, i quali corrispondono alle cinque classi di requisiti per il benessere: termici, acustici, visivi, olfattivi e tattili.

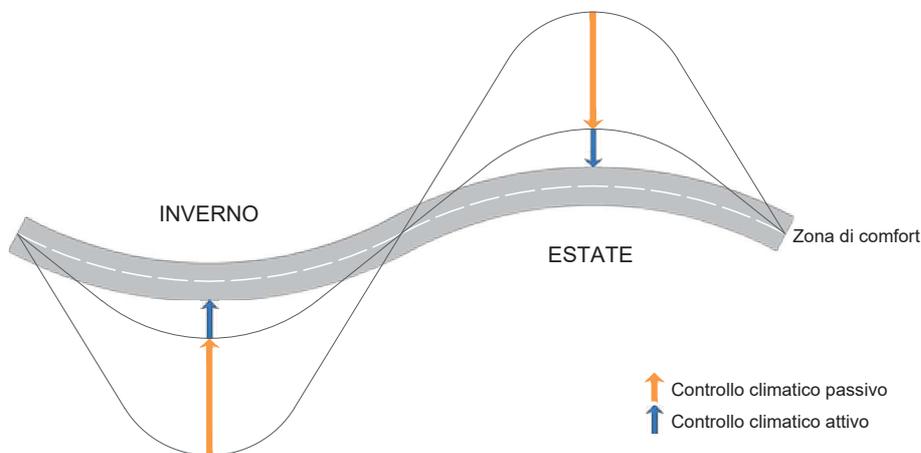
I sistemi di facciata, considerati all’interno del sistema edilizio, possono contribuire al benessere principalmente in ambito termico e visivo. Nello specifico, i requisiti di benessere termico coinvolti sono: il controllo del fattore solare, dell’inerzia termica e l’isolamento termico mentre quello in ambito visivo è il controllo del flusso luminoso. In tabella 1.1 sono raccolti i requisiti per il benessere in ambito termico e visivo e, per ognuno di essi, vi è una descrizione delle caratteristiche richieste.

È fondamentale porre l’attenzione sul fatto che “assicurare comfort ambientale, in particolare termoigrometrico e luminoso-visivo, può costare molto in termini energetici e di conseguenza di sostenibilità ambientale degli edifici”⁵, quindi l’apporto necessario dovrebbe essere in minima parte fornito dai sistemi impiantisti, detto controllo attivo, e al contempo dovrebbero essere sviluppati e massimizzati tutti i sistemi che consentono un controllo passivo, come rappresentato in Figura 1.3.

In questo contesto “si può allora definire passiva quell’architettura in cui le condizioni di comfort sono raggiunte grazie alla forma dell’architettura, alle caratteristiche dell’involucro e a sistemi di trasporto del calore da o verso l’ambiente circostante”⁶.

5. Casaburi, R. et al. (2016). *Manuale pratico per la Progettazione sostenibile*. Roma: Legislazione Tecnica.

6. Rinaldi, A. (2010). *Progettazione ed efficienza energetica*. Santarcangelo di Romagna: Maggioli Editore.



[1.3] Ricerca delle condizioni di comfort nell’architettura. Utilizzo del controllo climatico attivo e passivo. Ridisegnato dall’autore. Tratta da: Rinaldi (2010).

Tabella 1.1 Classificazione dei requisiti tecnologici e relative definizioni.
 Tratta da: UNI 8290-2:1983

CLASSE ESIGENZIALE	CLASSE DI REQUISITI	REQUISITI	DEFINIZIONE DEI REQUISITI
BENESSERE	Termici e igrotermici	Affidabilità	'Capacità di mantenere sensibilmente invariata nel tempo la propria qualità in condizioni d'uso determinate'
		Controllo del fattore solare	'Attitudine a consentire un adeguato ingresso di energia termica raggiante attraverso superfici (trasparenti e/o opache) in funzione delle condizioni climatiche'
		Controllo dell'inerzia termica	'Attitudine ad attenuare entro opportuni valori l'ampiezza di oscillazione della temperatura e a ritardarne di una opportuna entità l'effetto.'
		Controllo della portata	'Attitudine a garantire valori (minimi) di portata dei fluidi circolanti'
		Controllo della temperatura dei fluidi	'Possibilità di mantenere la temperatura dei diversi fluidi utilizzati entro opportuni livelli'
		Impermeabilità ai liquidi	'Attitudine a non essere attraversata dall'acqua'
		Isolamento termico	'Attitudine ad assicurare un'opportuna resistenza al passaggio di calore in funzione delle condizioni climatiche'
		Tenuta all'acqua	'Attitudine ad impedire l'ingresso dell'acqua'
		Ventilazione	'Possibilità di ottenere ricambio d'aria per via naturale o meccanica'
	Visivi	Assorbimento luminoso	'Attitudine di un oggetto a trasformare parte dell'energia di una radiazione luminosa, su di esso incidente, in altre forme di energia'
		Controllo del flusso luminoso	'Attitudine a consentire l'ingresso di energia luminosa'

1.2.1 Comfort termico

Il comfort, definibile come “lo stato di benessere psicologico e sensoriale provato dall’individuo all’interno di uno spazio chiuso”⁵, sarà funzione sia di parametri ambientali sia di parametri soggettivi legati alle persone; ne consegue che, nello specifico momento storico e contesto, un determinato ambiente può essere ritenuto soddisfacente solo dalla maggior parte delle persone e mai in maniera universale.

È con questo concetto alla base che P.O. Fanger⁷ definisce due indici di sensazione termica, tutt’ora sono utilizzati per definire le condizioni di benessere degli ambienti chiusi.

Il benessere termoigrometrico dipende dallo scambio termico tra il corpo umano e l’ambiente, esso è modellabile tramite l’equazione del comfort termico ottimale:

$$f(M, I_{cl}, T_a, p_a, v_a, T_{mr}, T_s, Q_{ev}) = 0$$

Le variabili che intervengono sono divisibili in: soggettive e ambientali.

Le variabili soggettive sono: il metabolismo M e la resistenza termica dei vestiti I_{cl} , le quali dipendono direttamente dall’individuo e non possono essere variate tramite la progettazione.

Le variabili ambientali sono l’insieme dei parametri che possono effettivamente essere gestiti tramite una corretta progettazione del sistema edilizio. Esse racchiudono: temperatura dell’aria interna T_a , temperatura media radiante T_{mr} , pressione parziale del vapore acqueo p_a , velocità dell’aria v_a , temperatura del corpo vestito T_s e lo scambio per evaporazione tramite la pelle Q_{ev} .

“La soddisfazione dell’equazione del comfort è una condizione per un comfort termico ottimale. Tuttavia, l’equazione fornisce solo informazioni su come le variabili dovrebbero essere combinate al fine di creare un comfort termico ottimale, e quindi non è direttamente adatta per accertare la sensazione termica della persona in un clima arbitrario in cui non ci si può aspettare che le variabili soddisfino l’equazione”⁸.

Al fine di trovare una connessione tra la sensazione termica e le variabili ambientali, si possono utilizzare gli indici: PMV e PPD.

Il primo indice di comfort termoigrometrico è il PMV (*Predicted Mean Vote*) che indica il voto medio previsto, sulla base della scala ASHRAE di sette livelli di sensazione termica, espresso da un gruppo di persone in

7. Povl Ole Fanger (1934-2006) fu professore presso la Technical University of Denmark. Egli concentrò le sue ricerche sui parametri che influenzano la qualità degli ambienti interni. Un’analisi delle sue ricerche e degli importanti risultati che ottenne in ambito di comfort termico, sono raccolti nel seguente articolo: Alfano, F.R.D., Olesen, B.W., & Palella, B.I. (2017). Povl Ole Fanger’s impact ten years later. *Energy and Buildings*, 152, 243-249.

8. Fanger, P.O. (1970). *Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Copenhagen: Danish Technical Press.

9. Essendo le variabili, che influiscono sul PMV, di tipo soggettivo. Per poterlo analizzare, è necessario considerare un campione significativo di soggetti ove il termine significativo viene utilizzato nell’accezione statistica di rappresentativo della popolazione di utenti.

Tabella 1.2 Scala ASHRAE psico-fisica a sette punti

Scala ASHRAE						
-3	-2	-1	0	1	2	3
Molto freddo	Freddo	Leggermente freddo	Neutro	Leggermente caldo	Caldo	Molto caldo

funzione dell'attività, dell'abbigliamento, della temperatura dell'aria, della temperatura media radiante, della velocità relativa dell'aria e dell'umidità dell'aria. Esso esprime il grado di soddisfazione o di disagio termico provato da un campione significativo di soggetti⁹, per un determinato ambiente termico.

Si può determinare direttamente il PMV, per un determinato ambiente, andando a stabilire il livello di attività e il valore della resistenza termica dei vestiti che, introdotte nell'equazione del comfort assieme ai valori delle variabili ambientali, forniscono il voto medio previsto.

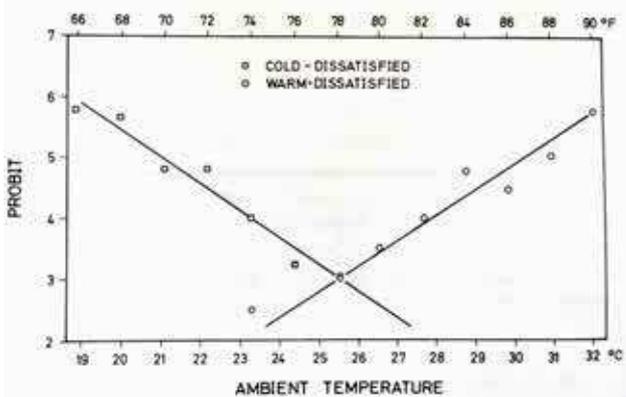
Come parametro di valutazione della sensazione termica viene utilizzata la scala ASHRAE psico-fisica a sette punti in Tabella 1.2.

Risulta "comunque difficile interpretare ciò che l'entità del PMV può implicare in un caso pratico"⁸ quindi, per poter meglio prevedere la sensazione termica di un gruppo di persone, si può affiancare il secondo indice termometrico: PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*).

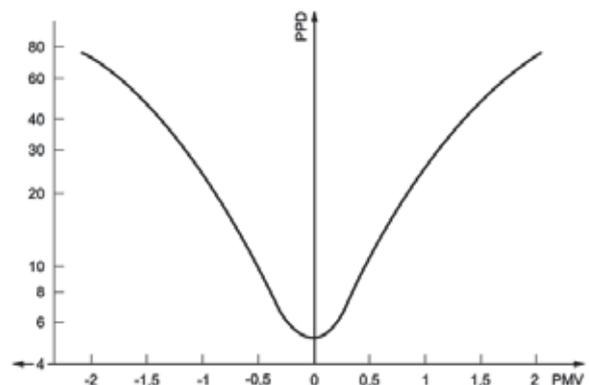
L'indice definisce "una previsione quantitativa della percentuale di persone insoddisfatte con le medesime condizioni ambientali"⁵, se per persone insoddisfatte si considera coloro che indicano come voto uno dei due livelli estremali della scala ASHRAE.

Nel grafico in Figura 1.4 sono rappresentate la proporzione di individui insoddisfatti al variare della temperatura ambiente, suddivise sulla base che l'insoddisfazione sia dovuta da una sensazione di caldo o di freddo. È rilevante osservare come il punto di incidenza tra le due rette, si ha per una temperatura pari a 25,6 °C, che nel modello è considerata come la temperatura ottimale.

Di seguito, nel grafico semi-logaritmico in Figura 1.5, è illustrato l'andamento della percentuale totale di insoddisfatti in funzione del voto medio previsto. Un'importante considerazione è che nelle condizioni ritenute di comfort, cioè per un voto medio previsto pari a zero, si ha il minimo della curva per una percentuale totale di insoddisfatti del 5%.



[1.4] Proporzione di individui termicamente insoddisfatti al variare della temperatura ambiente. La linea di sinistra illustra la probit della percentuale di "insoddisfatti da freddo". La linea di destra mostra la probit della percentuale di "insoddisfatti". Tratta da: Fanger (1970).



[1.5] Percentuale prevista di insoddisfatti (PPD) come funzione del voto medio previsto (PMV). Tratta da: BS EN ISO 7730:2005

Questo equivale a dire che “è impossibile soddisfare tutte le persone in un grande gruppo che condividono un clima collettivo”⁸, poiché anche nel caso ottimale rimane una percentuale minima di persone insoddisfatte, proprio a causa dell’influenza delle variabili soggettive.

Il PMV può essere calcolato, nel caso di ambienti termici moderati, in tre metodi:

- tramite la risoluzione analitica dell’equazione del PMV;
- tramite l’utilizzo di valori tabellati di PMV per differenti combinazioni di parametri;
- tramite la misurazione diretta.

I due indici presentati vengo introdotti nella normativa europea di riferimento per la valutazione del benessere termico negli ambienti termici considerati moderati¹⁰. Il primo testo normativo fu la:

EN ISO 7730:1995 – Moderate thermal environments. Determination of the PMV and PPD indices and specification of the condition for thermal comfort

di cui attualmente è in vigore la versione aggiornata:

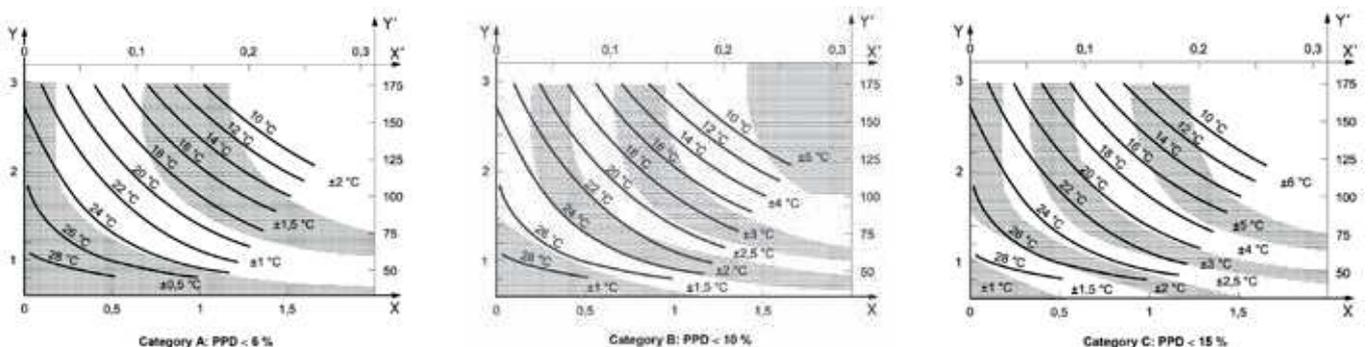
EN ISO 7730:2005 – Ergonomic of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of the thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria,

di cui nel proseguo vengono esposti i contenuti principali e i modelli di ambienti termici ritenuti accettabili per il comfort.

La normativa definisce i concetti di PMV e PPD e i criteri di calcolo; inoltre analizza i possibili utilizzi degli indici sia come parametri di verifica di un determinato ambiente, sia per definire i requisiti tali per cui un ambiente può essere ritenuto soddisfacente dal punto di vista termoigrometrico. Sulla base dei valori di PMV e PPD, affiancati ai parametri di disagio termico localizzato, vengono definite 3 categorie e, per ognuna di esse, viene normata la temperatura ottimale e il suo intervallo di variabilità consentito in funzione dell’abbigliamento e dell’attività.

I valori sono rappresentati nei grafici in Figura 1.6, dove X è l’isolamento degli indumenti e Y il tasso metabolico, con valore di umidità costante e pari al 50%.

10. Un ambiente termico è considerato come moderato se non comporta rischio di stress termico, in quanto sono limitati gli scambi termici fra soggetto e ambiente, le condizioni microclimatiche sono omogenee e poco variabili, l’attività svolta è modesta e il vestiario piuttosto uniforme. La norma UNI EN 16798-1:2019 definisce gli intervalli delle variabili ambientali tali per cui un ambiente può essere considerato moderato che corrispondono ai limiti di applicabilità del modello sviluppato da Fanger.



[1.6] Grafici dell’intervallo di temperatura ottimale, in funzione dell’abbigliamento e dell’attività per un valore di umidità relativa pari al 50%.
Tratta da: BS EN ISO 7730:2005

È necessario osservare che, per definire che un ambiente soddisfi il comfort termico, la temperatura operativa deve mantenersi all'interno del rispettivo intervallo in tutti i punti dell'ambiente e durante tutto l'arco temporale considerato, ovvero che le fluttuazioni spaziali e temporali non siano tali da discostarsi eccessivamente dalla temperatura ottimale, definita come temperatura che corrisponde ad un PMV nullo.

È possibile quindi definire le specifiche di prestazione, per la classe di requisiti termici, come il rispetto degli intervalli di temperatura operativa definiti in Tabella 1.3.

Un ulteriore riferimento normativo, utile soprattutto in ambito di progettazione, è la norma:

UNI EN 16798-1:2019 – Energy performance of buildings - Ventilation for buildings. Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of building addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics – Module M1-6.

Il documento ha come obiettivo la definizione dei parametri ambientali interni in ambito termico, di qualità dell'aria, di illuminazione e acustico, sia per la progettazione del sistema edilizio, sia per i calcoli delle prestazioni energetiche.

Essa fa parte del "set of EPB standard" e, nello specifico, è stata creata per soddisfare i requisiti della Direttiva 2010/31/CE del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell'edilizia (rifusione).

In ambito termico, per ambienti con ventilazione meccanica, i criteri di progettazione degli edifici (dimensionamento delle finestre, schermature solari, massa dell'edificio) sono basati sugli indici PMV e PPD, i quali definiscono le quattro categorie di qualità ambientale interna.

In Tabella 1.4 sono raccolti i dati relativi alla temperatura operativa ritenuta ottimale, suddivisi in base alla tipologia dell'edificio e alla categoria.

"I limiti superiori devono essere utilizzati per progettare edifici a controllo termico passivo (ad es. orientamento delle vetrate e delle schermature solari, capacità termica dell'edificio, dimensioni e adattabilità delle

Tabella 1.3 Intervalli di temperatura operativa per la stagione estiva ed invernale, in funzione della tipologia di edificio e della categoria. Tratta da: BS EN ISO 7730:2005

TIPOLOGIA DI EDIFICIO/SPAZIO	ATTIVITA'	CATEGORIA	TEMPERATURA OPERATIVA	
			ESTATE	INVERNO
Ufficio Auditorium Ristoranti Aule scolastiche	70	A	24,5 ± 1,0	22,0 ± 1,0
		B	24,5 ± 1,5	22,0 ± 2,0
		C	24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,0
Asili	81	A	23,5 ± 1,0	20,0 ± 1,0
		B	23,5 ± 2,0	20,0 ± 2,5
		C	23,5 ± 2,5	20,0 ± 3,5
Centri commerciali	93	A	23,0 ± 1,0	19,0 ± 1,5
		B	23,0 ± 2,0	19,0 ± 3,0
		C	23,0 ± 3,0	19,0 ± 4,0

finestre, ecc.) per evitare il surriscaldamento”¹¹.

Il modello di Fanger presentato risulta essere un modello stazionario che può essere utilizzato limitatamente agli ambienti termici moderati tuttavia, esso non considera l’influenza dei fattori psicologici, culturali, sociali e contestuali.

Nello specifico l’individuo tende a preferire temperatura leggermente maggiori o inferiori in funzione che esso viva in zone a clima caldo o freddo; questo è dovuto al naturale adeguamento dell’uomo.

L’adattamento può essere definito come una naturale diminuzione della risposta a stimolazioni ambientali ripetute e può essere di origine comportamentale (variazioni nell’abbigliamento, nelle finestre, ecc.) o di origine fisiologico e psicologico (acclimatazione e aspettativa)¹².

Sono stati sviluppati nuovi modelli, detti di tipo adattivo, in grado di considerare i citati effetti, i quali risultano interessanti poiché “permettono di ampliare l’intervallo di condizioni considerate confortevoli rispetto a quello del modello di Fanger con la conseguenza di rendere possibile in molti più casi l’adozione di soluzioni di raffrescamento passivo”⁵.

Tabella 1.4 Valori minimi e massimi di temperatura operativa per ambienti con ventilazione meccanica, in funzione della tipologia di edificio. Tratta da: BS UNI EN 16798-1:2019

TIPOLOGIA DI EDIFICIO/SPAZIO	CATEGORIA	TEMPERATURA OPERATIVA	
		Minimo per il riscaldamento (stagione invernale) Circa 1,0 clo	Massimo per il raffrescamento (stagione estiva) Circa 0,5 clo
Edifici residenziali, spazi di abitazione (camera da letto, soggiorno, cucina, ...) Attività sedentaria ~ 1,2 [met]	I	21,0	25,5
	II	20,0	26,0
	III	18,0	27,0
	IV	16,0	28,0
Edifici residenziali, altri spazi (locali di servizio, ripostiglio, ...) Attività in piedi / cammino ~ 1,5 [met]	I	18,0	
	II	16,0	
	III	14,0	
Uffici e spazi con attività similari (Uffici singoli, uffici open space, sala conferenze, auditorium, caffetteria, ristoranti, aule scolastiche, ...) Attività sedentaria ~ 1,2 [met]	I	21,0	25,5
	II	20,0	26,0
	III	19,0	27,0
	IV	18,0	28,0

11. UNI EN 16798-1:2021
Energy performance of buildings - Ventilation for buildings. Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of building addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics - Module M1-6

12. Van Hoof, J. (2010).
Thermal comfort: Research and practice.
Frontiers in Bioscience, 15, 765-788.

1.2.2 Comfort visivo

Il comfort visivo è lo stato di benessere provato dall'individuo nello svolgere tutte le attività che coinvolgono il senso della vista e nel relazionarsi con l'ambiente circostante.

L'importanza di soddisfare le esigenze di benessere in ambito luminoso può essere dedotta dagli effetti che la corretta illuminazione genera nelle persone. La luce influenza lo stato fisiologico e psicologico dell'essere umano poiché migliora l'umore, le emozioni e la prontezza mentale, inoltre è in grado di regolare i ritmi circadiani migliorando quindi il benessere globale dell'individuo .

Per garantire i requisiti di illuminazione necessari si ha un forte impatto sul bilancio energetico dell'edificio, e non bisogna incorrere nell'idea sbagliata di compromettere gli aspetti visivi al fine di ridurre il consumo energetico bensì, un corretto approccio al problema, è la ricerca di sfruttare di tutti i possibili apporti luminosi, nello specifico la luce diurna. La principale fonte di illuminazione dovrebbe avere una natura solare mentre l'illuminazione artificiale dovrebbe essere interpretata come elemento supplementare utile solo nei casi in cui la prima venga a mancare o non sia sufficiente.

L'ingresso della luce diurna negli ambienti del sistema edilizio avviene tramite le superfici vetrate dell'involucro architettonico. Esse consentono anche la connessione visiva con l'ambiente esterno che, fornendo informazioni sui cambiamenti meteorologici e sull'ora del giorno, influiscono positivamente sul benessere psicologico dell'utente.

Al contempo però possono generarsi fenomeni negativi come l'abbagliamento e la perdita di privacy. La normativa consiglia l'utilizzo di dispositivi di schermatura sia per mitigare questi fattori di discomfort, sia per massimizzare o minimizzare i possibili guadagni solari, riuscendo quindi a ridurre l'impatto sul bilancio energetico senza intaccare le condizioni ambientali interne.

Per poter valutare quantitativamente e qualitativamente un ambiente luminoso possono essere considerati i seguenti parametri:

- Livello di illuminamento
- Distribuzione dell'illuminamento
- Riduzione dell'abbagliamento
- Aspetti cromatici.

Le variabili presentate sono tutte valutazioni di tipo ambientale, tuttavia, non bisogna tralasciare l'influenza dei fattori soggettivi. La capacità visiva dell'uomo o proprietà particolari dell'attività svolta possono richiedere caratteristiche diverse all'ambiente luminoso e, allo stesso tempo, fenomeni sgradevoli come l'abbagliamento o caratteristiche cromatiche non adatte, possono influenzare maggiormente utenti più sensibili.

“Il livello di illuminamento è la quantità di luce che raggiunge il piano di lavoro sul quale viene svolto il compito visivo”¹³ e “dipende dalle caratteristiche dell'attività, dalle caratteristiche del compito visivo e dall'attitudine visiva del soggetto”¹³. Una quantificazione dei requisiti minimi viene fornita in Tabella 1.5, in funzione dell'attività svolta.

Quando un utente svolge un'attività tende a osservare non solo il singolo piano di lavoro ma anche l'area ad esso circostante. La distribuzione dell'illuminamento, secondo parametro, dovrebbe essere il più uniforme possibile cioè “l'illuminazione dell'area immediatamente circostante deve essere correlata all'illuminazione dell'area di attività”¹⁴. Questo risulta importante perché variazioni significative dei valori di illuminamento possono generare fenomeni di stress e affaticamento visivo o di disagio. Una delle problematiche dell'utilizzo della luce diurna è che risente di variazioni di intensità e di distribuzione sulla base delle condizioni meteorologiche e del contesto esterno, inoltre può generare fenomeni di abbagliamento.

L'abbagliamento è un fenomeno sgradevole che si genera quando all'interno del campo visivo è presente una sorgente luminosa con intensità notevolmente superiore all'illuminamento presente nell'intorno, detto abbagliamento diretto, oppure quando la luce viene riflessa da una superficie lucida, detto abbagliamento indiretto.

L'importanza di limitare il verificarsi di questi fenomeni sta proprio sull'impatto che essi generano sull'individuo. A seconda dell'intensità del fenomeno, esso può generare affaticamento visivo, fastidio, disagio fino alla riduzione delle prestazioni visive.

I sistemi di schermatura possono impattare notevolmente nella riduzione del rischio di abbagliamento e nell'evitare la vista diretta del sole o dei suoi riflessi, tant'è che la normativa ne raccomanda l'utilizzo in qualsiasi spazio con aperture diurne¹⁵.

13. Dassori, E. et al. (2020). *Costruire l'architettura. Tecniche e tecnologie per il progetto*. Milano: Tecniche Nuove.

14. EN 12464-1:2021 *Light and lighting. Lighting of work places. Indoor work places*.

15. EN 17037:2018 *Daylight in buildings*

Tabella 1.5 Livello di illuminamento minimo in funzione dell'attività svolta. Tratta da: EN 16798-1:2019

TIPOLOGIA DI AREA, COMPITO O ATTIVITA'	ILLUMINAZIONE MEDIA lx
Uffici – Scrittura, Digitazione, Lettura, Elaborazione dati Sale conferenze e meeting	500
Edifici scolastici – Aule didattiche, Aule per classi serali ed educazione degli adulti, Auditorium, Aule lettura	500
Edifici scolastici – Palazzetti dello sport, Palestre, Piscine	300

Le caratteristiche cromatiche di una sorgente luminosa sono: l'aspetto cromatico, cioè il colore della luce emessa e la resa cromatica, intesa come la corretta restituzione dei colori degli elementi illuminati. Esse riguardano esclusivamente la luce artificiale, la quale dovrebbe essere progettata in modo tale da assomigliare il più possibile alla luce naturale, poiché è dimostrato che presenta le caratteristiche cromatiche ottimali. La normativa in ambito del comfort visivo, in linea con il principio esigenziale-prestazionale, specifica i requisiti per una buona soluzione di illuminazione. Essi sono diversificati in base alla destinazione d'uso e alla componente considerata.

La norma UNI 16798-1:2019, precedentemente analizzata in ambito termico, si concentra sugli aspetti dell'illuminazione adeguata e rimanda, per gli altri parametri, alla normativa specifica per i posti di lavoro:

*EN 12464-1:2021 Light and lighting. Lighting of work places.
Indoor work places.*

*EN 12464-2:2014 Light and lighting. Lighting of work places.
Outdoor work places.*

Per l'utilizzo della luce naturale come fonte di illuminazione e per limitare i possibili effetti negativi, si può far riferimento ad un ulteriore testo normativo molto interessante:

EN 17037:2018 Daylight in buildings

In essa sono presenti numerosi richiami all'utilizzo dei sistemi di facciata sia per le loro capacità di gestione degli apporti luminosi, sia per fruttare il guadagno solare e mitigare di conseguenza l'impatto energetico.

L'ultimo riferimento normativo, riguardante la classificazione e la caratterizzazione del benessere termico e visivo fornito dai sistemi di schermatura, nella norma:

*EN 14501:2021 Blinds and shutters. Thermal and visual comfort.
Performance characteristics and classification.*

Essa costituisce un utile riferimento quando ci si interfaccia con la progettazione di sistemi di schermatura solari adattivi.

1.3 SALVAGUARDIA DELL'AMBIENTE

L'esigenza di salvaguardia dell'ambiente è "l'insieme delle condizioni relative al mantenimento e miglioramento degli stati dei sovrastemi di cui il sistema edilizio fa parte"³.

Il concetto di rispetto ambientale può essere tramutato, all'interno del sistema edilizio, tramite i requisiti in ambito di controllo del ciclo di riuso, controllo dell'inquinamento causato dall'edificio sull'ambiente esterno e di risparmio energetico.

La sensibilità nei confronti della sostenibilità si instaura nelle scelte sociali, politiche e architettoniche a partire dagli anni Settanta, spinti dal concetto di qualità edilizia.

Attualmente "il settore delle costruzioni è quello con maggiori consumi di energia nell'Unione Europea (EU), responsabile approssimativamente del 40% della domanda di energia finale e del 36% di emissioni di diossido di carbonio (CO₂)"¹⁶.

A causa del forte impatto dell'edilizia, lo sviluppo di edifici energeticamente efficienti divenne il tema centrale di dibattiti del ventunesimo secolo.

L'involucro edilizio vede mutare i suoi componenti tant'è che "l'adozione di facciate adattive offre opportunità per riduzioni significative del consumo energetico degli edifici e delle emissioni di CO₂, preservando il comfort termico e visivo degli occupanti"¹⁷.

Ripercorriamo ora le tappe storiche che hanno guidato il processo di affermazione del progetto sostenibile e i concetti di efficienza energetica.

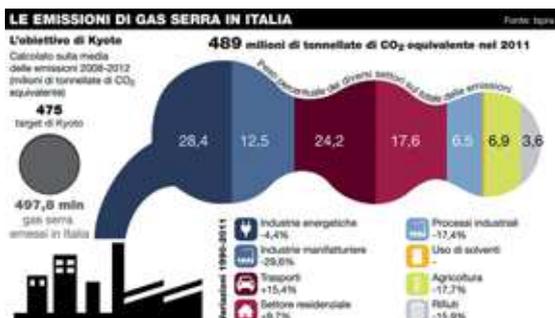
La prima tappa storica, nel contesto dello sviluppo sostenibile, è la redazione del documento *Our common future* (Il nostro futuro comune) nel 1987. Esso è stato sottoscritto dal presidente della *World Commission on Environment and Development* (Commissione mondiale per l'ambiente e lo sviluppo), a seguito di studi a livello mondiale sulla situazione ambientale.

Il concetto di sviluppo sostenibile viene definito come "quello capace di soddisfare le necessità attuali senza compromettere le possibilità delle generazioni future di soddisfare le proprie"¹⁸.

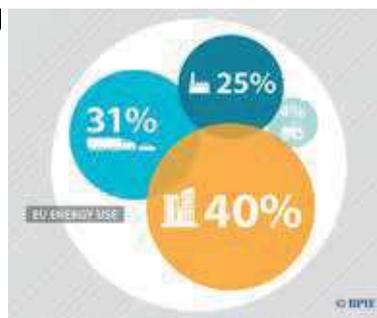
16. Li, Y. et al. (2019). Review of building energy performance certification schemes towards future improvement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113.

17. Aeleni, D. et al. (2016). Adaptive Façade: concept, application, research questions. *Energy Procedia*, 91, 269 - 275.

18. Brundtland Commission. (1987). *Our Common Future*. Report of the World Commission on Environment and Development.



[1.7] Schematizzazione delle emissioni medie di gas serra in Italia. Percentuali dell'incidenza dei vari settori sulle emissioni totali nel 2011. Tratta da: Ispra



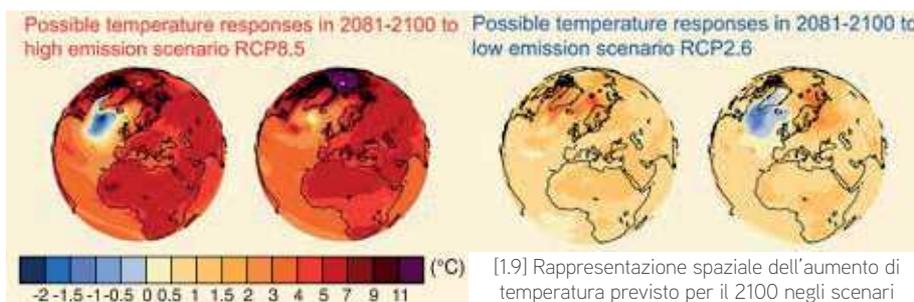
[1.8] Schematizzazione dell'utilizzo dell'energia nell'Unione Europea. Tratta da: <https://www.bpie.eu/>

I principi alla base dello sviluppo sostenibile insieme agli obiettivi e le azioni per promuoverlo furono l'argomento della *United Nations Conference on Environment and Development* (Conferenza mondiale dell'ambiente e dello sviluppo) tenutasi a Rio de Janeiro nel 1992, seconda tappa storica, a livello mondiale, sulle tematiche ambientali.

A seguito del *Summit* di Rio de Janeiro, precisamente a partire dal 1995, i governi mondiali si sono periodicamente riuniti alle Conference Of Parts (Conferenze delle Parti) al fine di discutere sui cambiamenti climatici e di promuovere a livello internazionale lo sviluppo sostenibile. La terza tappa analizzata, la COP-3 tenutasi a Kyoto nel 1997, segna un punto di svolta nell'approccio alle problematiche ambientali. L'11 dicembre 1997 venne approvato un trattato storico: il Protocollo di Kyoto, nel quale i paesi si impegnano a ridurre le emissioni di gas a effetto serra di almeno il 5% in media, rispetto ai livelli raggiunti nel 1990, nel periodo dal 2008 al 2012.

Il Protocollo ha posto le basi per un'azione globale volta prima alla riduzione e poi alla limitazione delle emissioni di gas serra prodotte, e riconosce ad esse le cause dei cambiamenti climatici. Le conseguenze furono positive sia per l'importanza che esso pone sulle problematiche ambientali sia per i risultati ottenuti: "nel 2011 la riduzione percentuale delle emissioni rispetto a quelle del 1990 era pari al 18,4%"⁵. Le emissioni di gas serra in Italia, insieme ad un'analisi delle percentuali di incidenza dei vari settori, sono presentata in Figura 1.7.

La COP-21, tenutasi a Parigi nel 2015, diede origine al più recente impegno mondiale in tema di cambiamenti climatici. Nel *Paris Agreement* (Atto di Parigi) si pone l'obiettivo inderogabile, a lungo termine, di mantenere l'innalzamento della temperatura almeno al di sotto dei 2°C, e possibilmente al di sotto dei 1,5 C. L'elemento chiave, che ogni paese si è impegnato a redatte per rispettare l'obiettivo, è la *Nationally Determined Contribution*. In esse è delineato un piano nazionale chiaro e conciso per ridurre le emissioni e adattarsi ai cambiamenti climatici.



[1.9] Rappresentazione spaziale dell'aumento di temperatura previsto per il 2100 negli scenari peggiori e migliori. Tratta da: Collins et al. (2013)

L'impegno preso con gli accordi di Parigi ha un grosso impatto sul futuro del pianeta poiché "solo limitando l'aumento della temperatura globale a 1,5 °C il mondo potrebbe evitare alcuni dei peggiori impatti climatici e ridurre la probabilità di eventi meteorologici estremi"¹⁹.

È scientificamente provato che "il riscaldamento del pianeta causato dalle attività umane è già di 1 °C al di sopra dei livelli preindustriali e sta aumentando a un ritmo di circa 0,2 °C per decennio"²⁰. In Figura 1.10 sono raccolti gli effetti dei cambiamenti climatici in Europa, suddivisi per regioni climatiche, mentre in Figura 1.9 sono presentati gli scenari migliori e peggiori dell'aumento di temperatura previsti per la fine del XXI secolo.

In risposta agli Accordi di Parigi, la Commissione Europea ha presentato una visione strategica a lungo periodo per raggiungere un'economia a impatto zero sul clima entro il 2050, ovvero per ridurre le emissioni di gas serra tra l'80% e il 100% rispetto al 1990.

Un ruolo centrale per raggiungere l'azzeramento delle emissioni di gas serra è affidato alle misure di efficienza energetica, specialmente in campo edilizio poiché, come già osservato, incidono per il 40% del consumo di energia.

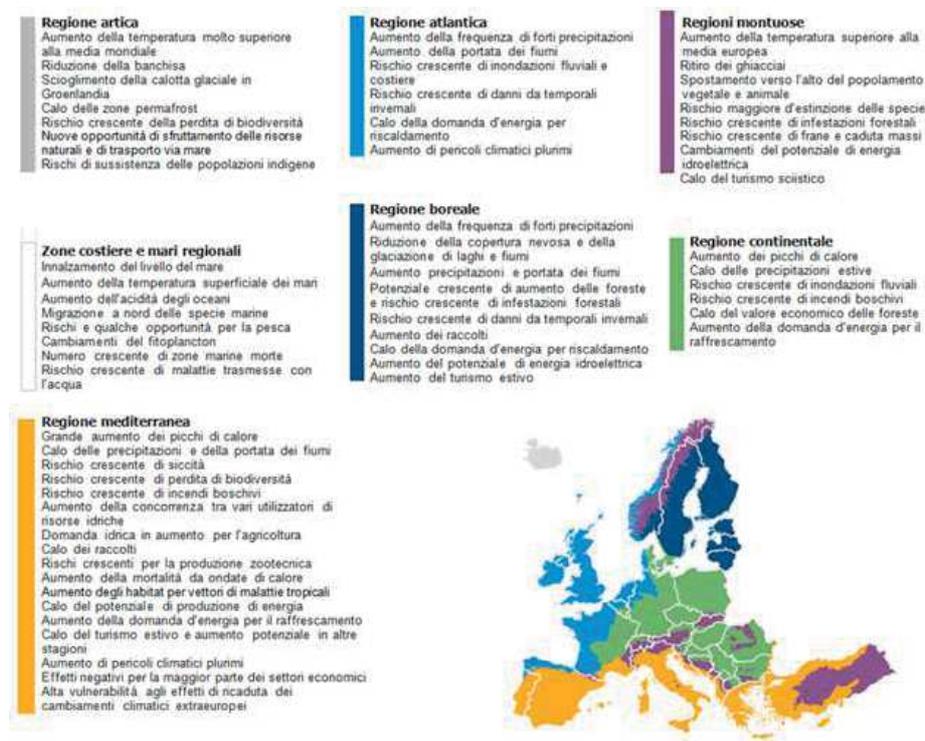
19. European Commission, Directorate-General for Climate Action. (2019). *Going climate-neutral by 2050: a strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate-neutral EU economy*. Publications Office.

20. Comunicazione della Commissione Europea "Un pianeta pulito per tutti: visione strategica europea a lungo termine per un'economia prospera, moderna, competitiva e climaticamente neutrale", COM (2018)773, finale.

21. La Direttiva stessa definisce come rendimento energetico di un edificio: "la quantità di energia effettivamente consumata o che si prevede possa essere necessaria per soddisfare i vari bisogni connessi ad un uso standard dell'edificio, compresi, tra gli altri, il riscaldamento, il riscaldamento dell'acqua, il raffreddamento, la ventilazione e l'illuminazione".

22. nZEB: nearly Zero Energy Building

23. Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio 2018/844/UE del 30 maggio 2018 che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica.



[1.10] Effetti dei cambiamenti climatici in Europa. Tratta da: COM (2018)77, finale

L'attenzione agli aspetti energetici in ambito delle costruzioni, tuttavia, non è una problematica nuova. Essa fu affrontata a livello europeo da una serie di Direttive, volte a recepire le decisioni assunte nei COP e a tramutarle in principi specifici applicabili in campo edilizio. La sequenza temporale delle direttive chiave è presentata in Figura 1.11.

La direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico nell'edilizia, denominata "Energy Performance of Building Directive" viene emanata per conformarsi ai principi del Protocollo di Kyoto. L'obiettivo è di incentivare il miglioramento del rendimento energetico²¹ degli edifici, tenendo conto delle diverse condizioni locali e caratteristiche climatiche. Inoltre, viene imposta l'obbligatorietà della certificazione energetica, al fine di rendere chiare e trasparenti le prestazioni energetiche dell'immobile, diventando un motore per promuovere il miglioramento degli edifici.

Il secondo passo è rappresentato dalla direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia (rifusione). In essa vengono inseriti dei requisiti aggiuntivi volti a migliorare la qualità delle certificazioni energetiche, tuttavia, l'innovazione sta nell'introduzione degli Edifici a energia quasi zero.

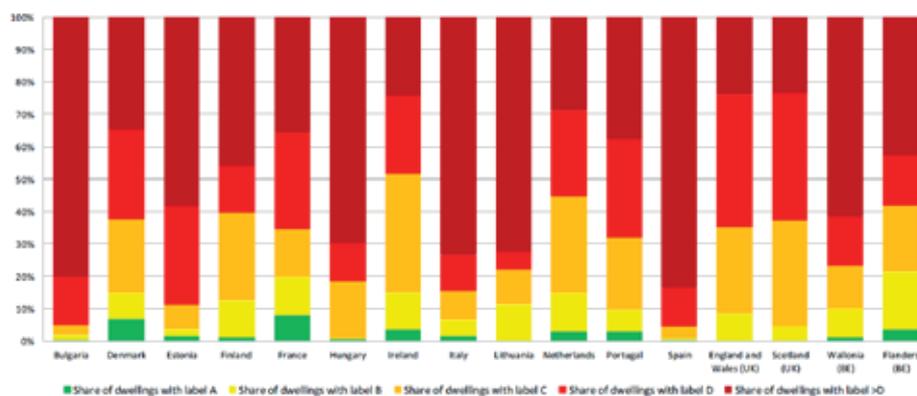
Gli nZEB²² vengono definiti come: "edificio ad altissima prestazione energetica. Il fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo dovrebbe essere coperto in misura molto significativa da energie da fonti rinnovabili, compresa l'energia da fonti rinnovabili prodotta in loco o nelle vicinanze"²³ e, all'articolo 9, viene prescritto che tutti gli edifici di nuova costruzione siano a energia quasi zero entro il 31/12/2020, con un'anticipazione di due anni per gli edifici pubblici.



[1.11] Sequenza temporale delle direttive europee relative al certificato energetico. Tratta da: Li et al. (2019)

L'ultima direttiva, la 2018/844/UE, impone ad ogni stato membro di redigere una strategia a lungo termine per incentivare la ristrutturazione del sistema edilizio al fine che esso sia decarbonizzato e ad alta efficienza energetica entro il 2050, in linea con gli obiettivi di impatto zero sul clima.

Per essere allineati agli obiettivi europei, il patrimonio edilizio dovrebbe essere composto principalmente da edifici altamente efficienti dal punto di vista energetico, ciò equivale a richiedere una classe energetica di livello A. Da un'analisi dei dati attuali, presentati in Figura 1.12, si può osservare come solo una piccola parte di edifici abbia i requisiti ottimali, mentre la maggior parte degli edifici ricada nella classe energetica D o inferiore.



[1.12] Distribuzione degli edifici in UE per classe di certificazione energetica.
Tratto da: Building Performance Institute Europe (2017)

1.4 CONSIDERAZIONI FINALI

Il dibattito del XXI secolo è incentrato sul cambiamento climatico e sulle possibili azioni umane per una sua mitigazione. Il settore delle costruzioni, a causa del notevole quantitativo di emissioni che produce, ha un ruolo chiave nelle azioni per il contenimento dell'innalzamento della temperatura entro i 1,5 °C.

La risposta architettonica è un nuovo modello edilizio, ad alte prestazioni energetiche e il cui basso fabbisogno è sostenuto principalmente da fonti rinnovabili, il *nearly Zero Energy Building*.

Il modello, incentrato nell'esigenza di salvaguardia dell'ambiente, predilige i sistemi a controllo passivo in grado di assicurare il comfort interno, mitigando l'impatto ambientale.

Le caratteristiche dell'involucro edilizio mutano per far fronte alle nuove funzioni; i sistemi di vetro facciata richiedono lo sviluppo di sistemi di schermatura adattivi in grado di sfruttare gli apporti solari e mitigare le dispersioni termiche.

Lo stato dell'arte dell'involucro vetrato è analizzato nel secondo capitolo, prima tramite i sistemi di facciate continue e nel seguito tramite i sistemi di schermatura solare adattivi. Questi nuovi elementi tecnologici rivestono un ruolo chiave nello sviluppo di un'architettura sia sostenibile sia ottimale per gli utenti

CAPITOLO 2

**INVOLUCRO ARCHITETTONICO VETRATO:
STATO DELL'ARTE**

2.1 SISTEMI DI FACCIATA CONTINUA

2.1.1 Cenni storici

2.2.1 Stato dell'arte

2.2 SISTEMI DI SCHERMATURA ADATTIVI

2.2.1 Cenni storici

2.2.2 Stato dell'arte

2.1 SISTEMI DI FACCIATA CONTINUA

2.1.1 Cenni storici

I primi utilizzi del vetro nell'architettura risalgono alla seconda metà dell'Ottocento quando, nei centri di distribuzione urbana, furono introdotti elementi in ghisa e ferro insieme a vetrate modulari. Lo sviluppo di componenti prefabbricati permetteva sia una notevole velocità costruttiva sia una distribuzione su larghe distanze.

La prima galleria con volta a botte vetrata fu la Galerie d'Orléan, costruita nel 1829 da Pierre Leonard Fontain nei pressi del Palais Royal.

In Inghilterra, sede dei maggiori sviluppi della rivoluzione industriale, l'utilizzo del vetro si diffuse solo in seguito all'abrogazione dell'imposta sull'utilizzo del vetro, nel 1845. Lo sviluppo fu ulteriormente favorito dalla formalizzazione dei concetti della scienza delle costruzioni che incentivarono l'evolversi delle tecniche di calcolo e di produzione industriale.

La Palm House nei Kew Garden, costruita tra il 1845 e il 1848, su progetto di Richard Turner e Decimus Burton, fu una delle prime strutture che sfruttò l'elevata disponibilità di vetro, conseguente all'abrogazione dell'imposta che vergeva su di esso. Lo stesso Turner, insieme a Joseph Locke, ampliarono l'utilizzo delle vetrate anche nelle nascenti stazioni ferroviarie, ne è da esempio la stazione di Lime Street Station, costruita a Liverpool tra il 1849 e il 1850.

In questi progetti furono impiegati i nuovi materiali e tecnologie tuttavia rimasero legati alle configurazioni spaziali tipiche dell'architettura tradizionale, come la volta a botte, e all'applicazione di elementi ornamentali.

L'esempio emblematico, sia per la scala monumentale sia per le innovazioni tecniche applicate, fu il Crystal Palace costruito a Londra per la prima Esposizione Universale del 1851. Joseph Paxton, botanico e giardiniere, sviluppò il progetto sulla base di tecnologie da lui sviluppate per la creazione di serre.

Il progetto inizialmente presentava una pianta a cinque navate, configurazione tipica dell'architettura delle basiliche romane, alla quale fu aggiunto un traverso voltato a botte al fine di preservare alcuni alberi secolari presenti ad Hyde Park.

L'edificio, benché costruito come una serra, necessitava di eliminare

FIGURE:

- 2.1 Galerie d'Orléans,
Fontain, Parigi (FR),
1829
- 2.2 Palm House, Turner e
Burton, Londra (GB),
1848
- 2.3 Lime Street Station,
Turner e Locke,
Liverpool (GB), 1850



[2.1]



[2.2]



[2.3]

l'accumulo di calore e di consentire la ventilazione degli spazi interni. Paxton sviluppa un meccanismo di aerazione della botte, detto *louvre*: delle lamelle a forma di S, collegate tramite bielle e ingranaggi, potevano essere aperte all'occorrenza permettendo la ventilazione.

Per limitare l'incidenza dei raggi solari, che attraversavano i 93 000 m² di involucro vetrato, furono installati dei tendoni di canapa per ombreggiare il tetto e, all'interno, dei baldacchini di stoffa che, sebbene non fossero propriamente parte della struttura, possono essere interpretati come un primo sviluppo di schermatura solare. E' interessante osservare come i primi sistemi di ombreggiamento si svilupparono contestualmente nel primo edificio interamente in vetro.

Il Cristal Palace, a seguito della manifestazione, fu smontato e ricostruito nella zona sud di Londra, azione possibile solo grazie agli elementi prefabbricati. A causa degli elevati costi di manutenzione e dello stato di deterioramento, la struttura non trovò un nuovo utilizzo e venne accidentalmente distrutta dall'incendio del 30 novembre 1936.

L'architettura della fine del nono secolo fu contrassegnata dall'introduzione e sviluppo di una nuova tecnica costruttiva: il calcestruzzo armato.

Il brevetto del 1892, di François Hennebique segnò la svolta nei possibili campi di applicazione del materiale poiché, grazie all'introduzione di barre a sezione circolare che potevano essere incurvate e agganciate, si superarono i limiti iniziali, tant'è che divenne una tecnica consolidata già agli inizi del Novecento.

La rivoluzione industriale portò con sé anche notevoli cambiamenti a livello socio-culturale che si rifletterono in ambito architettonico. Le condizioni di vita precarie e l'elevata domanda abitativa erano il centro delle problematiche delle nuove città, le quali posero le basi delle riflessioni sulle caratteristiche dell'alloggio.

Una critica alla "cultura del mattone" venne formulata tramite il Padiglione di Vetro, costruito nel 1914 per l'esposizione del Werkbund, presenta una cupola sfaccettata, pareti in blocchi di vetro e un mosaico in vetro di rivestimento della sala. Sul Padiglione "erano incisi gli aforismi di Sheerbart: 'La luce vuole il cristallo'; 'Il vetro porta con sé una nuova epoca'; 'Siamo rattristati dalla cultura del mattone'; 'Senza un palazzo di vetro la vita diventa un peso'; 'L'edificio in mattoni ci danneggia'; 'Il vetro



[2.4]



[2.5]



[2.6]

2.4 Crystal Palace,
Paxton, Londra (GB),
1851

2.5 Crystal Palace.
Foto del 30 Novembre
1936 durante l'incendio

2.6 Padiglione di vetro,
Taut, Colonia (DE),
1914

colorato elimina l'odio"¹ che esprimevano tutto il dissenso dei riguardi dell'architettura residenziale sviluppatasi nell'Ottocento. I nuovi concetti che animavano la società e l'architettura sono espressi dalle parole di Paul Scheerbart in *Glasarchitektur* del 1914, di cui si riprende una citazione sulla centralità del vetro nella nuova architettura:

*"Per innalzare la nostra cultura ad un livello superiore siamo obbligati, che ci piaccia o no, a trasformare la nostra architettura. E ciò sarà possibile soltanto se libereremo i locali nei quali viviamo dal loro carattere di spazio chiuso. Tuttavia, possiamo fare ciò soltanto introducendo una architettura del vetro, che lasci entrare la luce del sole, della luna e delle stelle nelle stanze, non soltanto attraverso scarse finestre, ma attraverso il maggior numero possibile di pareti, costituite interamente di vetro, di vetro colorato."*¹

In nuovo stile architettonico legato al funzionalismo degli oggetti e dello spazio, in cui l'elemento decorativo risulta superfluo, si origina nei primi anni del Novecento con il Movimento Moderno.

La scuola del Bauhaus nasce con il suo manifesto nel 1919, i cui principi si basavano sul programma sull'architettura di Taut, e sul contributo di Walter Gropius, primo direttore della scuola.

Gropius fu uno dei maestri del Movimento Moderno. I suoi ideali di indipendenza dai canoni tradizionali e la necessità di costituire un collegamento tra esterno e interno sono ben rappresentati nell'Officina per la produzione di stampi da scarpa, detta "Fagus", progettata da Gropius e Meyer. In questo edificio, risalente al 1911, si ha il primo esempio applicativo di facciata continua; infatti, le tradizionali pareti esterne massive furono sostituite da un tamponamento leggero in vetro che, per la prima volta, si estendeva verticalmente lungo tre piani. Le ampie vetrate erano ancora racchiuse dalle colonne e dei pannelli opachi furono inserite in corrispondenza dei solai.

Le innovative vetrate furono riproposte da Gropius nella sede del Bauhaus di Dessau da lui progettata nel 1925-1926.

L'edificio è in stile internazionale, completamente privo di elementi ornamentali e, nella zona dei laboratori, i pilastri sono arretrati per lasciare posto ad una facciata continua che ricopre ininterrottamente i tre piani dell'edificio, senza interruzioni a livello dei solai. A causa dei singoli vetri di cui era costituita e dell'elevata superficie vetrata, i locali

1. Frampton, K. (2008). *Storia dell'architettura moderna*. Bologna: Zanichelli.

FIGURE:

- 2.7 Officine "Fagus", Gropius e Meyer, Alfeld (DE), 1911
- 2.8 Edificio Bauhaus, Gropius, Dessau (DE), 1926
- 2.9 Sedia Wassily, Marcel Breuer, 1925 nell'edificio Bauhaus



[2.7]



[2.8]



[2.9]

presentavano problematiche dal punto di vista della radiazione solare e del mantenimento del comfort interno, che furono mitigate tramite l'applicazione di tende, tuttavia esse interrompevano il rapporto tra gli spazi interni e l'ambiente esterno ricercato nel progetto.

Altro pioniere del Movimento Moderno fu Charles-Edouard Jeanneret, conosciuto con lo pseudonimo di Le Corbusier. Sempre nel 1926, egli formulò i *les 5 points d'une architecture nouvelle* al fine di formalizzare gli elementi tecnici della nuova architettura, ovvero:

1. "I pilotis, che sollevano il volume dal terreno;
2. la pianta libera, ottenuta grazie alla separazione dei pilastri portanti dai muri che suddividono lo spazio;
3. la facciata libera, il corollario della pianta libera in senso verticale;
4. la lunga finestra orizzontale o fenêtre en longueur
5. il tetto-giardino, che aveva presumibilmente lo scopo di recuperare la porzione di terreno coperto dalla casa."¹

In Villa Savoye, costruita tra il 1928 e il 1931 a Poissy, trovano applicazione tutti i principi da lui formulati tant'è che essa divenne il simbolo del movimento moderno.

Le facciate presentano delle membrature leggere, ciò è possibile solo grazie al sistema a telaio, che le libera dalle funzioni portanti, rendendo la finestra un simbolo architettonico e non solo un elemento tecnologico per favorire l'ingresso della luce.

L'utilizzo estensivo del vetro, come già osservato, consentiva l'ingresso della luce che, soprattutto nei climi caldi, può portare ad un aumento eccessivo della temperatura interna. Questa fu la problematica chiave del secondo periodo di Le Corbusier, che lo portò a sviluppare i *brise soleil*. La storia delle schermature solari, sviluppata nel paragrafo 2.2.1, inizia proprio dai progetti di Le Corbusier fuori dai confini europei.

Il Bauhaus fu diretto da altri 2 grandi pionieri del movimento moderno: Adolf Meyer e Mies van de Rohe.

Il periodo di Meyer fu contrassegnato per l'introduzione, nelle attività della scuola, dei concetti di responsabilità sociale. Nella sezione di architettura, essi trovarono concretezza tramite le ricerche per la minimizzazione economica tramite la disposizione planimetrica e lo sviluppo di metodi per il calcolo della luce, naturale e artificiale, degli



[2.10]



[2.11]



[2.12]

2.10 Edificio Bauhaus.
Dettaglio sistema
di apertura del
curtain wall

2.11 Villa Savoye,
Le Corbusier,
Poissy (FR), 1931

2.12 Villa Savoye.
Dettaglio curtain
wall al piano terra

apporti di calore e sull'acustica, anticipando temi chiave dell'architettura contemporanea.

Mies, ultimo direttore del Bauhaus prima della chiusura della scuola, è stato il pioniere nella ricerca delle possibili applicazioni architettoniche delle facciate continue.

Per comprendere l'utilizzo esemplare del vetro che contraddistingue l'architettura di Mies, bisogna osservarne le origini. Nel 1922 aderì a un movimento espressionista tedesco in cui, venendo in contatto con le idee di Bruno Taut, mise le basi per le prime riflessioni sull'utilizzo del vetro. Del vetro Mies apprezzava non solo l'illusoria leggerezza ma anche le varie sfaccettature che era in grado di esprimere quando incontrava la luce, in un binomio tra trasparenza e corposità.

Il primo capolavoro fu il Padiglione della Germania per l'Esposizione mondiale di Barcellona del 1929. In esso sono presenti richiami allo stile neoclassico, come la griglia regolare a 8 pilastri cruciformi e richiami all'architettura di Frank Lloyd Wright, di cui riprende le ampie coperture aggettanti che contraddistinguono Robbie House, spogliate della sua monumentalità. La pianta libera permise a Mies di utilizzare le pareti vetrate sia come filtro trasparente in grado di collegare gli ambienti interni con l'esterno, sia come superfici riflettenti in grado di creare dei giochi di luce con i pregiati rivestimenti dei setti interni: piena espressione del binomio del vetro.

Nel 1928 Mies si trasferì negli Stati Uniti, questo cambiamento coincise con una trasformazione nella sua architettura in cui l'utilizzo di elementi asimmetrici lasciò il posto alla ricerca della monumentalità e della simmetria.

In Casa Farnsworth, progettata tra il 1945 e il 1950, ripresenta la forma del volume unico rivestito in vetro, racchiuso tra il tetto aggettante e l'ampio soppalco dell'ingresso. Essa venne progettata per Edith Farnsworth e fu realizzata quattro anni dopo a Plano (Illinois).

La facciata continua presenta lastre di cristallo ed elementi di sostegno in acciaio, verniciati di bianco che a differenza del periodo europeo, sono integrati nel filo esterno della facciata. Internamente sono applicate delle bianche tende in shantung di seta naturale.

L'edificio fu attaccato dal punto di vista concettuale: l'involucro

2. <https://www.som.com/projects/lever-house/>

FIGURE:

- 2.13 Padiglione di Barcellona, Mies van der Rohe, Barcellona (ES), 1929
- 2.14 Padiglione di Barcellona. Dettaglio curtain wall
- 2.15 Casa Farnsworth, Mies van der Rohe, Plano (US), 1951
- 2.16 Crown Hall dell'IIT, Mies van der Rohe, Chicago (US), 1956
- 2.17 Crown Hall. Dettaglio curtain wall
- 2.18 Lever House, Skidmore, Owings e Merrill, New York (US), 1952



[2.13]



[2.14]

completamente vetrato non offriva il senso di privacy che rispecchia il concetto di abitazione.

Altro edificio simbolo del volume unico rivestito da *curtain wall* è la Crown Hall costruita negli anni 1952-1956, come parte del campus dell'Illinois Institute of Technology, di cui Mies fu direttore della scuola di architettura dal 1939 al 1959. Ai pilastri incorporati nuovamente nella superficie vetrata fu affidato anche un ruolo simbolico: le finestre non erano più viste come membratura leggera ma come elemento in grado di svolgere le medesime funzioni portanti della muratura.

Nel contesto americano l'introduzione di ampie facciate vetrate nell'architettura risale alla fine del nono secolo con la Scuola di Chicago. Il primo grattacielo che sfrutta le possibilità delle costruzioni a telaio in acciaio per incorporare ampi rivestimenti vetrati, fu il Reliance Building di Burnham e Root, costruito a Chicago tra il 1890 e il 1895.

La facciata si compone di ampie finestre con sviluppo orizzontale e di rivestimenti in terracotta, posti all'altezza dell'interpiano, con ornamenti in stile gotico. Essa è considerata come la prima realizzazione di una facciata continua, elemento che contraddistingue i grattacieli moderni.

Negli anni Cinquanta, furono costruiti a New York due edifici simbolo del *curtain wall*: il Lever House e il Seagram Building.

Il Lever House "introdusse l'*International Style* in America e trasformò il design delle torri urbane in tutto il mondo."²

L'edificio innovativo, progettato da Skidmore, Owings & Merrill, presenta una facciata in acciaio con vetri nelle colorazioni del blu-verde, in grado di riflettere i raggi solari. Completato nel 1952, fu riconosciuto come il primo punto di riferimento modernista di New York.

Il Seagram Building, progettato da Mies Van der Rohe e Johnson, è il simbolo del nuovo linguaggio architettonico, e divenne un'ulteriore punto di riferimento nella progettazione dei grattacieli.

Attualmente gli sviluppi delle facciate continue sono incentrati nell'accentuazione della trasparenza, mantenendo i requisiti di comfort interno e la minimizzazione della richiesta energetica, tramite l'ottimizzazione delle proprietà termiche e luminose delle lastre in vetro e l'integrazione di sistemi di schermatura solare adattivi.



[2.15]



[2.16]



[2.17]



[2.18]

2.1.2 Stato dell'arte

I sistemi di facciata continua, o *curtain wall*, sono una particolare tipologia di chiusura in cui il vetro, elemento predominante, costituisce interamente il prospetto e la continuità è interrotta esclusivamente dal sistema di supporto.

I componenti del sistema possono essere presentati seguendo il collegamento tra il vetro e la struttura principale, nello specifico: i pannelli vengono bloccati al sistema di supporto tramite fissaggio, costituendo la struttura autoportante, successivamente collegata alla struttura principale tramite l'ancoraggio. I carichi che sollecitano i pannelli vengono quindi trasferiti prima al sistema di supporto, elemento in grado di fornire stabilità statica al sistema, e poi alla struttura principale dell'edificio tramite l'ancoraggio.

Nella descrizione degli elementi del sistema c'è un implicito riferimento ad una delle funzioni garantite dall'involucro edilizio: la stabilità e resistenza meccanica ai carichi esterni, dovuti all'azione degli agenti atmosferici, inoltre contribuisce ad un adeguato comfort termico, visivo e acustico e alla regolazione del calore.

Dai richiami storici è possibile cogliere come l'involucro edilizio sia l'elemento caratterizzante l'aspetto dell'edificio, e fu oggetto di notevoli mutazioni finalizzate a costituire un'architettura che riflettesse gli ideali dell'epoca.

La regolazione dei flussi tra spazi interno ed ambiente esterno, divenne il tema chiave degli sviluppi riguardanti l'involucro edilizio a partire dagli anni Novanta, quando l'involucro venne interpretato come "filtro selettivo". In tale ottica vennero sviluppati i sistemi più recenti come la facciata a doppia pelle in cui, tramite l'applicazione di due sistemi di facciata, si crea un'intercapedine che sfrutta i flussi d'aria interni per contribuire alla ventilazione dei locali. Essa sarà analizzata come ultima tipologia a conclusione del paragrafo.

I sistemi di facciata possono essere classificati, in base alla tipologia costruttiva, in tre sistemi principali:

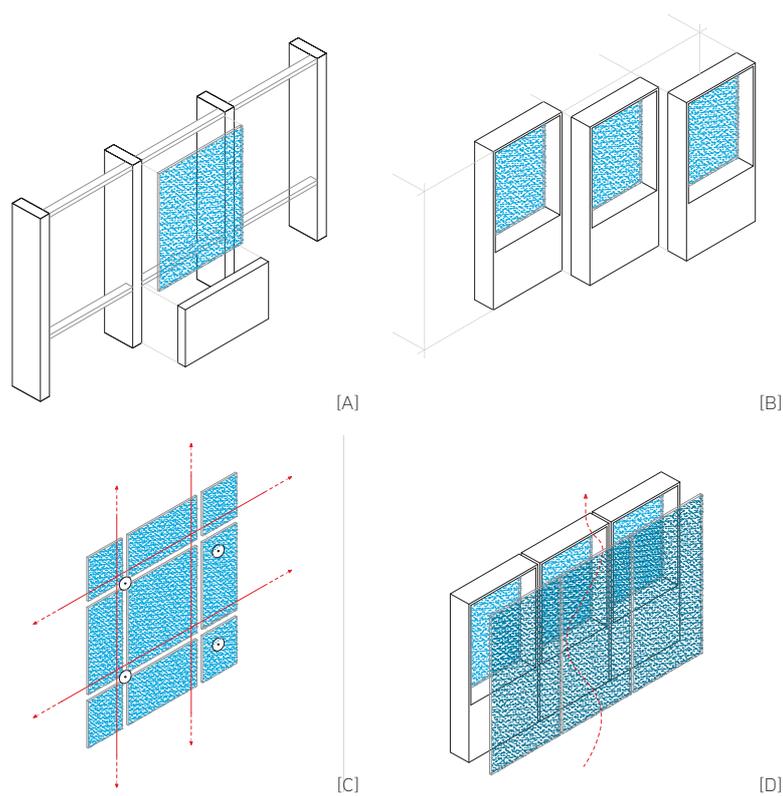
- montanti e trasversi;
- cellulare;
- fissaggio puntuale;

rappresentati schematicamente in Figura 2.19.

Per ognuno di essi sono analizzati gli elementi costitutivi del sistema, tramite la presentazione di un prodotto commerciale, e le possibilità applicative tramite l'analisi di quattro edifici, con carattere storico o innovativo:

- Seagram Building
- 70 St. Mary Axe
- Channel 4 headquarters
- Lakhta center.

All'interno delle varie tipologie costruttive, è possibile suddividere nuovamente le facciate continue sulla base del sistema di fissaggio utilizzato. Quando il pannello vetrato è vincolato tramite un battente esterno o un fermavetro, si parla di sistema meccanico mentre, quando il vincolo è sviluppato da sigillanti siliconici, si parla di sistemi strutturali.



[2.19] Classificazione dei sistemi di facciata continua in base alla tipologia costruttiva:
[A] Montanti e traversi, [B] Cellulare, [C] Fissaggio puntuale, [D] Doppia pelle
Ridisegnato dall'autore. Tratto da: Rossetti (2018)

Sistema a montanti e traversi

Il sistema a montanti e traversi, o *stick system*, è la tipologia con cui vennero costruite le prime facciate continue. Il Seagram Building, costruito nel 1958 a New York, fu uno dei primi grattacieli che ne sfruttò le potenzialità, mentre attualmente il sistema è impiegato principalmente in edifici medio-bassi.

Il reticolo strutturale portante è costituito da elementi verticali: montanti, ed elementi orizzontali: traversi. Essi costituiscono il sistema di supporto, generalmente in alluminio anche se trovano applicazione materiali come l'acciaio o, per le piccole realizzazioni, il legno.

Una volta installato il sistema di supporto, i pannelli vengono alloggiati e fissati ad esso. Il fissaggio è solitamente di tipo meccanico, a battente esterno o a pressione, e avviene per ogni singolo pannello, rendendolo così indipendente dagli adiacenti.

I pannelli utilizzati possono essere sia trasparenti, sia opachi, l'importante è avere l'accortezza di garantire prestazioni omogenee nella facciata.

L'ancoraggio del sistema autoportante alla struttura principale avviene tramite profili guida a C in acciaio, collegati tramite profili bullonati alle travi di bordo o ai solai. Il sistema è regolabile nelle tre direzioni, caratteristica che lo rende adattabile alle tolleranze di fabbricazione e di posa in opera, nonché a sopportare le dilatazioni che si sviluppano a causa dell'elevato carico termico che insiste sulla facciata.

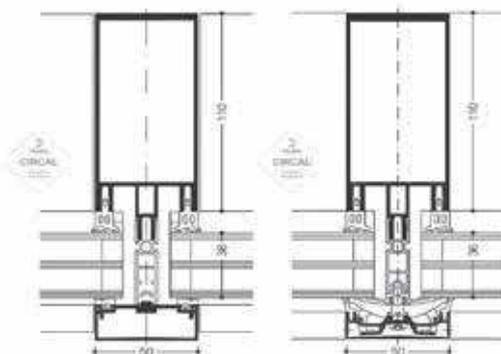
I vantaggi della tipologia a montanti e traversi sono:

- la possibilità di realizzare superfici complesse ed irregolari;
- la facilità di stoccaggio degli elementi costituenti e lo spazio contenuto che necessitano per il montaggio;

In contrapposizione si trovano alcuni svantaggi dovuti al fatto che il sistema viene assemblato completamente in loco, ciò implica:

- una posa lenta, soprattutto se paragonata ai sistemi cellulari;
- la necessità di prevedere ponteggi esterni che influiscono sui costi già elevati per l'installazione;
- la necessità di un accurato controllo della qualità della posa in opera, poiché essa può influenzare sulle prestazioni della facciata in esercizio.

Nelle Figure 2.20 e 2.21 è rappresentato il sistema a montanti e traversi WICTEC 50 della ditta WICOMA.



[2.20] Sezione del sistema WICTEC 50



[2.21] Vista assometrica del sistema WICTEC 50



[2.22]

SEAGRAM BUILDING

MIES VAN DER ROHE E JOHNSON

NEW YORK (US)

1958

Il Seagram Building è un grattacielo di 38 piani costruito a New York tra il 1954 e il 1958. L'edificio, realizzato su progetto di Ludwig Mies van der Rohe assieme a Philip Johnson, benché fu il primo progetto di un edificio alto per uffici di Mies, definì gli standard tutt'ora attuali di grattacielo.

Esso è una delle maggiori espressioni del concetto "less is more" poiché prevalgono ordine e razionalità e l'assenza di ornamenti aggiuntivi.

La struttura portante a scheletro è composta da sei pilastri sul prospetto principale, e da quattro pilastri sul prospetto laterale, che creano una maglia quadrata, arretrata rispetto alla facciata.

A causa delle norme anti-incendio dell'epoca, tutto lo scheletro in acciaio dovette essere rivestito, in contrasto con l'idea che fossero gli elementi strutturali stessi a definire l'apparato decorativo dell'edificio. Il concetto viene trasmesso ugualmente grazie alle travi a I in bronzo, o inserite esternamente alla facciata continua, le quali non

hanno funzioni strutturali, se non di irrigidimento della facciata.

L'elemento architettonico di massimo rilievo del Seagram Building è la facciata continua, costituita da un sistema a montanti e traversi, in acciaio, e vetri singoli di colore scuro, pensati come una prima schermatura dal sole.

All'interno delle tende a veneziana forniscono un ulteriore elemento schermante. Le quali, al fine di evitare irregolarità nel prospetto, furono progettate per poter essere posizionate solamente in 3 modalità: aperte, semiaperte o chiuse.

Il legame dell'edificio con il contesto, elemento ricercato in tutti i progetti di Mies, fu sviluppato tramite la piazza ottenuta dall'arretramento dell'edificio dal fronte strada. Essa è sia luogo di socializzazione, sia critica alla forte densità edilizia della metropoli.

La città di New York nel 2009 istituì una legge che obbligava alla divulgazione delle prestazioni energetiche di molti edifici, tra cui il Seagram.

Il Seagram Building ottenne soli 3 punti, sui 100 totali della classificazione Energy Star, a causa dell'illuminazione a fluorescenza e delle basse qualità termiche dei singoli vetri utilizzati, problematica che accomuna gli esordi delle facciate continue. Nell'articolo del New York Times: *City's Law Tracking Energy Use Yields Some Surprises* è presentato un'interessante analisi dei punteggi ottenuti da alcuni edifici iconici che contraddistinguono lo skyline di New York.

FIGURE Seagram Building:

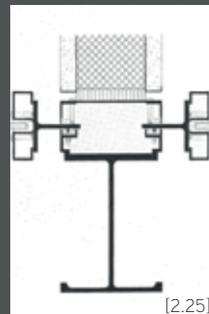
- 2.22 Vista del prospetto principale
- 2.23 Vista in dettaglio del sistema di facciata
- 2.24 Vista del sistema di facciata al piano terra
- 2.25 Disegno costruttivo del sistema di facciata
- 2.26 Vista della piazza e dell'ingresso
- 2.27 Vista dell'edificio con annessa piazza



[2.23]



[2.24]



[2.25]



[2.26]



[2.27]

Sistema cellulare

Il sistema cellulare, o *unitised system*, è il più tecnologicamente avanzato dei sistemi di facciata, e attualmente trova notevoli applicazioni negli edifici alti.

La cellula, o *unit*, è l'elemento base del sistema, contenente sia il sistema di supporto, sia il pannello vetrato. Essa è completamente prefabbricata, permettendo un assemblaggio ottimale nel contesto controllato degli stabilimenti di produzione.

Il vantaggio maggiore del sistema è che le cellule arrivano in cantiere pronte per l'installazione, limitando le lavorazioni in loco al solo montaggio sull'edificio. Questo conferisce al sistema una notevole velocità di posa in opera e una limitazione dei costi d'installazione, tuttavia ciò impone accortezze nel trasporto, stoccaggio e movimentazione delle cellule, poiché il mantenimento in condizioni igrotermiche errate o urti accidentali possono compromettere il sistema, generando fessurazioni o rotture delle lastre oppure danneggiando le guarnizioni di tenuta.

Il montaggio delle cellule può avvenire direttamente dall'interno dell'edificio, evitando l'utilizzo e le problematiche dei ponteggi esterni.

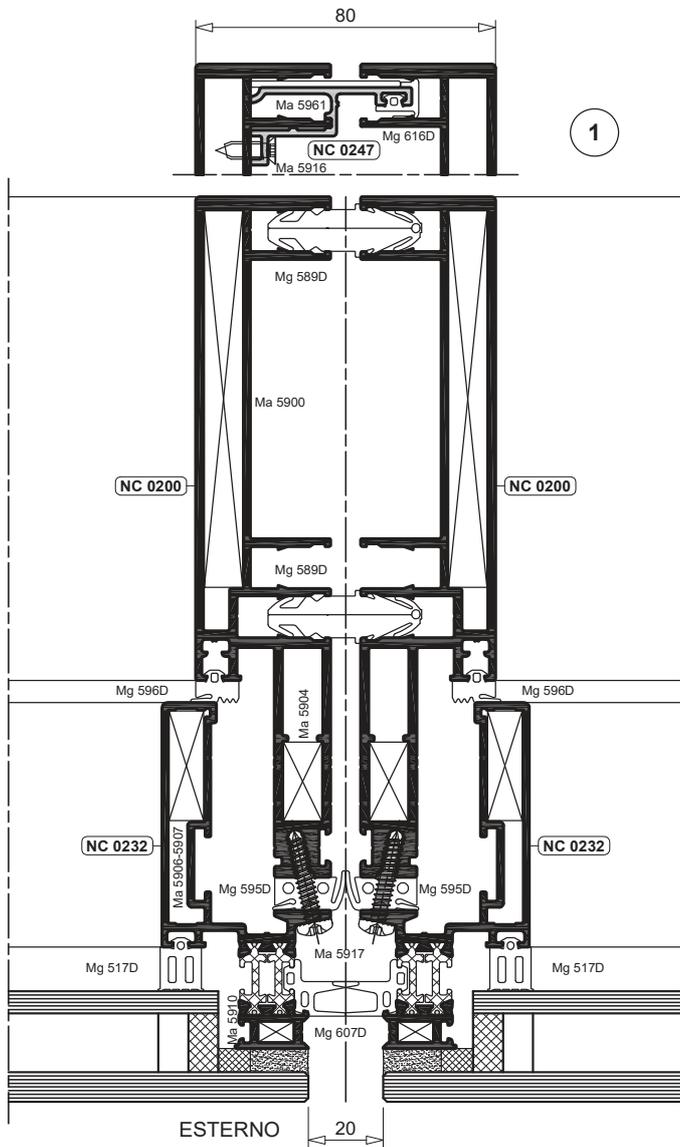
La produzione delle cellule, in ambienti controllati, conferisce al sistema una qualità superiore rispetto al sistema a montanti e traversi, assemblato in opera. Lo studio condotto da Yalaz su prototipi in scala 1:1 ha dimostrato che "nelle stesse condizioni, gli *stick system* possono essere più fragili dei *panel system* considerando le variazioni di prestazione della tenuta all'aria e all'acqua"³.

Il fissaggio può avvenire sia meccanicamente, tramite pressore o fermavetro, sia tramite silicone strutturale. I dettagli costruttivi, nelle quattro possibili soluzioni di fissaggio, sono analizzate per il sistema POLIEDRA SKY FAST 80 della METRA.

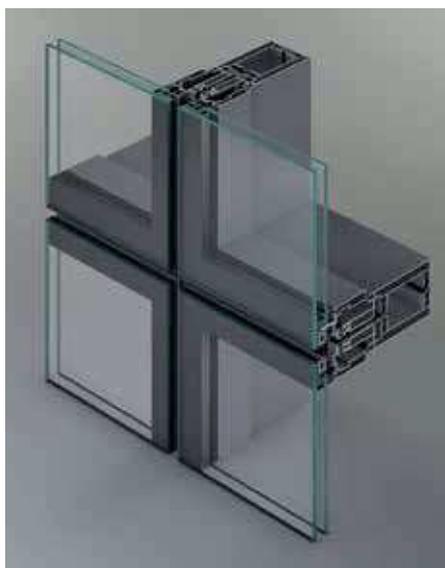
La soluzione con silicone strutturale, in cui le vetrate sono fissate al montante interno tramite giunti siliconici, permette di costituire facciate interamente vetrate in cui la continuità del vetro è interrotta solo dal giunto, di basso impatto visivo, mantenendo le qualità di un sistema di supporto continuo di montanti interni.

Le facciate dell'edificio a 70 St. Mary Axe di Londra, sono l'esempio applicativo analizzato, sia per le loro qualità di adeguamento al contesto, sia per le qualità energetiche del sistema.

3. Yalaz, E.T. et al. (2018). Lifetime performance evaluation of stick and panel curtain wall systems by full-scale testing. *Construction and Building Materials*, 170, 254-271.



[2.28] Sezione della soluzione strutturale a lastre sfalsate sistema POLIEDRA SKY FAST 80



[2.30] Vista assonometrica del sistema POLIEDRA SKY FAST 80

L'utilizzo del silicone strutturale come sistema di fissaggio deriva dalle sperimentazioni degli anni Trenta negli Stati Uniti, e vede un notevole sviluppo, a partire dagli anni Settanta, soprattutto per le possibilità di realizzare facciate prive di profili a vista.

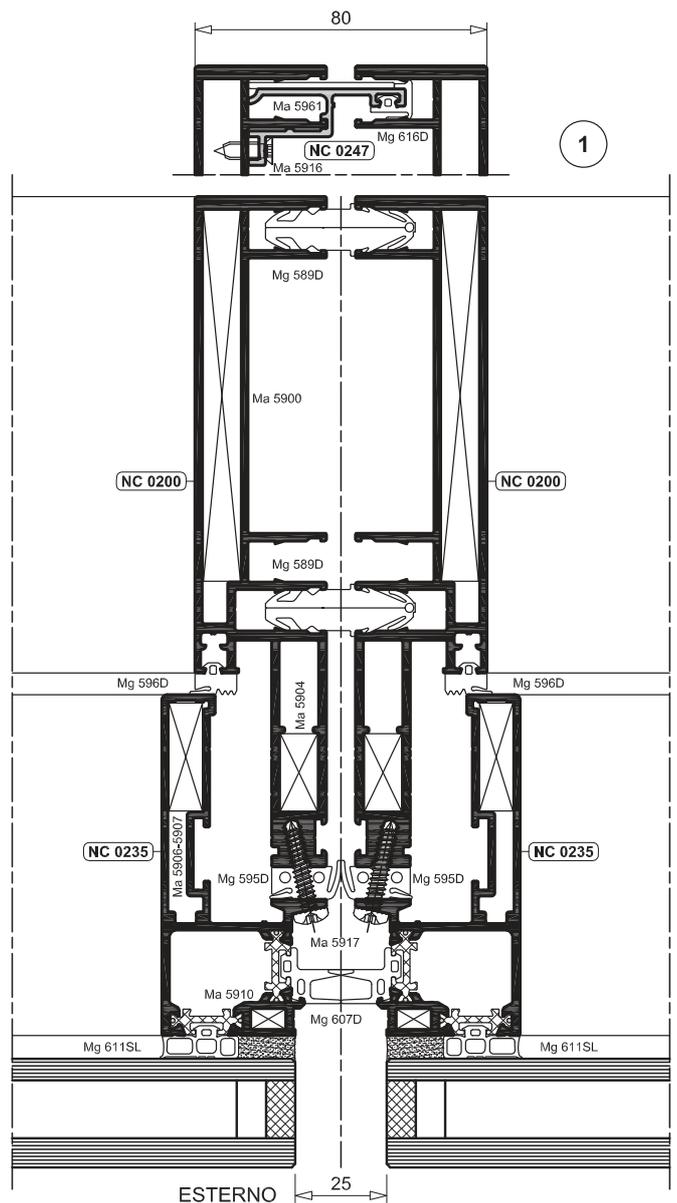
Il fissaggio con silicone strutturale può essere di due tipologie:

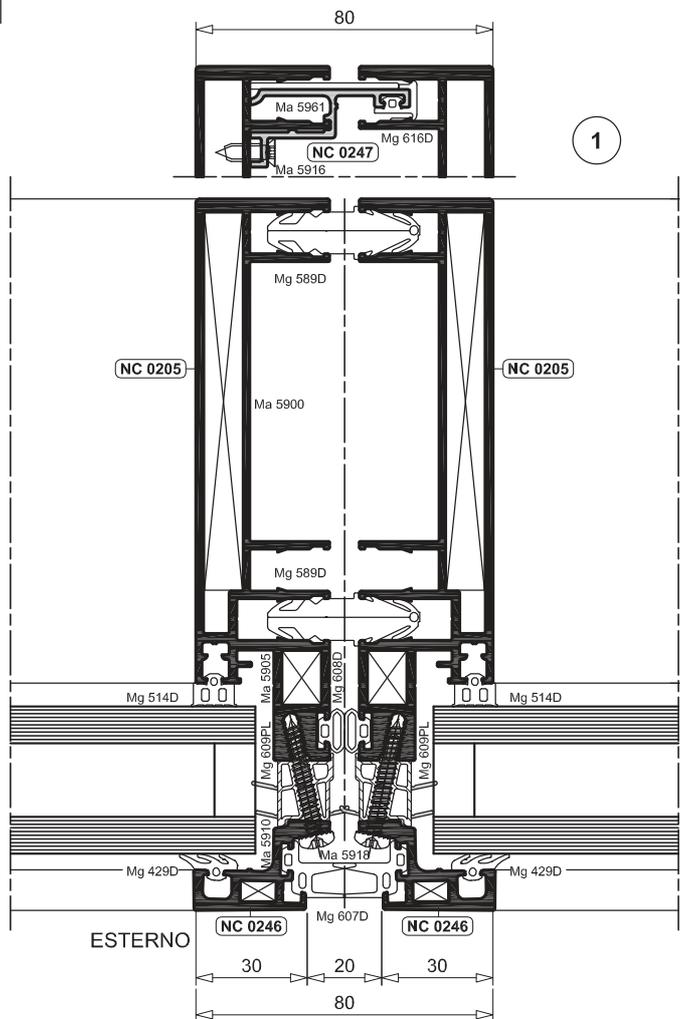
- Silicone strutturale a 2 lati:
Due bordi del tamponamento utilizzano un sigillante silconico mentre i restanti 2 bordi sono fissati meccanicamente;

- Silicone strutturale a 4 lati:
I quattro lati del tamponamento presentano un sistema di fissaggio silconico. Il sistema necessita di essere installato in officina e di un successivo controllo qualità attento, per garantire la tenuta del sistema.

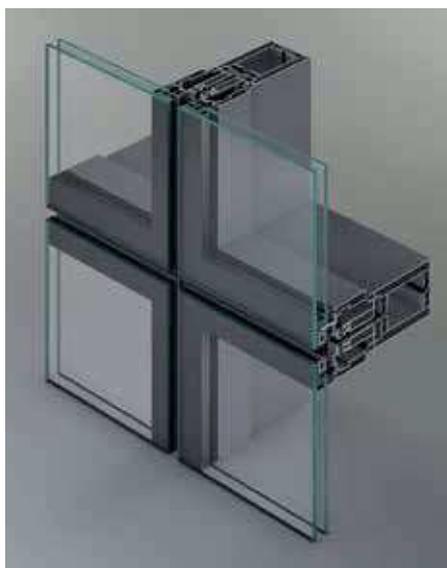
Il sistema a lastre falsate, in Figura 2.28, presenta la giunzione silconica, elemento contrassegnato da una puntinatura, nella lastra esterna del tamponamento, mentre nel sistema a lastre allineate, in Figura 2.29, la giunzione avviene sulla lastra interna.

[2.29] Sezione della soluzione strutturale a lastre allineate sistema POLIEDRA SKY FAST 80





[2.31] Sezione della soluzione meccanica a pressione sistema POLIEDRA SKY FAST 80



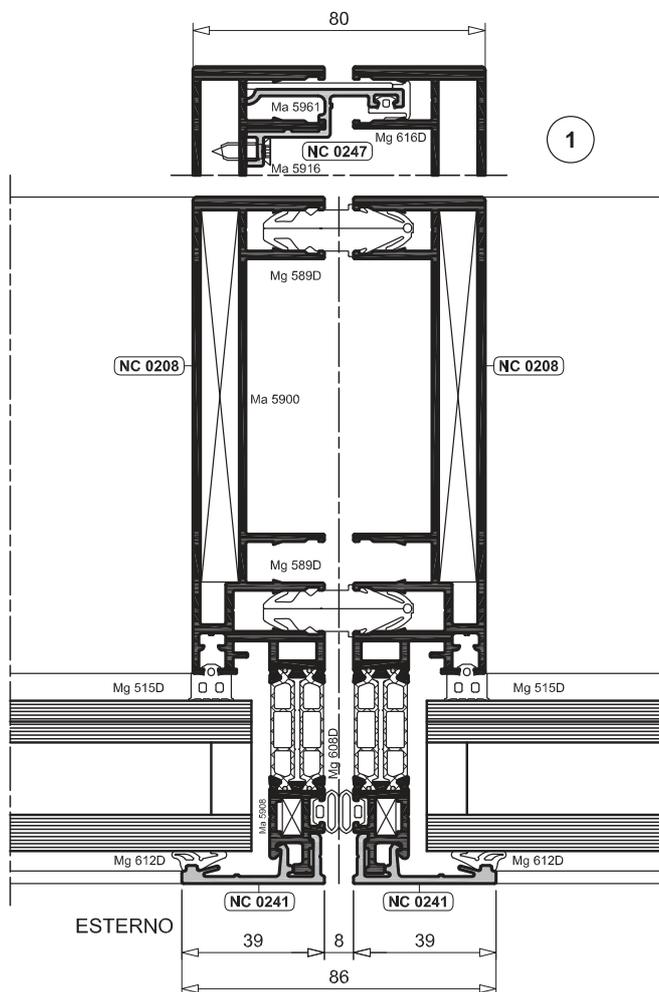
[2.33] Vista assonometrica del sistema POLIEDRA SKY FAST 80

Il sistema a pressione, presentato in Figura 2.31, presenta una piastra a L, fissata al telaio tramite una vite a testa cilindrica. Questo è il metodo di fissaggio più comune.

La guarnizione esterna, posta tra la piastra di pressione e il vetro, garantisce la tenuta agli agenti esterni, mentre la guarnizione interna, garantisce la continuità tra il telaio e il tamponamento.

Il sistema a fermavetro, presentato in Figura 2.32, presenta un fermavetro che blocca il bordo del tamponamento al telaio. La tenuta del sistema è garantita da guarnizioni a nastro compresse dal fermavetro.

[2.32] Sezione della soluzione meccanica a fermavetro sistema POLIEDRA SKY FAST 80





[2.34]



[2.35]



[2.36]



[2.37]

70 ST. MARY AXE

FOGGO ASSOCIATES

LONDRA (GB)

2019

Il 70 St. Mary axe è un edificio per uffici situato nella City di Londra. Progettato dello studio Foggo, la costruzione fu completa nel 2019.

L'edificio di forma semi-ellittica presenta due tipologie di rivestimento: nei prospetti Est e Ovest il sistema di facciata è piano mentre nei prospetti Nord e Sud la facciata è curva, per seguire l'andamento dell'edificio e presenta un sistema di schermatura esterne.

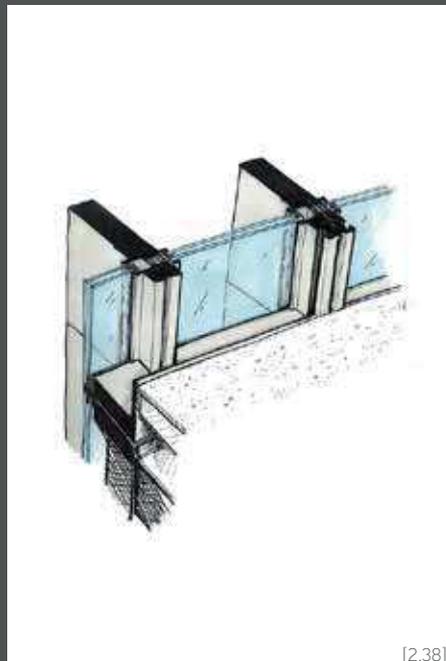
Le facciate piane sono costituite da un sistema cellulare con fissaggio mediante silicone strutturale. L'altezza della *unit* è pari all'interpiano che insieme all'assenza di cornici esterne, conferiscono al prospetto un aspetto completamente vetrato.

La protezione dai fenomeni di abbagliamento e il rispetto della privacy interna sono ottenute tramite un sistema di tende veneziane interne.

Diversamente, per i profili Nord e Sud più soggetti alla luce solare, il sistema di schermatura è esterno e costituiti da pinne in alluminio di colore bronzo, che proteggono dai raggi solari quando particolarmente inclinati, consentendo ugualmente l'ingresso della luce solare.

Il sistema è collegato alle cellule a fermavetro che, ognuna con una curvatura differente, costituiscono le facciate curve. Il prospetto è completato da quattro fasce in pannelli metallici che nascondono le colonne strutturali e negli angoli generano la continuità tra le due tipologie di curtain wall.

Per la sua sostenibilità l'edificio è stato certificato come BREEAM Excellent e LEED Gold.



[2.38]

FIGURE 70 St. MARY AXE:

2.34 Vista del prospetto principale e laterale

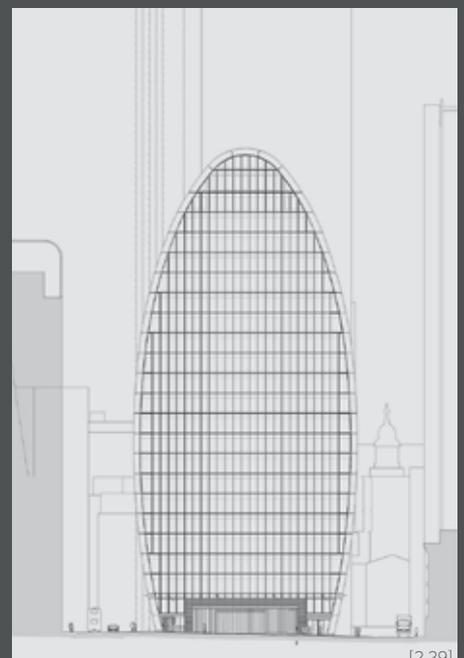
2.35 Vista dello skyline della City di Londra

2.36 Vista del sistema di facciata curvo dei prospetti Nord e Sud

2.37 Vista del 70 St. Mary Axe dall'interno, con dettaglio del sistema cellulare

2.38 Disegno assometrico del sistema di facciata dei prospetti curvi

2.39 Disegno del prospetto Est o Ovest con evidenziata la regolarità del sistema di facciata.



[2.39]

Sistema a fissaggi puntuali

Nel sistema a fissaggi puntuali gli elementi portanti che costituiscono il reticolo strutturale sono completamente arretrati rispetto al filo esterno della facciata vetrata, massimizzando la trasparenza del sistema poiché l'unico elemento opaco è ridotto al sistema di fissaggio.

I sistemi di fissaggio si possono suddividere in due categorie:

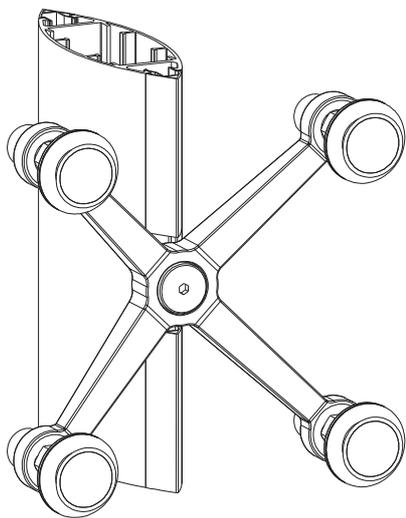
- Fissaggio in 4 punti: in cui la lastra di vetro viene forata per permettere ai *rotules* di bloccarla nei suoi quattro angoli;
- Fissaggio in 4 angoli o bordi: in cui il vincolo, per ammorsamento e attrito, è sviluppato da pressori presenti nei quattro bordi della lastra, permettendo di evitare la foratura della lastra.

I pannelli vetrati sono soggetti a notevoli tensioni puntuali nei punti di fissaggio quindi necessitano di essere costituiti in vetro temprato per evitare l'insorgenza di fessurazioni durante le operazioni di foratura e la creazione e propagazione di microfratture. Una volta posto in opera il sistema, l'intercapedine tra lastre adiacenti viene sigillata tramite l'applicazione di una guarnizione siliconica.

Il sistema di fissaggio permette anche il collegamento della facciata al sistema di supporto che risulta essere arretrato rispetto al sistema di facciata. Il supporto può essere costituito: da un sistema in acciaio o in alluminio, in cui profili chiusi costituiscono il montante, da un sistema a vetro strutturale, in cui il montante è costituito da una lastra di vetro temprato e stratificato, o da un sistema a tensostruttura, dove il supporto è sviluppato da una serie di cavi e aste che collegano direttamente la facciata alla struttura principale. Le diverse tipologie di sistema di supporto sono presentate tramite i possibili montanti del sistema S.J.S. della Lilli serramenti, mentre due possibili sistemi di fissaggio sono analizzati tramite le crociere Air system e Quadrifoglio della Faraone.

Il principale vantaggio del sistema è a livello estetico: in grado di fornire la massima trasparenza, anche se la versatilità e l'adattabilità alle situazioni complesse o inclinate non sono da trascurare.

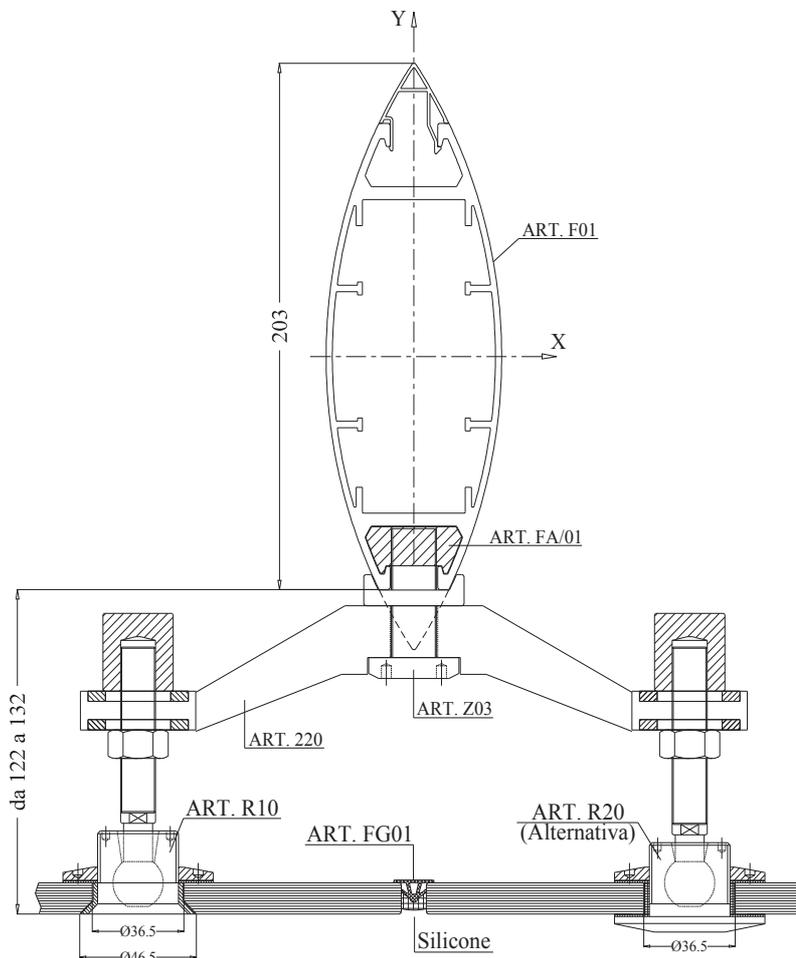
Il sistema necessita di un'attenta posa in opera dei vari componenti, risultando quindi lenta, a svantaggio del sistema.



[2.46] Vista assonometrica del sistema di fissaggio Air system

Per il fissaggio a quattro punti si analizza il sistema Air system prodotto dalla Faraone, con un montante in alluminio a profilo chiuso alternativo.

La lastra in vetro temprato, preventivamente forata, viene ancorata, tramite rotules in acciaio, alla crociera. La forma a quattro braccia della crociera viene definita come sistema "a ragno".

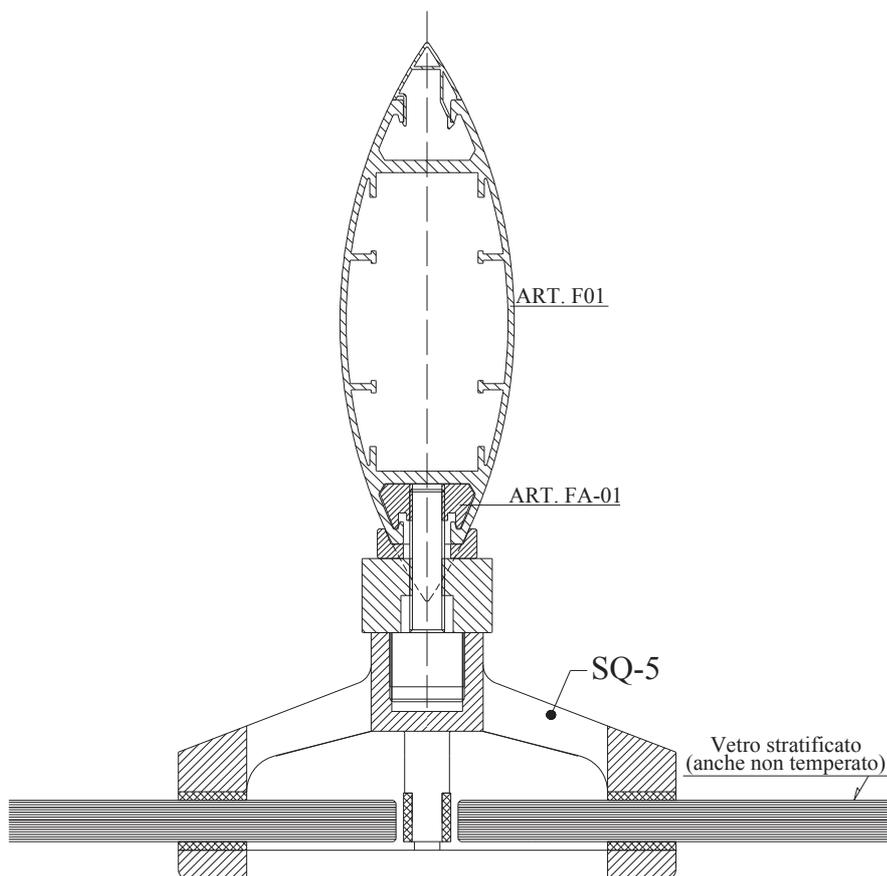


[2.47] Sezione trasversale sistema di fissaggio Air system

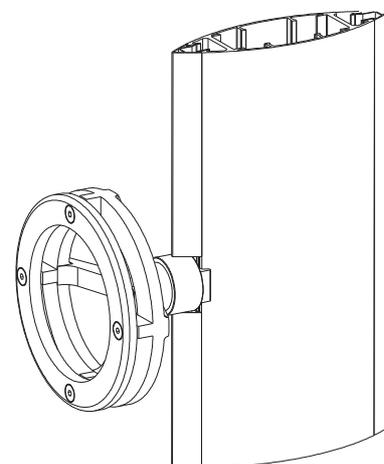
Per evitare la foratura della lastra, e le conseguenti possibili problematiche, uno dei possibili sistemi è il Quadrifoglio prodotto dalla Faraone.

La crociera circolare permette il fissaggio nei quattro angoli, ovvero la lastra di vetro viene appoggiata alla crociera e mantenuta in posizione per attrito poiché il sistema viene bloccato nell'intercapedine.

E' possibile utilizzare lastre semplicemente stratificate, e non temprate, poiché il sistema non necessita di forature per il passaggio delle rotules.



[2.48] Sezione trasversale sistema di fissaggio Quadrifoglio



[2.49] Vista assonometrica del sistema di fissaggio Quadrifoglio



[2.50]

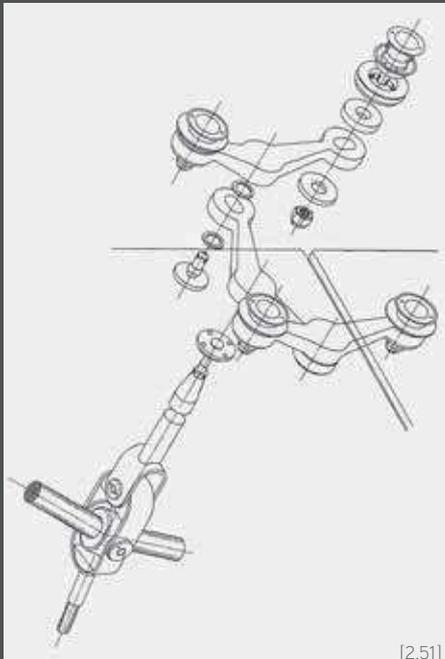
CHANNEL 4 HEADQUARTERS

ROGERS STIRK HARBOUR + PARTNERS
LONDRA (GB)
1994

Il Channel 4 Headquarters è la sede del canale televisivo situata a Londra. L'edificio, progettato da Richard Rogers, fu costruito tra il 1990 e il 1994 in stile high-tech.

Le due ali, disposte a L, con gli elementi strutturali posti in risalto nel prospetto, rappresentano i caratteri della corrente high-tech.

L'atrio di collegamento, nonché ingresso alla sede, è l'elemento più caratteristico dell'edificio. Esso è composto da una facciata continua sospesa e curva, prima nel suo genere a Londra. Il fissaggio dei vetri avviene tramite crociere a forma di H, sorrette da una tensostruttura con cavi allineati alle giunture delle lastre.



[2.51]



[2.52]



[2.53]

Un esploso assonometrico degli elementi componenti la crociera è rappresentato in Figura 2.51 mentre nelle Figure 2.50 e 2.53 è rappresentato il sistema posto in opera.

L'ingresso esterno è caratterizzato anch'esso dall'utilizzo del vetro. Dalla strada si percorre la piazza fino a raggiungere un ponte in vetro, che conduce all'ingresso, il quale sovrasta il foyer del complesso cinematografico sottostante.

L'edificio, e la sua estetica, sono stati sviluppati per rappresentare le caratteristiche dell'emittente: innovativa, socialmente responsabile e disposta a correre rischi.

L'attenzione al comfort interno soprattutto in termini di minimizzazione dell'abbagliamento, è accentuata nelle pareti che si affacciano nel giardino interno. Schermi fissi in alluminio espanso sono stati installati come elemento ombreggiante esterno mentre le tende possono offrire un'ulteriore controllo dei raggi solari incidenti.

FIGURE:

- 2.50 Vista interna della facciata sospesa con rappresentazione in dettaglio le crociere
- 2.51 Esploso assonometrico della crociera ad H
- 2.52 Disegno schematico dell'edificio con rappresentati i tre volumi
- 2.53 Vista interna della tensostruttura con rappresentazione in dettaglio del sistema di sostegno
- 2.54 Vista complessiva dell'edificio inclusa la piazza antistante
- 2.55 Vista dell'ingresso a facciata sospesa



[2.54]



[2.55]

Sistema a doppia pelle

Le facciate a doppia pelle sono costituite da 3 elementi: una superficie vetrata e un'intercapedine d'aria che si costituisce tramite l'applicazione di una seconda superficie vetrata esterna. Il *double-skin facade system* è una particolare tipologia di facciata adattabile al clima che sfrutta l'effetto serra e l'effetto camino, che si genera all'interno dell'intercapedine grazie al flusso dell'aria, per ridurre il fabbisogno di riscaldamento o raffreddamento.

Nei climi freddi, l'aria presente nella cavità viene riscaldata dal sole, e tramite l'effetto serra, riduce le dispersioni di calore e contribuisce al riscaldamento degli ambienti interni.

Nei climi caldi vi è la necessità di mitigare il guadagno solare e, al contempo, di ridurre il fabbisogno di raffreddamento. L'effetto camino che si genera naturalmente nell'intercapedine, grazie alla presenza di zone a temperature differenti che generano un moto convettivo, è in grado di ridurre l'impatto termico dei raggi solari incidenti.

Le facciate possono essere suddivise, in base al percorso che il flusso d'aria compie nell'intercapedine, in 4 differenti categorie presentate in Figura 2.56. La modalità a circolazione interna (A) prevede un flusso d'aria che circola tra la stanza e l'intercapedine, all'opposto la circolazione esterna (C) prevede che il flusso d'aria circoli solo tra le due pelli in modo isolato dagli spazi interni.

Le modalità a immissione (B) ed espulsione (D) consentono di creare un flusso d'aria di collegamento con l'ambiente esterno, permettendo la ventilazione naturale degli spazi interni.

Il funzionamento del sistema di facciata è influenzato dal coefficiente di scambio termico convettivo e dalle condizioni esterne, soprattutto dalla pressione del vento che, in alcune casistiche, è in grado di alterare il flusso termico interno alle due pelli.

Il transito dell'aria può essere generato esclusivamente dalle forze di convezione, in tal caso si parla di sistemi a ventilazione naturale, oppure possono essere previsti sistemi di ventilazione meccanica aggiuntivi, detti sistemi a ventilazione forzata, al fine di controllare i parametri interni e di limitare l'influenza delle condizioni esterne sul flusso all'interno dell'intercapedine.

Le modalità di connessione con l'ambiente esterno sono influenzate anche dalla geometria interna del sistema, che può essere suddivisa nelle 4 tipologie rappresentate in Figura 2.57.

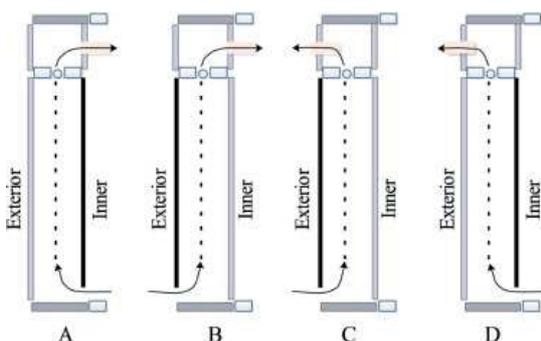
La facciata a singoli elementi (A) prevede l'applicazione sequenziale di unità di ventilazione, questo comporta una limitazione della circolazione dell'aria al singolo elemento della finestra, o eventualmente alla stanza. Le limitazioni spaziali del sistema implicano che lo spessore dell'intercapedine dev'essere contenuto, al fine di garantire un moto interno sufficiente, e permette una semplificazione del sistema sia in termini progettuali, sia in termini di realizzazione.

Le facciate a canali prevedono la creazione di zone di ventilazione indipendenti, le quali possono avere uno sviluppo verticale (B) oppure orizzontale (C). La particolarità del sistema a canale verticale è che l'aria in uscita viene convogliata in un canale unico, che si sviluppa per tutta l'altezza dell'edificio e, una volta raccolta, viene espulsa tramite un unico dispositivo di aerazione posto in copertura. Nelle facciate a canali orizzontali la separazione tra le zone avviene a livello di uno o più interpiani, permettendo l'installazione dei dispositivi di aerazione a livello del soffitto o del pavimento, con l'accortezza di mantenere indipendenti le diverse partizioni sovrapposte.

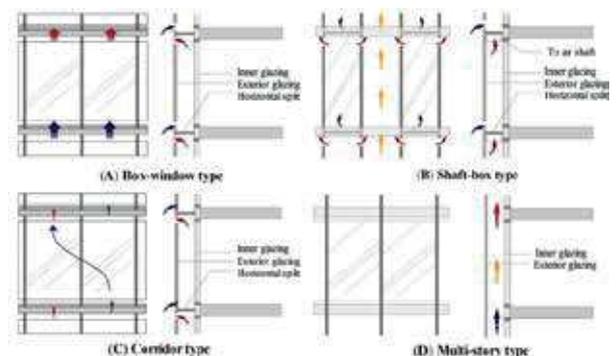
Il sistema di facciata a tutta superficie (D) prevede l'installazione di una seconda pelle continua in tutto il prospetto dell'edificio, la quale genera un'unica ampia intercapedine. Per l'intercapedine unica, a differenza dei sistemi precedenti, a causa della maggiore estensione è consigliato il sistema a ventilazione forzata. Il vantaggio della tecnologia è che l'involucro esterno, indipendente dalla pelle retrostante, potrà essere realizzato con un qualsiasi sistema di facciata continua e non necessita di aperture intermedie.

I sistemi a doppia pelle sono in grado di esprimere la medesima trasparenza dei precedenti sistemi analizzati, inoltre possono portare benefici tra cui la riduzione del fabbisogno di riscaldamento o raffreddamento, l'implementazione di un sistema di ventilazione in grado di fornire un ricircolo d'aria e un miglioramento delle proprietà di isolamento termico ed acustico. Secondo Vasileva⁴ l'utilizzo di un sistema di facciata a doppia pelle permette di ridurre del 20-30% la quantità di risorse energetiche necessarie per il condizionamento dell'aria rispetto ai sistemi di facciata tradizionali, permettendo di ammortizzare gli elevati costi di realizzazione.

4. Vasileva, I.L. et al. (2022). Climate-Adaptive Façades with an Air Chamber. *Buildings*, 12,1-41.



[2.56] Classificazione dei sistemi a doppia pelle in base alle modalità di flusso. Tratta da: Zhang et al. (2016)



[2.57] Classificazione dei sistemi a doppia pelle in base alla geometria. Tratta da: Zhang et al. (2016)



[2.58]



[2.59]



[2.60]



[2.62]

LAKHTA CENTER

RJMJ, GORPROJECT
SAN PIETROBURGO (RU)
2018

Il Lakhta Center è un edificio ad uso misto situato a San Pietroburgo, Russia. Esso si compone di una torre per uffici e di un edificio multifunzionale, circondati da piazze pubbliche.

La torre, alta 462m, è attualmente l'edificio più alto d'Europa e presenta la più estesa facciata piegata a freddo del mondo. Nel 2021 il Lakhta Center vinse il *CTCHU Construction Award* e i *Category Award* per l'Ingegneria strutturale, geotecnica e di facciata.

La torre presenta una pianta a stella con cinque punte, la quale si restringe e compie una rotazione di $0,82^\circ$ salendo di piano, arrivando a generare una rotazione complessiva di 89° che conferendo alla torre un aspetto a spirale.

La forma articolata è sorretta da una struttura a nucleo centrale e colonne perimetrali che presenta notevoli innovazioni. Il nucleo centrale circolare, in calcestruzzo armato, accoglie gli ascensori, le scale e gli spazi per i locali tecnici. Perimetralmente sono presenti delle colonne inclinate che si rastremano seguendo l'andamento a spirale della torre. Esse sono innovative dal punto di vista materico poiché costituite in *Steel Reinforced Concrete*: il nucleo in acciaio a forma di croce è inglobato in una gabbia di armatura e calcestruzzo. Il collegamento tra le colonne perimetrali e il nucleo centrale avviene tramite stabilizzatori posti ogni 14 piani. Delle travi reticolari in acciaio permettono il trasferimento dei carichi dovuti ai forti venti che insistono sulla torre. L'involucro esterno, costituito da una facciata a doppia pelle, insieme alle zone cuscinetto e ad avanzati sistemi hanno permesso il conferimento della certificazione LEED Platinum.



[2.61]

FIGURE:

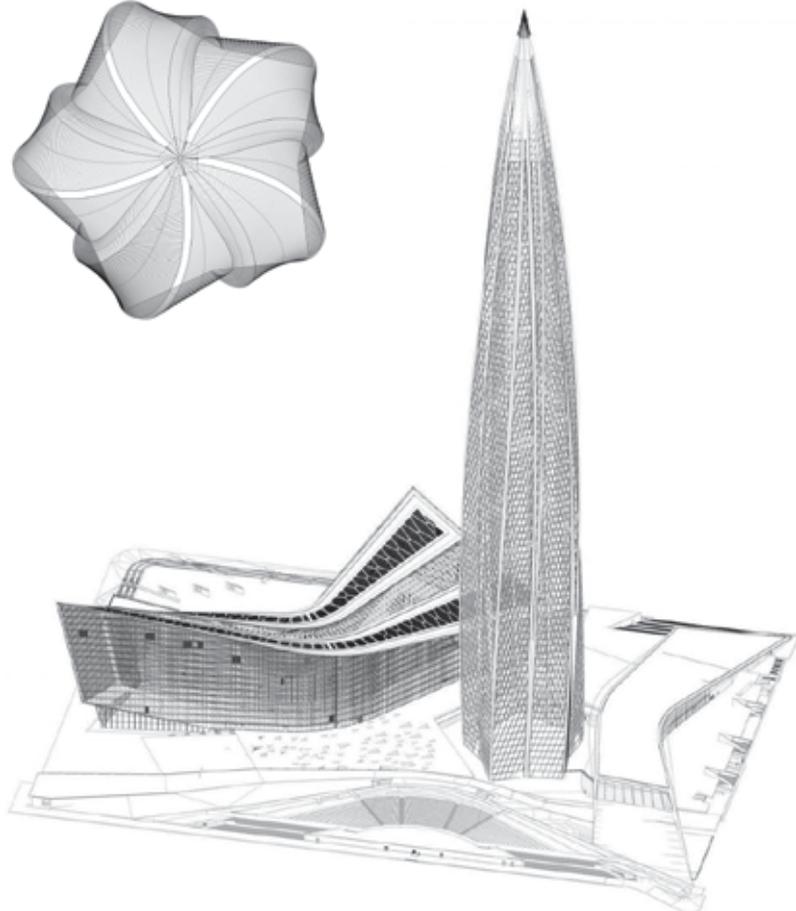
- 2.58 Vista della torre durante le fasi di costruzione
- 2.59 Vista della torre e dell'edificio multifunzionale durante un evento nevoso
- 2.60 Vista durante la fase di installazione del sistema di facciata interno
- 2.61 Vista generale della torre e del sito
- 2.62 Vista aerea della torre
- 2.63 Vista aerea della torre con dettaglio della guglia
- 2.64 Proiezione verticale della torre
- 2.65 Disegno assonometrico del Lakhta center comprendente la torre, l'edificio multifunzionale e la piazza
- 2.66 Vista aerea della torre con dettaglio del sistema di facciata
- 2.67 Prospetto del sistema di facciata: partizione della facciata interna
- 2.68 Prospetto del sistema di facciata: partizione della facciata esterna
- 2.69 Prospetto del sistema di facciata: dettaglio del sistema della guglia
- 2.70 Prospetto del sistema di facciata: partizione della facciata della buffer zone



[2.63]



[2.64]



[2.65]

La facciata è costruita con un sistema a doppia pelle al fine di massimizzare l'ingresso della luce diurna e al contempo di minimizzare le dispersioni di calore, caratteristiche fondamentali nel contesto climatico.

Per la sua costruzione sono stati impiegati 16 500 pannelli di vetro curvati a freddo che l'hanno resa la facciata, piegata a freddo, più estesa al mondo.

La facciata interna è costituita da un sistema cellulare con profili in alluminio. Le cellule rettangolari sono ancorate singolarmente alla struttura al fine di renderli elementi indipendenti tra loro. Una rappresentazione della partizione verticale del sistema di facciata interno è rappresentato in Figura 2.67.

La pelle esterna è costituita anch'essa da un sistema cellulare in alluminio. Le cellule presentano una particolare forma a parallelogramma, con montanti inclinati che seguono lo sviluppo altimetrico della spirale e contribuiscono a conferire l'aspetto dinamico alla torre. Una rappresentazione della partizione verticale del sistema di facciata esterno è rappresentato in Figura 2.68.

Le cellule sono costituite da pannelli vetrati stratificati composti da: una lastra di vetro temprato (*fully tempered glass*), un'intercapedine contenente gas argon e due lastre di vetro semi-temprato (*heat-strengthened glass*).

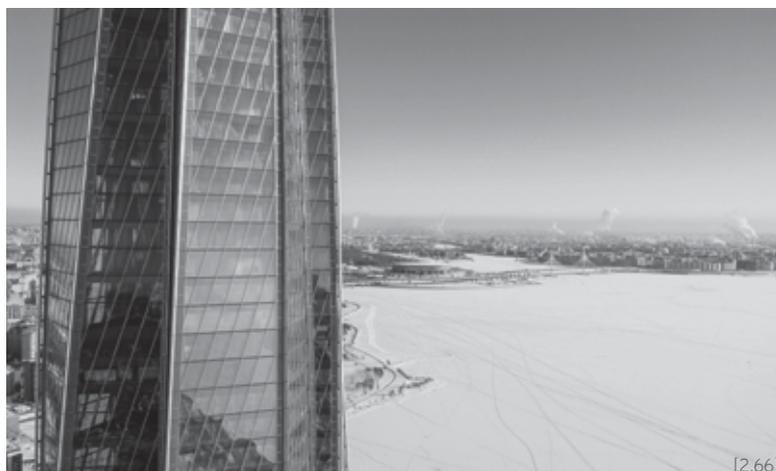
Nei cinque vertici sono presenti delle zone cuscinetto: degli atri in vetro con altezza di due piani che contribuiscono alla regolazione termica dell'edificio.

Nel periodo invernale funzionano come accumulatori di calore mentre nel periodo estivo implementano la ventilazione naturalmente grazie all'apertura di quattro finestre integrate nella facciata esterna.

I pannelli vetrati esterni presentano caratteristiche di trasparenza, per favorire l'ingresso della luce, mentre i pannelli interni sono altamente riflettenti al fine di impedire ai raggi solari di entrare nella struttura.

La parte terminale della guglia si discosta dai sistemi utilizzati inferiormente. La guglia, permeabile al vento, presenta una facciata in acciaio con applicati dei profili in acciaio inossidabile. Nella progettazione dell'elemento è stata posta l'attenzione sia sulle possibili problematiche della formazione di ghiaccio sia sull'impatto nell'ecosistema che avrebbe potuto suscitare una costruzione così elevata.

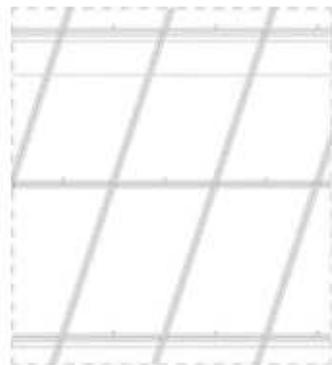
Al fine di non interferire con la stagione delle migrazioni è stata prevista l'installazione di speciali luci blu che permettono ai volati di vedere la torre e prevengono possibili impatti.



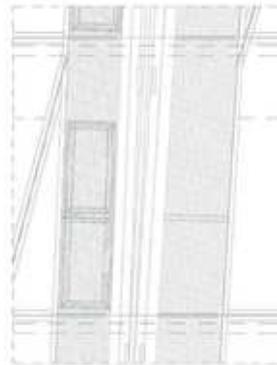
[2.66]



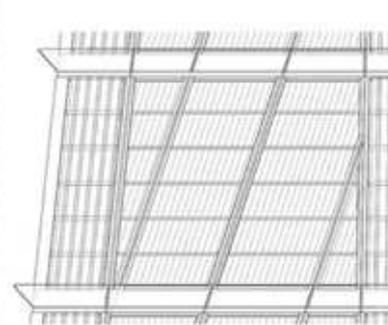
[2.67]



[2.68]



[2.69]



[2.70]

2.2 SISTEMI DI SCHERMATURA ADATTIVI

2.2.1 Cenni storici

Nell'architettura del movimento moderno l'involucro tradizionale è sostituito da un rivestimento trasparente composto da ampie superfici vetrate, creando un linguaggio progettuale che si ritrova nell'architettura contemporanea. Con l'avvento dei sistemi di facciata fu necessario sviluppare nuovi sistemi capaci di schermare i raggi solari e di integrarsi con i tamponamenti leggeri.

Nell'architettura di Le Corbusier si trovano le origini dei sistemi di schermatura, tant'è che fu egli a coniare il termine *brise-soleil* che "deriva dal latino volgare *brisare* (rompere) e da *soleil* (sole) e indica uno schermo o un filtro al quale è affidato il compito di controllare gli effetti del soleggiamento diretto su una superficie aperta o vetrata"⁵, necessità inderogabile quando iniziò a progettare al di fuori della Francia in contesti climatici tropicali.

Le prime sperimentazioni del *brise-soleil* si ritrovano nei progetti di Le Corbusier per Villa Baizeau del 1928. La villa, situata a Cartagine in Tunisia, necessitava di soluzioni che permettessero di ripararsi dal vento e dal sole e che garantissero una ventilazione naturale.

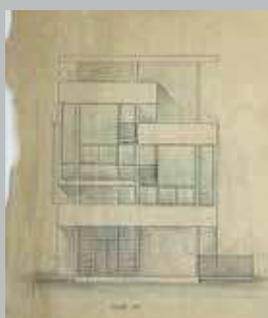
Le Corbusier non vide mai il sito e il progetto venne redatto a distanza grazie alle informazioni fornitegli da Lucien Baizeau, committente dell'edificio. Il rapporto architetto-cliente fu travagliato al punto che esistono due ville: l'edificio realizzato e il progetto immaginario di Le Corbusier, su cui si pone l'attenzione poiché segna l'esordio dei suoi ragionamenti sulle schermature solari.

Il primo progetto prevedeva un edificio con impronta rettangolare, posto sull'orlo della scogliera e con il fronte est diretto verso il mare. Ampie superfici vetrate erano pensate per illuminare naturalmente la zona giorno che, grazie agli spazi a doppia altezza interconnessi tra loro, poteva essere ventilata naturalmente. Nella terrazza posta superiormente si ritrovano i noti *pilotis* che sorreggono un tetto piano aggettante al quale era affidato il compito di creare ombra nell'area sottostante: il primo esempio di *brise-soleil*.

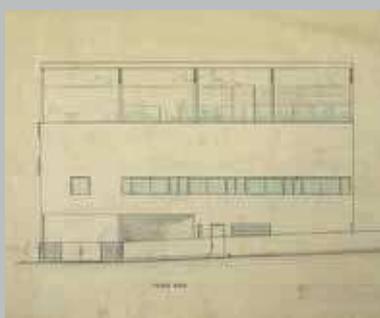
Nei progetti finali del 1929 e nell'edificio realizzato nel 1930 si osservano modifiche significative rispetto al progetto iniziale: la facciata venne mutata in un sistema di terrazze in linea con i desideri di Baizeau. Anche

5. Tatano, V. et al. (2012).
Schermature solari.
Evoluzione, progettazione
e soluzioni tecniche.
Santarcangelo di Romagna:
Maggioli Editore.

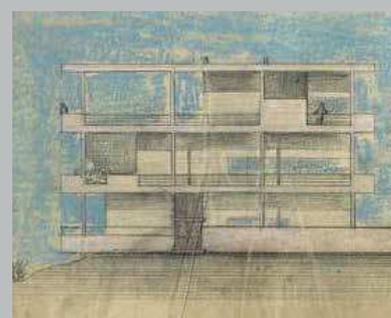
FIGURE:
Villa Baizeau, Le Corbusier,
Cartagine (TN), 1931.
2.71 Prospetto Est
Primo progetto
2.72 Prospetto Nord
Primo progetto
2.73 Prospetto Nord
Secondo progetto



[2.71]



[2.72]



[2.73]

se gli sviluppi finali dell'edificio non furono rosei, Le Corbusier arrivò a chiamarla "villa a Cartagine", il progetto iniziale risulta interessante perché fu il primo confronto del maestro con i climi tropicali, dal quale discese un vocabolario di forme che sviluppò nei progetti degli anni successivi.

Il primo edificio dove la schermatura dal sole è affidata a piccoli elementi è il Ministero dell'educazione e della sanità a Rio de Janeiro.

Il progetto, del 1936, fu redatto da Lucio Costa e Oscar Niemeyer, ai quali Le Corbusier fece da consulente e suggerì l'applicazione degli elementi schermanti.

La facciata principale, disposta a Nord-Est, presenta delle vetrate che si estendono da un metro fino al soffitto e sono soggette all'irraggiamento solare per tutto l'arco dell'anno. Per poter controllare l'incidenza dei raggi solari furono inseriti, all'interno di una cornice fissa, un sistema di lamelle mobili con inclinazione che poteva essere regolata manualmente in tre livelli. Nell'edificio si osserva una ricerca di coniugare il linguaggio internazionale moderno con le specificità climatiche locali, che lo rese il primo tentativo di architettura moderna brasiliana.

Nel secondo dopoguerra si diffuse una corrente architettonica che criticava gli ideali del movimento moderno: il brutalismo. Essi affidavano all'architettura un ruolo etico e sociale, prima che estetico, espresso tramite imponenti volumi solidi e l'impiego del calcestruzzo armato a vista, in grado di sfruttare le funzionalità per i bisogni della società.

Il progetto dell'Unité d'habitation di Marsiglia, originato per soddisfare il bisogno abitativo post-bellico della città, è una città-giardino verticale in grado di contenere tutti i servizi e gli spazi sociali.

Le Corbusier applicò il "Modulor" per definire 23 tipologie differenti di appartamento, in grado di adattarsi ai diversi nuclei familiari, utilizzate nei 333 appartamenti che costituivano la città-giardino e racchiuse in un unico parallelepipedo sopraelevato da pilotis.

Nei prospetti principali, disposti a Est e Ovest, le facciate a nastro sono schermate da brise-soleil che riprendono la struttura a griglia fissa.

I solai aggettanti e le velette intermedie costituiscono gli elementi orizzontali mentre gli elementi verticali sono costituiti dai muri laterali delle logge.



[2.74]



[2.75]



[2.76]

2.74 Ministero dell'Educazione e della sanità, Costa, Rio de Janeiro (BR), 1945

2.75 Ministero dell'Educazione. Dettaglio brise-soleil

2.76 Unité d'habitation, Le Corbusier, Marsiglia (FR), 1952

L'inserimento dei colori fu una scelta decisa in fase di realizzazione, poiché l'edificio era stato concepito per esaltare la bellezza naturale del calcestruzzo armato grezzo lasciato a vista.

Il brutalismo di Le Corbusier assunse notevole monumentalità nei progetti indiani degli anni Cinquanta. Il frangisole riprende la configurazione di ampio oggetto del tetto e viene utilizzato come elemento monumentale per esprimere il carattere dell'edificio. Le finestre non sono più a nastro ma incorniciate in una griglia fissa di elementi in calcestruzzo.

In Villa Shodhan, realizzata tra il 1951 e il 1956 a Ahmedabad, l'edificio è schermato da un sistema indipendente a griglia che si ritrova anche nell'Alta Corte, realizzata a Chandigarh. L'edificio è caratterizzato da un maestoso tetto piano con funzione di parasole, elemento che si ripresenta con una forma plastica anche nel Palazzo dell'Assemblea. L'architettura di Le Corbusier, ponendo l'attenzione sull'interazione dell'edificio con il contesto climatico, ebbe grande impatto negli sviluppi successivi e nella nascita e sviluppo dei moderni dispositivi di schermatura solare.

La consacrazione del frangisole, come elemento tecnologico che contraddistingue la facciata, si affermò a partire dagli anni Settanta tramite la corrente dell'high-tech.

Questo stile dell'architettura contemporanea è contraddistinto da una ritrovata fiducia nella tecnologia, gli elementi strutturali e i sistemi impiantistici non solo sono lasciati a vista ma vengono addirittura esposti in facciata, diventando l'evoluzione del Modernismo. Gli elementi schermanti trovano una nuova configurazione a piccoli elementi e un grande sviluppo: "le schermature con frangisole alla veneziana non sono più usate solo all'interno degli uffici, comandate manualmente a corda e manovella, ma vengono applicate all'esterno delle facciate vetrate e comandate elettricamente"⁶.

Il Centro Georges Pompidou, progettato nel 1971 dallo studio degli architetti Renzo Piano e Richard Rogers, è il manifesto dell'architettura high-tech in cui si sfruttano tutte le potenzialità della tecnica delle costruzioni e dei materiali. L'edificio segnò un nuovo modello di museo che Renzo Piano sviluppò nei suoi progetti successivi, insieme alla tematica della luce naturale.

6. Premier, A. (2012). *Superfici dinamiche. Le schermature mobili nel progetto di architettura*. Milano: Franco Angeli.

7. Daly, J. (2021). Renzo Piano: 'Buildings are like children - you want them to have a happy life'. *Financial Times*. Disponibile in: <https://www.ft.com/content/7f70d4f4-d136-45fb-8dac-0376d2715517>



[2.77]



[2.78]



[2.79]

Dall'analisi di quattro opere di Renzo Piano, si pone l'attenzione sull'importanza della luce, intesa come materiale da costruzione dall'architetto⁷, e su come diverse tipologie di frangisole possono modularla per creare il massimo del comfort luminoso negli spazi interni. Nel museo per la fondazione Melin, progettato dal 1981 al 1984 dallo studio Piano & Fitzgerald, l'utilizzo della luce naturale in tutte le sue sfaccettature è la chiave del progetto.

L'edificio, sede di una galleria d'arte, richiama le forme e i materiali degli edifici circostanti: i volumi con linee basse e profondi portici presentano un rivestimento ligneo in cipresso grigio, tipici dell'architettura residenziale americana.

La committenza voleva che le opere esposte nella galleria fossero visibili alla luce naturale, senza che i raggi diretti le intaccassero, creando un ambiente in contatto con l'esterno e con le variazioni climatiche durante il giorno e le stagioni.

Per accogliere la richiesta lo studio, insieme a Ove Arup & partners, sviluppò un innovativo sistema di copertura composto da lastre di vetro e un sistema di frangisole orizzontali sorretti da travi reticolari.

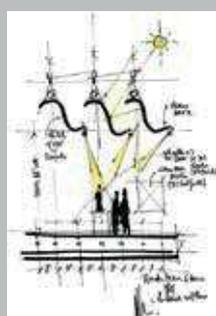
L'elemento schermante denominato "foglia", è costituito da una lama in ferro-cemento a sezione curva e, rivestendo interamente tutto il tetto, permette di filtrare i raggi solari diretti, che andrebbero ad intaccare le opere esposte, consente la creazione di un'illuminazione diffusa che, insieme ai pavimenti lignei scuri, crea un ambiente confortevole ed emozionale per l'utenza. Le soluzioni sviluppate sono tecnologicamente innovative per l'epoca e rappresentano un sistema di regolazione e gestione della luce naturale considerato *ante litteram*.

Ulteriore progetto in cui la luce zenitale riveste un ruolo centrale è la sede di Genova del Renzo Piano Building Workshop. L'edificio, posto lungo un versante a picco sul mare, si compone di un volume unico, rivestito superiormente da un tetto spiovente e racchiuso da un involucro vetrato. L'inserimento nel contesto avviene tramite la forma, che richiama le serre tipiche liguri, e un'ulteriore attenzione all'ambiente deriva dalla conservazione dei terrazzamenti pre-esistenti.

Lo studio è schermato da un sistema di lamelle orizzontali, a sezione arcuata in lega di alluminio, poste in copertura che sono azionate



[2.80]



[2.81]



[2.82]

FIGURE:

- 2.77 Villa Shodhan, Le Corbusier, Ahmedabad (IN), 1956
- 2.78 Alta Corte, Le Corbusier, Chandigarh (IN), 1955
- 2.79 Palazzo dell'Assemblea, Le Corbusier Chandigarh (IN), 1962
- 2.80 Melin Collection, Piano & Fitzgerald, Huston (US), 1986
- 2.81 Disegno del sistema schermante "foglia"
- 2.82 Renzo Piano building workshop, RPBW, Genova (IT), 1991

automaticamente tramite sensori che rilevano le variazioni delle condizioni climatiche esterne. Le ampie vetrate laterali, se aperte, consentono il ricircolo dell'aria, e sono schermate da un sistema ausiliario di tende a rullo automatico, sempre gestito tramite sensori.

L'utilizzo della luce zenitale è la chiave delle seguenti costruzioni, che differiscono per struttura, una in tradizionale a muri massivi, l'altra leggera in legno e vetro, ma sono legate dai particolari sistema di schermatura in copertura.

Con il New York Times Building, progettato tra il 2000 e il 2003 dal RPBW, si pone l'attenzione sull'involucro edilizio. La trasparenza e la permeabilità visiva tra spazi interni e ambiente esterno, ricercati tramite i sistemi di facciata continua, necessitano di essere integrati con sistemi di schermatura solare in grado di regolare i livelli di illuminazione. Nell'edificio, "progettato per essere il più trasparente e permeabile possibile, esprimendo l'apertura della cultura della carta"⁸, il sistema di schermatura acquisisce anche una funzione termica in quanto gli elementi costituiscono il sistema esterno della facciata a doppia pelle. Il sistema di facciata interno è costituito da una facciata continua in vetro, altamente trasparente, e alluminio che massimizza la vista verso l'esterno e l'ingresso della luce. All'esterno, spazati da un'intercapedine di 60 cm, è installato un rivestimento fisso composto da elementi a sezione circolare di ceramica bianca, ancorati alla costruzione tramite un sistema di supporto in acciaio.

La schermatura fissa è in grado di bloccare fino alla metà dei raggi solari e, grazie al suo materiale, riflette i colori del cielo diventando l'elemento che caratterizza l'aspetto dell'edificio. Essa si estende per ulteriori ventisette metri superiormente all'edificio con un terrasse che si incrementa gradualmente, generando un particolare effetto ottico in cui il rivestimento sembra come svanire nel cielo.

La struttura portante in acciaio, nei prospetti Sud e Nord, viene messo in evidenza poiché posizionato esternamente alla parete vetrata, soluzione che ripresenta i canoni dell'architettura high-tech.

Il sistema a doppia pelle con rivestimento esterno costituito da elementi schermanti fu utilizzato anche nella torre Agbar progettata da Jean Nouvel, architetto che delle schermature solari fa il suo tratto distintivo.

8. <http://www.rpbw.com/project/the-new-york-times-building>

9. Drusian, F. (2020). *Facciate auto-adattanti: dispositivi tecnologici per un'edilizia sostenibile*. Tesi di laurea: Università degli Studi di Padova

FIGURE:

2.83 The New York Times Building, RPBW, New York (US), 2007

2.84 The New York Times Building, RPBW, New York (US), 2007

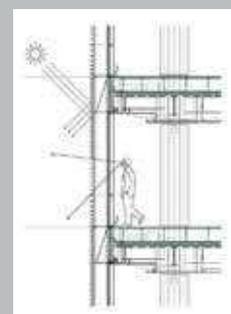
2.85 The New York Times Building. Sezione della facciata.



[2.83]



[2.84]



[2.85]

L'opera più innovativa realizzata da Jean Nouvel, nel 1987, è l'Istituto del Mondo Arabo, considerato uno dei primi casi di facciata adattiva della storia.

Nella facciata esposta a Sud, all'interno del modulo vetrato, sono inseriti 240 diaframmi composti da dischi di metallo, in grado di filtrare la luce solare, con una forma che rievoca i tradizionali "mashrabiya".

"Nell'edificio è possibile vedere come le forme razionali tipiche della tradizione occidentale vengano integrate e valorizzate da forme arabe più astratte"⁹. Delle cellule foto-sensibili, in grado di rilevare le variazioni delle condizioni ambientali esterne, azionano automaticamente l'apertura dei diaframmi, in analogia con il movimento tipico delle macchine fotografiche, e garantiscono il comfort interno tramite un'illuminazione naturale e il corretto ombreggiamento.

Sempre nell'architettura di Jean Nouvel è possibile osservare l'utilizzo di un sistema di schermatura integrato alla vegetazione nel particolare progetto per la sede della compagnia Interunfall in Austria.

L'atrio bioclimatico centrale, con sviluppo longitudinale, può funzionare da filtro tra gli uffici interni e l'esterno, fornendo illuminazione, ventilazione e riscaldamento naturali, grazie ai frangisole a lamelle mobili posti in copertura.

Nei prospetti laterali sono installati un sistema a lamelle orientabili e degli aggetti con fioriere che, nel periodo estivo, blocca i raggi solari e sfruttano l'evotraspirazione delle piante mentre nel periodo invernale, la minor inclinazione dei raggi consente ad essi di entrare all'interno dell'edificio. Interessante è l'utilizzo della vegetazione sia come elemento schermante sia come vantaggio a livello microclimatico.

Il sistema a doppia pelle costituito da un sistema di frangisole esterni è stato applicato da Jean Nouvel nella torre Agbar, a Barcellona.

L'edificio per uffici, sede della società dell'acqua Agbar, con il suo particolare rivestimento richiama un volume d'acqua. La struttura è composta da una cilindri ovali in calcestruzzo armato, uno centrale e uno perimetrale, connessi tramite travi in acciaio e solai collaboranti in calcestruzzo.

Esternamente alla parete strutturale in calcestruzzo, l'involucro si compone di uno strato isolante in lana di roccia e da lamiere grecate



[2.86]



[2.87]



[2.88]



[2.89]

2.86 Arab World Institute, Jean Nouvel, Parigi (FR), 1987.

2.87 Arab World Institute. Dettaglio facciata

2.88 Agbar tower, Jean Nouvel, Barcellona (ES), 2004.

2.89 Agbar tower. Dettaglio facciata

in alluminio colorate con venticinque differenti tonalità che variano dal rosso all'azzurro.

Il sistema esterno è composto da frangisole a lamelle in vetro serigrafato con montanti di supporto in acciaio zincato. Le lamelle in vetro presentano quattro diversi livelli di trasparenza ottenuti tramite diverse percentuali di trattamento serigrafico che varia tra il 15% e il 65% in corrispondenza delle porzioni di facciata che presentano le viste più significative sulla città. La scelta dell'ampia gamma cromatica delle lamiere, richiamo all'architettura di Gaudì, grazie all'interazione con le lamelle vetrate dona dinamismo all'involucro.

Nell'architettura contemporanea in cui le tematiche di sostenibilità e risparmio energetico sono poste in primo piano, l'involucro ha assunto un ruolo fondamentale. Un ramo di sperimentazione innovativo vede l'integrazione dei pannelli fotovoltaici nei sistemi di schermatura mobili, di cui si analizzano due esempi applicativi.

Nel nuovo padiglione Renzo Piano, progettato tra il 2007 e il 2010 dal RPBW come espansione del Kimbell Art Museum, la copertura integra celle fotovoltaiche nelle lamelle di schermatura in copertura. Il sistema genera energia sufficiente per compensare fino al venti per cento del carbonio prodotto dalle operazioni annuali dell'edificio, limitandone l'impatto ambientale.

L'edificio storico del museo, inaugurato nel 1972, è uno degli edifici più celebri del Novecento e fu l'ultimo lavoro di Louis I. Kahn. Il nuovo padiglione riprende le proporzioni volumetriche e i materiali utilizzati al fine di creare un legame stretto e rispettoso con l'edificio pre-esistente. In nuovo padiglione si compone di due strutture interconnesse e collegate tramite un passaggio vetrato. La facciata est, rivolta verso l'edificio di Kahn, presenta due sezioni rivestite in cemento chiaro che racchiudono una facciata continua che crea il nuovo ingresso al museo. Nei prospetti Nord e Sud la facciata è nuovamente vetrata ed è scandita da una sequenza di colonne quadrate che sorreggono la copertura.

Nella seconda struttura si trovano gli spazi dedicati alle attività didattiche, l'auditorium e una sala studiata per opere fotosensibili, il tutto integrato nel paesaggio tramite un tetto verde.

Lo studio della luce zenitale, che ci rimanda alle opere precedenti, è un

FIGURE:

- 2.90 Kimbell Art Museum, RPBW, Fort Worth (US), 2013.
- 2.91 Dettaglio della copertura
- 2.92 Disegno del sistema di copertura.
- 2.93 Swisstech Convention Center, Richter Dahl Rocha, Losanna (CH), 2014
- 2.94 Vista interna degli elementi schermanti
- 2.95 Kiefer Technic Showroom, Ernst Giselbrecht, Bad Gleichenberg (AT), 2007
- 2.96 Dettaglio dell'involucro



[2.90]



[2.91]



[2.92]

elemento chiave dell'architettura per museo di Renzo Piano.

In copertura il pacchetto è composto, dall'intradosso, da: teloni tensionati applicati alle travi in legno, lastre curve in vetro serigrafato e pannelli in alluminio a shed rivestiti di celle fotovoltaiche.

L'integrazione di celle solari colorate nei brise-soleil è presente anche nella facciata ovest del Swisstech convention center.

I 1400 modulatori solari di cinque differenti tonalità creano interessanti giochi di luce all'interno dell'edificio e al contempo lo schermano dai raggi solari, generando energia elettrica.

L'ambito di ricerca più interessante dell'involucro, che ha contraddistinto gli sviluppi del nuovo millennio, è la creazione di una pelle in grado di adattarsi alle diverse condizioni climatiche.

Una prima configurazione di schermatura solare adattiva è stata utilizzata nello spazio espositivo della Kiefer Technic.

Il prospetto Sud-Ovest è contraddistinto da un sistema dinamico costituito da 112 pannelli in metallo bianco, che si adattano alle condizioni meteorologiche esterne per creare le condizioni ottimali di illuminazione.

Nell'involucro a doppia pelle, il sistema interno è una facciata continua a montanti e traversi in alluminio mentre il sistema esterno, posto dopo un'intercapedine, è costituito da pannelli in alluminio, perforati e verniciati, sorretti da una struttura in acciaio, il cui movimento è regolato automaticamente grazie a dei motori integrati e a un sistema a controllo intelligente.

L'istituto per il mondo arabo e il Kiefer Technic showroom rappresentano le origini dei sistemi di schermatura adattivi, su cui si pone l'attenzione nelle parti successive del lavoro di tesi, analizzando le innovazioni utilizzate nell'architettura contemporanea e in seguito i futuri sviluppi legati all'integrazione degli *smart material*, in grado di creare schermatura che si adattano agli stimoli offerti dall'ambiente circostante e ne fanno il motore di attuazione, senza il bisogno di ulteriori fonti energetiche.



[2.93]



[2.94]



[2.95]



[2.96]

2.2.2 Stato dell'arte

L'architettura del movimento moderno ha rimosso i tradizionali sistemi di ombreggiatura a favore di ampie vetrate continue che rivestivano interamente l'edificio. Conseguentemente alla crisi energetica del 1970, si ha una riscoperta delle strategie di progettazione passiva, che rendono l'involucro architettonico l'elemento centrale della progettazione contemporanea.

Attualmente le ricerche si concentrano nei sistemi di schermatura adattivi, in grado di migliorare l'ambiente edilizio e di ridurre i consumi energetici, tramite la modifica ripetuta e reversibile di elementi, in funzione delle condizioni climatiche esterne e delle esigenze di comfort interno.

Le *adaptive facades* sono definite da Tabadkani come "composizione di elementi reattivi che regolano la facciata in modo autonomo (automaticamente) o orientata dall'utente (manualmente) in funzione dei cambiamenti ambientali e/o delle preferenze dell'utente per migliorare le prestazioni complessive dell'edificio"¹⁰.

I dispositivi di schermatura adattivi superano le limitazioni dei dispositivi fissi tramite la variazione dell'inclinazione in funzione delle condizioni climatiche, evitando di bloccare la vista verso l'esterno e mantenendo la permeabilità visiva con l'ambiente, caratteristica che viene ricercata quando si utilizzano ampie facciate vetrate.

L'analisi dei sistemi di schermatura adattivi seguente si concentra in due categorie:

- i vetri a trasmissione variabile: in grado di variare le componenti di trasmissione luminosa delle lastre vetrate;
- i dispositivi di schermatura dinamici: che affidano le proprietà schermanti a un sistema applicato esternamente alla superficie vetrata.

10. Tabadkani, A. et al. (2021). Design approaches and typologies of adaptive facades: A review. *Automation in Construction*, 121.



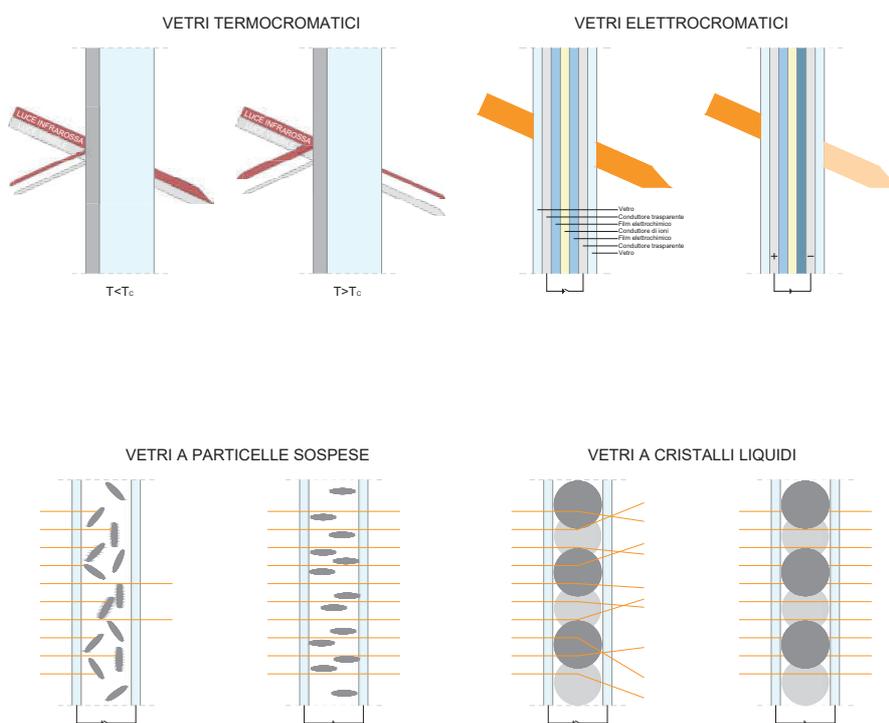
[2.97] Classificazione dei sistemi di schermatura adattivi

Vetri a trasmissione variabile

I vetri a trasmissione variabile sono una tipologia particolare di schermatura adattiva, in cui la modulazione della luce filtrante avviene tramite i medesimi pannelli vetrati che compongono la facciata continua. La particolarità dei vetri a trasmissione variabile è la capacità di modificare le proprietà ottiche di trasmissione della luce in funzione di uno stimolo esterno come l'applicazione di una corrente elettrica, la luce o il calore. Essi vengono suddivisi, in funzione del meccanismo che genera il cambio di stato, in:

- Vetri termocromatici: *Thermochromic glazing*
- Vetri elettrocromatici: *Electrochromic glazing*
- Vetri a particelle sospese: *Suspended particle glazing*
- Vetri a cristalli liquidi: *Liquid crystal glazing*.

Le diverse tipologie di vetri possono essere classificate anche in base alla tipologia dello stimolo esterno: sono definite passive, o a controllo intrinseco, se la variazione si genera automaticamente in funzione degli stimoli ambientali, i vetri termocromatici ne sono un esempio; oppure sono definite attive, o a controllo estrinseco, se la variazione è generata da stimoli artificiali, le ulteriori tre tipologie ricadono in questa categoria.



I vetri termocromatici variano il colore e le proprietà ottiche in funzione della temperatura della superficie esterna: quando la temperatura aumenta, fino al raggiungimento della temperatura critica, si verifica una transizione da semi-conduttore a metallo, in grado di riflettere la radiazione infrarossa. La trasformazione avviene anche a livello fisico poiché i vetri mutano il loro aspetto da trasparente a opaco.

La funzione principale è di limitare il guadagno solare, controllando la trasmissione della luce. Essa risulta molto efficace nel periodo estivo tuttavia nel periodo invernale, quando il guadagno solare è favorevole, essi non possono essere disattivati e i possibili apporti vengono ugualmente limitati.

L'attivazione della variazione tramite la sola temperatura, cioè senza la necessità di risorse esterne, è la caratteristica di maggior pregio di tutti i sistemi a controllo intrinseco, poiché permette ad essi di non influire sul bilancio energetico dell'edificio, tuttavia presentano delle limitazioni legate alla non adattabilità in funzione delle richieste dell'utente o in funzione delle diverse stagioni.

Il fenomeno di transizione avviene in modo pressoché istantaneo al raggiungimento della temperatura critica, senza un passaggio graduale tra le due configurazioni, e può generare situazioni di discomfort visivo dovute allo sbalzo improvviso di illuminazione.

I vetri elettrocromatici variano il colore e le proprietà ottiche quando vi è applicata una tensione in corrente continua, in grado di generare una riduzione dell'ossido.

Il conseguente cambio di colore permette di controllare la quantità di luce che filtra attraverso il vetro, sia essa diretta o diffusa inoltre, essendo a controllo estrinseco, può essere applicata in funzione delle condizioni ambientali o delle specifiche necessità di illuminazione interna.

Per cambiare configurazione il dispositivo necessita di un tempo di reazione particolarmente elevato, mediamente di dieci secondi tuttavia il vetro possiede un "effetto memoria" in grado di mantenere la configurazione inalterata per un periodo di 12-48 ore, che rende questa tecnologia a basso consumo energetico.

L'applicazione su larga scala è sfavorita dai costi: il sistema richiede l'installazione di un invertitore per essere collegato alla rete elettrica e i pannelli sono composti da un numero elevato di strati che rendono questa tecnologia molto costosa.

I vetri a particelle sospese e a cristalli liquidi sono composti generalmente da un film, contenente particelle, racchiuso tra due lastre di vetro. Attraverso l'applicazione di un campo elettrico, le particelle prima disposte casualmente, si allineano e orientano tra loro, variando il colore della lastra in trasparente.

La configurazione in stato OFF, vede le lastre a cristalli liquidi di colore bianco e traslucido mentre le lastre a particelle sospese presentano colorazioni scure nelle tonalità del blu e del nero.

I tempi di reazione, per il passaggio alla configurazione ON, sono relativamente brevi nell'ordine dei secondi, minore rispetto ai vetri elettrocromatici, e la variazione è controllata da un flusso di corrente alternata.

Essi presentano ugualmente costi elevati, non più di realizzazione, ma di esercizio poiché necessitano il mantenimento costante del campo elettrico per rimanere in configurazione trasparente, senza nessuna proprietà di memoria.

Per le applicazioni nel campo dell'edilizia, la configurazione trasparente è quella più frequente, e coincide con la richiesta di uno stimolo esterno, caratteristica per cui i principali sviluppi sono concentrati nello sviluppo di prototipi con colorazioni trasparenti nella configurazione naturale.

Le caratteristiche che accomunano le diverse tipologie di vetri a trasmissione variabile sono la capacità di modulare il flusso luminoso che li attraversa e di limitare il guadagno solare; inoltre la loro applicazione, priva di dispositivi esterni, non varia la configurazione estetica dell'involucro che risulterebbe ancora caratterizzato dalla facciata continua.

Un ambito di ricerca nei vetri a trasmissione variabile, si concentra sulla possibilità di creare pannelli in grado di generare configurazioni intermedie, e conseguentemente di attuare una transizione graduale tra i due stati del vetro.

I vetri a trasmissione variabile seppur molto promettenti per le capacità di ombreggiamento, per il mantenimento della vista con l'ambiente esterno e per l'ottimizzazione della luce diurna, rispetto ai tradizionali sistemi di ombreggiamento non riducono i fenomeni di abbagliamento e il mantenimento della privacy interna all'edificio.

Dispositivi di schermatura dinamici

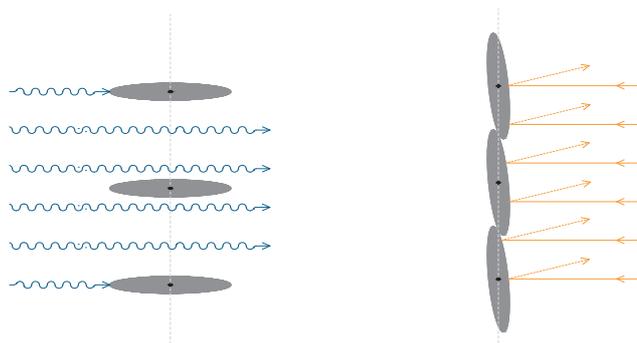
I dispositivi di schermatura nascono come elementi in grado di bloccare l'ingresso dei raggi solari e, se dinamici, possono contribuire a ottenere un ambiente efficiente dal punto di vista energetico, migliorare il comfort e la qualità ambientale interna. L'adattabilità alle condizioni climatiche interne o esterne dei dispositivi di schermatura si esprime tramite il movimento degli elementi frangisole.

Un primo fattore di suddivisione si basa sulle modalità con cui il sistema recepisce lo stimolo esterno e lo tramuta in un diverso posizionamento degli elementi schermanti. Il controllo può essere: estrinseco se lo stimolo esterno viene percepito da sensori e materializzato tramite un sistema meccanico mentre è intrinseco se il sistema è strutturato in modo da poter recepire gli stimoli esterni e di regolarsi autonomamente. Il vantaggio del controllo intrinseco è la massimizzazione del risparmio energetico, poiché l'attivazione del sistema non necessita di energia esterna ma sfrutta proprietà dei materiali, come ad esempio la dilatazione termica. Gli innovativi "materiali intelligenti": *Stimulus-responsive Materials* e la loro applicazione nei sistemi di schermatura adattivi sono l'ambito in cui si concentrano le ricerche attuali, e che verrà approfondito nel terzo capitolo.

Nel seguito si pone l'attenzione sui dispositivi di schermatura dinamici a controllo estrinseco in cui il controllo avviene tramite tre elementi: sensori, processori e attuatori e l'azione schermante è affidata agli elementi frangisole.

Una variazione nelle condizioni ambientali viene recepita tramite i sensori che tramuta lo stimolo esterno in un'informazione. Il processore analizza il dato ricevuto e lo converte in una modifica della configurazione dei frangisole. Il movimento avviene tramite gli attuatori che generano il cambiamento fisico delle proprietà tramite stimoli meccanici, chimici o elettrici.

Al fine di comprendere le motivazioni che hanno reso gli involucri adattivi al centro dell'architettura contemporanea, si analizzano le diverse prestazioni che, un generico sistema schermante dinamico con frangisole a lamelle, può offrire in funzione delle diverse configurazioni assunte dal sistema.



[2.99] Comportamento estivo dei dispositivi di schermatura dinamici

La funzione principale riguarda il comfort visivo-luminoso: tramite la riflessione dei raggi solari incidenti le lamelle offrono un controllo della radiazione e la creazione di ombre interne e, al contempo, permettono sia il mantenimento della vista verso l'ambiente esterno sia la creazione di privacy, impedendo la vista verso l'interno, in altre parole sono in grado di modulare tutti i flussi che attraversano l'involucro vetrato.

La scala temporale di adattabilità dell'ombreggiamento è giornaliero in quanto, in funzione dell'inclinazione dei raggi solari, i modulatori ruotano e si dispongono ad essi sempre perpendicolari, ottimizzando la generazione di ombra. Il controllo estrinseco permette anche variazioni della configurazione ottimizzate sulle specifiche richieste dell'utente legate alle necessità dell'attività svolta nel momento.

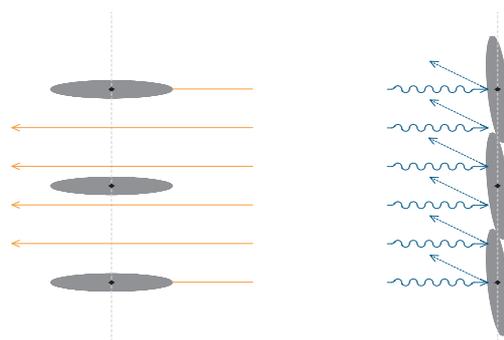
La seconda funzione influisce sul comfort termico e specifica la scala di adattabilità temporale stagionale.

Nel periodo estivo le schermature minimizzano il guadagno solare durante la giornata, limitando il surriscaldamento degli ambienti interni generando una riduzione del fabbisogno di raffrescamento e un conseguente risparmio dal punto di vista energetico. Durante il periodo notturno, in cui le temperature esterne diminuiscono, si attua una rotazione dei frangisole per favorire le dispersioni termiche e il ricircolo dell'aria tra ambiente esterno e spazi interni.

Nel periodo invernale la configurazione completamente aperta, che prima permetteva la dispersione termica, viene utilizzata durante l'arco della giornata per massimizzare il guadagno solare grazie alla captazione di tutti i raggi incidenti. Durante il periodo notturno, il sistema viene chiuso per minimizzare le dispersioni termiche, con una conseguente riduzione del fabbisogno di riscaldamento e un impatto positivo sulla domanda energetica dell'edificio.

Nelle giornate nuvolose tipiche dei periodi intermedi, l'illuminazione è principalmente diffusa, e non può essere schermata da dispositivi fissi mentre i dispositivi dinamici sono in grado sia di adattarsi alla situazioni transitorie sia di attuare un passaggio graduale tra le diverse configurazioni.

Una rappresentazione del comportamento estivo e invernale è presentata rispettivamente nelle Figure 2.99 e 2.100.



[2.100] Comportamento invernale dei dispositivi di schermatura dinamica

L'ultima funzione è legata alle possibilità di massimizzare l'utilizzo della luce diurna, in grado di migliorare il benessere degli occupanti, di ridurre l'utilizzo dell'illuminazione artificiale, ulteriore fonte di dispendio energetico, e di limitare i fenomeni di abbagliamento, favorendo una distribuzione omogenea della luce negli spazi interni.

Le notevoli potenzialità dei sistemi di schermatura adattivi, anche in termini di raggiungimento degli obiettivi europei di decarbonizzazione del 2050, hanno motivato la creazione della COST Action TU1403 "Adaptive Façade Network", nell'ambito dell'EU COST (European Cooperation in Science and Technology) con l'obiettivo di armonizzare le conoscenze sulle facciate adattive.

In questo ambito di ricerca è stata proposta la classificazione riportata in seguito, e utilizzata negli sviluppi successivi, sviluppata da Loonen¹¹.

Il primo parametro è lo scopo che viene soddisfatto dai componenti della facciata e può essere:

- il comfort termico;
- la produzione energetica;
- la qualità dell'aria interna;
- le prestazioni visive;
- le prestazioni acustiche;
- il controllo personale.

La funzione reattiva, secondo parametro, indica come la fonte di energia può essere controllata, ovvero: prevenzione, ammissione o rifiuto della trasmissione di energia attraverso l'involucro.

Il controllo, terzo parametro precedentemente analizzato, può essere suddiviso in: estrinseco o intrinseco, in funzione degli elementi necessari per l'attivazione del dinamismo del sistema.

I componenti (materiali o sistemi), rappresentano il quarto parametro della classificazione delle facciate adattive. Delle possibili tecnologie si è scelto di porre l'attenzione sui dispositivi di schermatura dinamici.

La scala spaziale fa riferimento alla dimensione del sistema di facciata, e può variare dal livello molecolare fino a livello dell'interno edificio.

L'involucro architettonico è l'elemento principale che definisce l'immagine dell'edificio e, con il parametro di visibilità, si vuole caratterizzare l'impatto che il sistema adattivo ha sull'estetica globale.

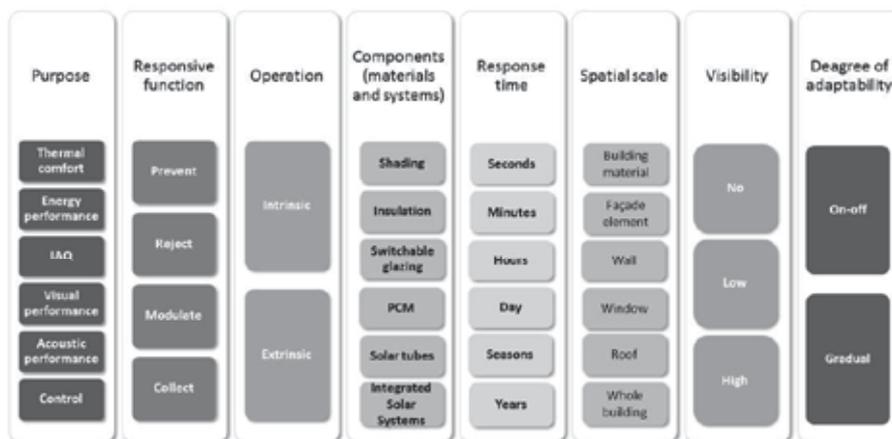
11. Loonen, R.C.G.M. et al. (2015). *Design for façade adaptability: Towards a unified and systematic characterization*. In 10th Conference on Advanced Building Skins, 1284-1294.

“In molti casi l’adattabilità diventa una caratteristica importante dei progetti architettonici e viene utilizzata come una significativa risorsa composita.”¹¹

Il grado di adattabilità, ultimo parametro della classificazione, indica qualitativamente le modalità con cui l’involucro architettonico è in grado di adattarsi alle mutevoli condizioni esterne, ovvero se il sistema presenta due configurazioni alternative: on-off, oppure se è in grado di variare gradualmente tra le due configurazioni.

Le “Adaptive façade possono essere considerate l’ultima frontiera della ricerca architettonica e tecnologica contemporanea, sempre più legata alla volontà di progettare nuovi modelli dinamici di involucro, che, con l’ausilio di sensori, componenti di sistema per la produzione di energia e materiali intelligenti, contribuisce verso la riduzione del fabbisogno energetico dell’edificio”.

Nel terzo capitolo si analizzano le soluzioni innovative per schermature solari adattive, utilizzate in ambito architettonico in quattro edifici simbolo per l’innovazione tecnologica e formale nei sistemi di schermatura adattivi.



[2.101] Panoramica dei parametri di caratterizzazione dell’adattabilità dell’involucro. Tratto da Aeleni (2016)

CAPITOLO 3

**SOLUZIONI INNOVATIVE PER
SCHERMATURE SOLARI ADATTIVE**

3.1 CASI DI STUDIO

- 3.1.1 Thyssenkrupp quarter
- 3.1.2 Al Bahar towers
- 3.1.3 Head office of AGC glass Europe
- 3.1.4 Campus Kolding
- 3.1.5 Analisi comparativa

3.2 INNOVAZIONI E FUTURI SVILUPPI

- 3.2.1 La Biomimesi
- 3.2.2 Warm Motion System
- 3.2.3 Pho'liage
- 3.2.4 IARC Headquarters
- 3.2.5 Analisi comparativa

3.1 CASI DI STUDIO



[3.1]

3.1.1

THYSSENKRUPP QUARTER JSWD ARCHITEKTEN + CHAIX & MOREL ET ASSOCIÉS ESSEN (DE) 2010

Il ThyssenKrupp Quarter è il nuovo quartiere amministrativo della ditta ThyssenKrupp, in cui i gli edifici si sviluppano in un ambiente dominato dal verde e sono collegati tramite vialette e piazze. Lo specchio d'acqua centrale è il fulcro del quartiere e conduce lo sguardo al più alto degli edifici: il Q1, oggetto dell'analisi.

L'aspetto dell'edificio principale, progettato tra il 2006 e il 2008 dallo studio JSWD Architekten insieme allo studio Chaix & Morel et Associés, è fortemente caratterizzato dall'involucro architettonico.

Le ampie vetrata panoramiche centrali, che conferiscono trasparenza e permeabilità, sono racchiuse da due elementi a L, che conferiscono dinamicità grazie al particolare sistema di schermatura solare adattivo composto da lamelle metalliche.

"Il guscio metallico scintillante di Q1 unisce efficacemente il profilo architettonico all'avanguardia con una struttura dell'edificio creativa, ragionevole ed energeticamente produttiva"¹.

Nelle Figure 3.1 e 3.3 si può osservare il prospetto Sud, analizzare il suo rapporto con la piazza antistante e con gli edifici circostanti. Negli ambienti interni si ritrova l'alternarsi tra elementi pieni ed elementi vuoti. Gli uffici sono disposti circolarmente e racchiudono l'atrio centrale, a tutt'altezza, con copertura in vetro.

I collegamenti interni si svolgono grazie a soppalchi e passerelle sospese, che smaterializzano il cuore dell'edificio e lo rendono in contatto con l'ambiente circostante. Le finestre panoramiche, poste centralmente nei prospetti Nord e Sud, amplificano l'effetto di contatto con l'ambiente esterno, grazie all'ampia veduta offerta dal sistema a facciate continue. Esse sono costituite da un sistema a fissaggi puntuali, con elementi di sostegno nei quattro angoli, e sono vincolate da un cavo metallico verticale, allineato ai giunti delle lastre.

I due elementi a L sono costituiti da un sistema a doppia pelle in cui la struttura interna è composta da una facciata continua ad elementi cellulari in alluminio e la struttura esterna è composta da un sistema di schermatura adattivo, in grado di variare l'inclinazione degli elementi schermanti in funzione delle condizioni atmosferiche esterne.

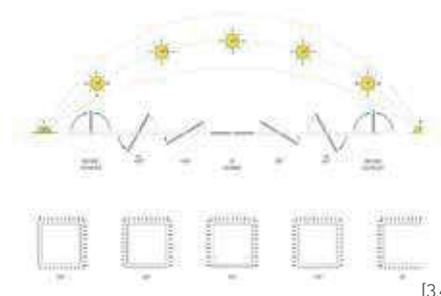
Il sistema di schermatura degli uffici riesce a modulare l'ingresso della luce naturale, a limitare il guadagno solare e a eliminare i fenomeni di abbagliamento, creando un ambiente di lavoro confortevole.



[3.2]



[3.3]



[3.4]



[3.5]

L'elemento frangisole è composto da un'asse centrale a cui sono ancorate due pannelli in acciaio, con tre possibili forme: triangolari, rettangolari e trapezoidali. Ogni pannello è composta a sua volta da una serie di lamelle orizzontali, che possono sovrapporsi nella configurazione completamente aperta, rendendo l'asse centrale l'unico elemento opaco, oppure ruotare gradualmente attorno all'asse centrale per disporsi perpendicolarmente ai raggi solari.

"Gli elementi girevoli e ad incastro rappresentano un sistema ottimizzato che combina i vantaggi delle lamelle orizzontali (deflessione leggera) con quelli delle lamelle girevoli verticali (vista libera)"².

Il sistema si regola in completa autonomia in funzione delle condizioni ambientali: tramite sensori, che misurano la temperatura esterna, e 1.280 motori elettrici, che azionano il movimento dei singoli pannelli.

Per costruire i 7.800 m² di sistema schermante sono stati impiegati 3.000 assi verticali e 400.000 lamelle orizzontali. Verticalmente i frangisole seguono il ritmo della facciata retrostante, ogni pannello ha un'altezza pari all'interpiano, e orizzontalmente i pannelli misurano da 0 a 67,5 cm, se triangolari o trapezoidali, e 33,75 cm se rettangolari, seguendo la cadenza degli assi verticali posti a 67,5 cm.

Nelle Figure 3.6 e 3.7 è possibile analizzare l'impatto estetico degli elementi schermanti in una vista generale del prospetto e successivamente nel dettaglio. I particolari costruttivi del sistema di facciata sono presentati nelle sezioni in Figura 3.8 e 3.9.

L'edificio è affascinante dal punto estetico e, tramite la dualità tra vuoto e pieno, crea un impatto particolare dell'osservatore, tuttavia la vera bellezza è data dal sistema di schermatura in grado di coniugare le necessità degli ambienti interni, con un sistema innovativo e altamente ricercato.

L'edificio Q1, simbolo del ThyssenKrupp quarter, è un ottimo esempio di architettura contemporanea sostenibile, certificata Gold dalla DGNB, in cui le necessità di comfort visivo e termico, la minimizzazione del consumo energetico, trovano ottimizzazione tramite un innovativo sistema di schermatura adattivo.

FIGURE:

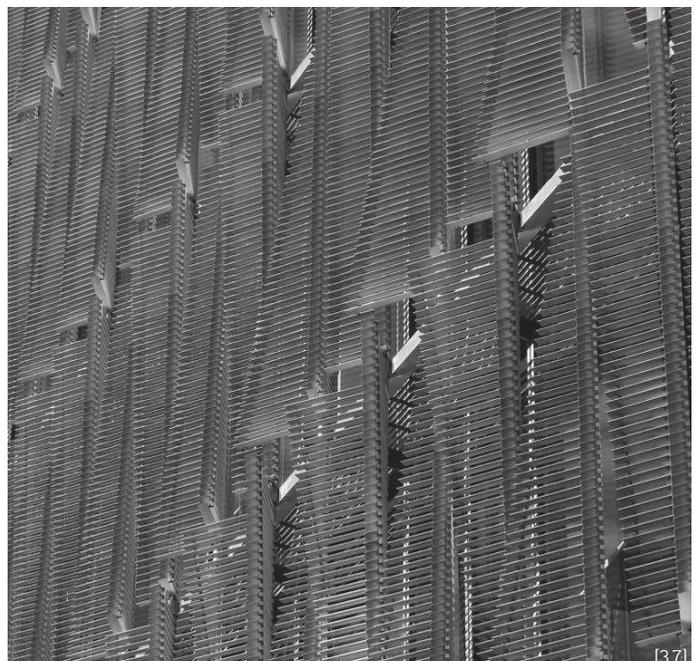
- 3.1 Vista del Prospetto Sud
- 3.2 Vista interna delle facciate panoramiche dall'atrio centrale
- 3.3 Vista generale dell'edificio e della piazza antistante
- 3.4 Disegno rappresentante le diverse angolazioni dei pannelli di schermatura in funzione del posizionamento del sole durante l'arco della giornata
- 3.5 Planimetria generale del ThyssenKrupp Quarter
- 3.6 Vista del Prospetto Sud con il sistema di schermatura solare adattivo
- 3.7 Dettaglio delle lamelle del sistema di schermatura solare
- 3.8 Sezione verticale dell'involucro architettonico
- 3.9 Sezione orizzontale dell'involucro architettonico

1. Radwan, A. H. *Smart Facades. From adaptation with climate, changing esthetical values, till digital drawings on buildings envelope.*

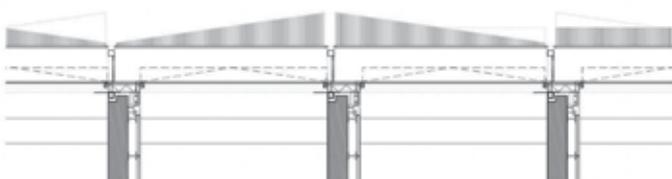
2. <https://www.jswd-architekten.de/projekte/thyssenkrupp-quartier/>



[3.6]



[3.7]



[3.8]



[3.9]



[3.10]

3.1.2

AL BAHAR TOWERS

AEDAS ARCHITECTURE, LTD.

ABU DHABI (AE)

2012

Il progetto delle torri Al Bahar, sviluppato dall'architetto arabo Adulmajid Karanouh, per Aedas Architecture, si compone di due torri identiche, di 26 piani, sede degli uffici dell'Abu Dhabi Investment Council (ADIC). Gli edifici sorgono negli Emirati Arabi Uniti, lungo la costa della città di Abu Dhabi. La zona è soggetta a un clima arido e intensamente soleggiato per tutto l'arco dell'anno. Nel periodo estivo le temperature possono innalzarsi fino a 49 °C, con un grado di umidità del 100%³.

Le condizioni climatiche implicano la necessità inderogabile di schermare gli intensi raggi luminosi tramite dispositivi di schermatura, elementi caratterizzanti l'architettura vernacolare islamica. I *mashrabiya*, reinterpretati in chiave contemporanea nel progetto, sono i tradizionali sistema di protezione, composto da pennelli traforati in legno.

L'aspetto dell'edificio, determinato principalmente dal sistema di schermatura adattivo, è l'unione tra elementi dell'architettura regionale, bio-ispirazione e tecnologie basate sulle prestazioni⁴.

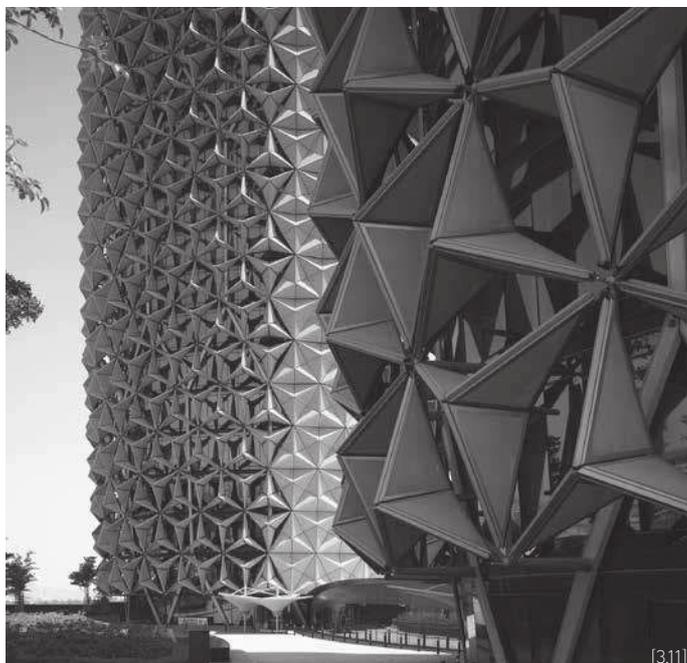
La facciata dinamica, che riveste le zone Est, Sud e Ovest, conferisce agli ambienti interni una corretta illuminazione, principalmente di origine naturale e riduce il guadagno solare causato dall'esposizione diretta ai raggi solari, generando un risparmio energetico pari al 50% per i soli uffici e del 20% per l'interno edificio³.

L'involucro è composto da un sistema a doppia pelle, in cui internamente presenta una facciata continua, costituita da un sistema cellulare in alluminio con cellule alte 4,2m, pari all'interpiano, che incentivano la vista verso l'ambiente circostante, grazie all'assenza di montanti orizzontali. Grazie alla presenza del rivestimento esterno di schermatura, che si attiva autonomamente quando i raggi incidono nella facciata, i vetri possono avere un aspetto chiaro e alta trasmissione della luce visibile, pari al 40% e una riflettanza del 18%.

Il sistema di schermatura esterno, composto da 1049 *mashrabiya*, è stato sviluppato in collaborazione con lo studio londinese Arup.

Ogni elemento, controllato tramite *Building Management System*, è composto da un reticolo poligonale, a cui sono fissati sei pannelli triangolari composti in fibra di vetro rivestita di PTFE (politetrafluoroetilene).

Le diverse percentuali di schermatura sono ottenute con una chiusura graduale delle unità triangolari tramite un movimento che trova ispirazione nella tipica chiusura dei fiori. Nel dettaglio costruttivo dell'unità schermante presente in Figura 3.19, i pannelli sono indicati con il numero 15.



[3.11]



[3.13]



[3.14]

Il dinamismo dei pannelli è azionato da un attuatore lineare elettrico, con martinetto a vite, posizionato al centro dell'unità schermante. Tramite l'estensione o contrazione del martinetto, i pannelli ruotano o si piegano, riuscendo ad ottenere un'apertura massima dell'85%.

I pannelli sono sorretti da telai in alluminio, numero 14 in Figura 3.19, e collegati all'edificio tramite una struttura portante in acciaio.

Il sistema è stato sviluppato per resistere alle particolari condizioni climatiche del sito. Oltre all'elevata temperatura e umidità, il sistema è esposto a: sabbia e polveri provenienti dal mare, che possono creare possibili fenomeni di corrosione; venti con velocità elevate, urti e abrasioni, specialmente quando si verificano tempeste di sabbia.

Di conseguenza "la struttura portante principale del sistema è progettata per durare cinquant'anni. Altri componenti come attuatori e cuscinetti sono progettati per un minimo di quindici anni prima di richiedere la sostituzione"³.

Il posizionamento dei pannelli, al fine di minimizzare l'incidenza dei raggi solari, può variare tra una configurazione completamente aperta di schermatura totale, quando l'angolo, con cui i raggi arrivano nella facciata, è inferiore a 79°; tra una configurazione completamente chiusa quando l'angolo è superiore a 83° e una configurazione parzialmente piegata, con i pannelli disposti perpendicolarmente ai raggi solari, quando l'angolo è compreso tra 79° e 83°.

Con questi parametri è stato sviluppato un programma preimpostato che raccoglie le posizioni di tutti i pannelli in base all'arco giornaliero e annuale tuttavia, tramite tre sensori in grado di rilevare la velocità del vento, l'intensità della luce e il livello di precipitazione, è possibile modificare il posizionamento previsto per le singole unità e adattarlo alle avverse condizioni atmosferiche correnti, come temporali o tempeste di sabbia.

Ulteriore elemento, che caratterizza l'impegno volto nei confronti del comfort luminoso e del risparmio energetico, è la gestione automatica dell'illuminazione artificiale. Quando i sensori interni rilevano un valore di illuminazione inferiore ai 250 Lux, l'illuminazione artificiale si attiva automaticamente per mantenere la soglia di comfort richiesta.

Le Al Bahar towers, con il particolare sistema di schermatura solare adattivo, sono un simbolo dell'architettura contemporanea dove le necessità in termini di benessere e sostenibilità, trovano una configurazione tecnologica all'avanguardia e una configurazione estetica sia innovativa sia capace di richiamare i simboli dell'architettura vernacolare.

FIGURE:

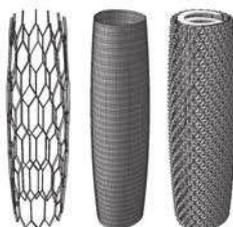
- 3.10 Vista generale delle torri e del contesto
- 3.11 Vista generale dell'involucro architettonico
- 3.12 Vista generale dell'involucro con elementi in configurazione chiusa e aperta
- 3.13 Vista del sistema di schermatura solare dinamico
- 3.14 Vista interna del sistema di schermatura solare dinamico
- 3.15 Vista in dettaglio del reticolo poligonale
- 3.16 Vista in dettaglio dell'elemento schermante
- 3.17 Disegno dei diversi strati che compongono l'involucro architettonico
- 3.18 Disegno dell'elemento schermante nelle tre diverse configurazioni
- 3.19 Dettaglio costruttivo dell'elemento schermante



[3.16]

3. Karanouh, A. et al. (2015). Innovations in dynamic architecture. The Al-Bahr Towers Design and delivery of complex facades. *Journal of Facade Design and Engineering*, 3, 185-221.

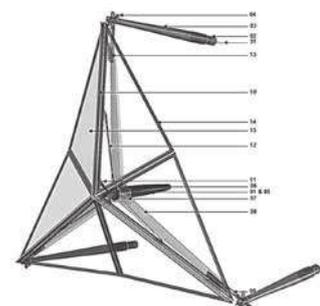
4. <https://www.ahr.co.uk/Al-Bahr-Towers>



[3.17]



[3.18]



[3.19]



[3.20]

3.1.3

HEAD OFFICE OF AGC GLASS EUROPE

SAMYN AND PARTNERS

OTTIGNIES-LOUVAIN-LA-NEUVE (BE)

2014

L'Head Office è la nuova sede direzionale dell' AGC Glass Europe, tra i più importanti produttori di vetro per l'edilizia, che ha fornito le lastre vetrate che compongono l'involucro del 70 St. Mary Axe e il Lakhta Center, casi di studio dei sistemi di facciata continua.

L'edificio è stato progettato attorno a due concetti cardine dell'architettura contemporanea: la sostenibilità e il benessere.

L'attenzione sulla sostenibilità dell'edificio è sviluppata tramite l'utilizzo efficiente dei materiali e di energia da fonti rinnovabili.

L'attenzione al benessere dei lavoratori è stata ricercata tramite la distribuzione interna che consente all'84% delle postazioni di lavoro di essere posizionate nelle vicinanze delle aperture esterne e al 95% di essere di godere di una visuale esterna senza ostacoli.⁵ Il risparmio energetico e il benessere sono ulteriormente implementati dal sistema di schermatura adattiva, in lamelle di vetro, che riveste interamente i piani sopraelevati dell'edificio. Il vetro caratterizza fortemente l'estetica esterna, creando un edificio simbolo per i possibili utilizzi del vetro e rappresentante gli ambiti di lavoro della ditta che ospita.

A livello architettonico l'edificio è composto da una pianta rettangolare che si eleva per due piani, creando un parallelepipedo leggero sorretto da pilastri, che richiama l'architettura di Le Corbusier.

La compattezza esterna, per il massimo controllo energetico, è in contrapposizione con le grandi aperture e i patii interni, per il benessere al lavoro e il comfort visivo.⁶

Nell'area est il patio costituisce un giardino interno e un sistema di terrazze; mentre nell'area ovest creano dei giardini interni a doppia altezza che consentono l'illuminazione naturale degli edifici affacciati e l'introduzione della vegetazione.

A livello strutturale l'edificio è composto da un sistema a telaio con colonne circolari, in una griglia di 8,1 m, e lastre in calcestruzzo armato. La stabilità è assicurata da un nucleo rigido, dove sono raccolti i servizi, e da un sistema di controventi in acciaio a croce di Sant'Andrea.

L'involucro esterno, che riveste il primo e secondo piano, è costituito da un sistema a doppia pelle in cui internamente è presente un sistema a facciata continua ed esternamente un sistema di schermatura solare adattivo a lamelle mobili.

Il sistema a facciata continua interno è composto pannelli a doppi vetri, in una struttura di alluminio. I montanti verticali presentano un



[3.21]



[3.22]



[3.23]



[3.24]

interrasse di 1,35m, valore che si ritrova anche nella pelle esterna.

Il sistema di schermatura adattivo è composto da lamelle in vetro in cui sono serigrafate delle strisce di colore bianco. Nelle facciate esposte a Nord e Sud le lamelle sono installate orizzontalmente mentre nelle facciate esposte a Est e Ovest sono installate verticalmente; l'inclinazione delle lamelle, di entrambi i sistemi, è regolata in funzione dei livelli di illuminazione che vengono registrati tramite sensori posti in copertura. Durante la giornata le lamelle si dispongono con un'inclinazione tale da essere perpendicolare ai raggi solari. Le strisce presenti nelle lamelle bloccano l'ingresso alla luce diretta, evitando il surriscaldamento, mentre consentono un'illuminazione naturale degli spazi interni grazie al passaggio della luce diffusa.

Durante la notte il sistema si pone in configurazione completamente chiusa o aperta a seconda della temperatura a mezzogiorno: se essa è inferiore ai 10 °C, il sistema verrà chiuso al fine di minimizzare le dispersioni termiche, all'opposto, quando la temperatura è superiore a 20 °C, il sistema verrà aperto per favorire il raffreddamento dell'edificio. Oltre al sensore di illuminazione in copertura sono presenti un anemometro, un termometro e un sensore di precipitazione che variano il posizionamento delle lamelle in configurazione chiusa o aperta nei casi in cui sia presente un'azione elevata del vento, pioggia o possibile formazione di ghiaccio dovuto a una temperatura esterna inferiore ai 3 °C.

Le lamelle, alte circa 30 cm, sono composte da due lastre di vetro temprato e un film in PVB interno. Le serigrafie sono poste in entrambi i lati della lamella e sormontate per un angolo di 15°. Esse presentano una riflettanza del 41% e una trasmissione della luce dell'11%. Il sistema è sorretto da una struttura di montanti in acciaio e collegato al sistema portante dell'edificio, da una struttura in acciaio. Sfruttando una serie di profili in acciaio, la seconda facciata è stata collegata direttamente al sistema di copertura risultando appesa, e non vincolata alle lastre dei pavimenti.

Nell'edificio è inoltre presente un sistema di schermatura interno, composto da veneziane in legno di bambù, che possono essere regolate in funzione dei livelli di illuminazione che richiedono le specifiche attività svolte.

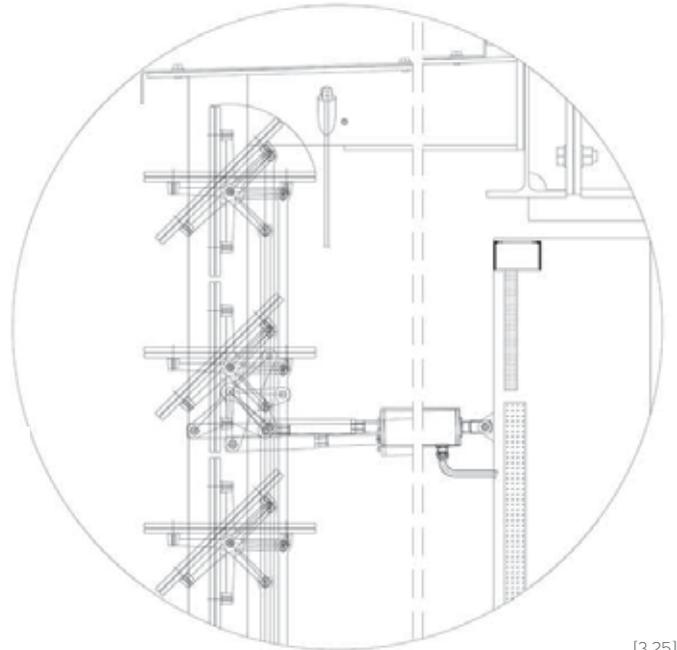
L'Head Office of AGC Glass Europe, grazie anche al suo particolare sistema di schermatura adattivo, è stato certificato BEEM Excellent.

FIGURE:

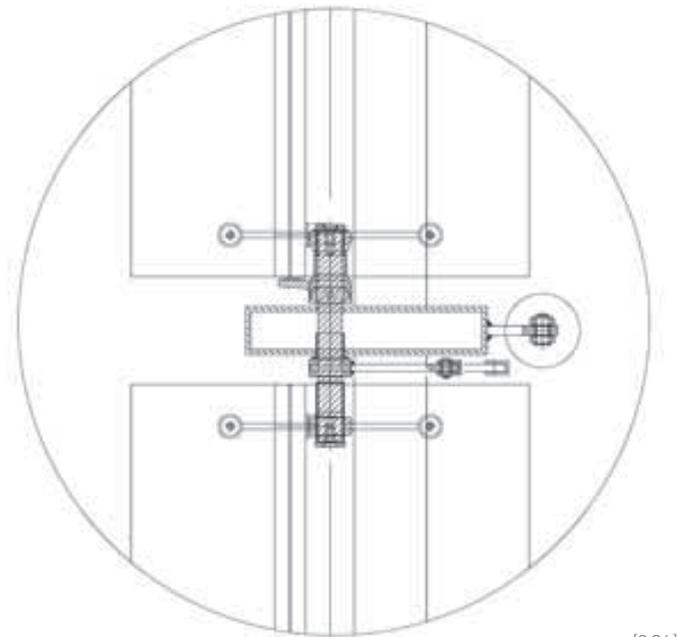
- 3.20 Vista generale dell'involucro architettonico
- 3.21 Vista interna del sistema a doppia pelle
- 3.22 Vista generale dell'involucro architettonico
- 3.23 Vista dal sistema di terrazze a Est
- 3.24 Vista generale dell'edificio
- 3.25 Disegno del sistema di schermatura orizzontale
- 3.26 Disegno del sistema di schermatura verticale
- 3.27 Vista dall'interno del sistema in configurazione aperta
- 3.28 Vista dall'interno del sistema in configurazione chiusa
- 3.29 Vista generale dell'edificio

5. <https://www.archdaily.com/644709/head-office-of-agc-glass-europe-samyn-and-partners>

6. Samyn, P. et al. (2014) *AGC Glass Building*. Tiel: Lannoo Publisher



[3.25]



[3.26]



[3.27]



[3.28]



[3.29]



[3.30]

3.1.4

CAMPUS KOLDING

HENNING LARSEN ARCHITECTS

KOLDING (DK)

2014

Il Campus Kolding è la nuova sede dell'*University of Southern Denmark* per i corsi dedicati al design, alla cultura e alle lingue. Situato nel centro della città di Kolding, in prossimità dell'omonimo fiume, l'edificio è caratterizzato dai particolari motivi generati dal sistema di schermatura adattivo. Oltre alla spiccata funzione espressiva, l'involucro è parte di una serie di sistemi volti alla sostenibilità. Un sistema di accumulo di energia termica dalla falda acquifera, permette di sfruttare un elemento naturale come l'acqua come "fonte rinnovabile di riscaldamento o raffreddamento, a seconda del periodo dell'anno".

Grazie ai pannelli solari e fotovoltaici installati in copertura e alla ventilazione meccanica a basso consumo, il campus ha un consumo energetico molto ridotto, "equivalente al 20-25% del consumo di edifici simili".

A livello architettonico il motivo triangolare riveste un ruolo centrale che passa dai pannelli dell'involucro fino alla forma dell'edificio.

La pianta, di forma triangolare, elevata per cinque piani, costituisce un volume compatto. All'interno ciascun piano presenta una serie di triangoli equilateri, sapientemente tagliati o ruotati per creare un atrio a tutt'altezza. La rotazione generata dalla rottura nella continuità dei piani, è osservabile tramite una serie di passerelle interne che circondano l'atrio e offrono agli studenti un luogo informale di dialogo e confronto. L'aula magna e una caffetteria sono disposte al piano terra mentre ai piani superiori gli spazi sono adibiti come uffici o aule.

L'attenzione verso gli utenti, sviluppata in primis con una disposizione interna che favorisce le interazioni interpersonali, trova amplificazione nell'involucro, dove un sistema di schermatura, adattabile alle condizioni climatiche esterne, crea comfort termico e visivo negli ambienti interni. Il Campus Kolding, situato in Danimarca, è soggetto a un clima freddo con raggi solari principalmente inclinati, che raggiungono la massima altezza solo nei mesi più caldi: Luglio e Agosto, dove si registrano anche temperature massime pari a 19,8 °C. Nel periodo invernale la temperatura può scendere fino a -3,3 °C e gli eventi di precipitazione sono frequenti. In questo contesto è necessario mitigare le dispersioni termiche tramite l'involucro, e al contempo massimizzare l'ingresso della luce naturale, soprattutto nel periodo invernale.



[3.31]



[3.32]



[3.33]

Il sistema di schermatura risponde alle richieste climatiche tramite una serie di 1600 pannelli in alluminio perforato. I fori circolari, presenti nelle lamelle mobili, consentono l'ingresso della luce anche quando il sistema è chiuso, creando interessanti motivi di luce e ombra negli spazi interni.

Quando il sistema è interamente in configurazione chiusa, i pannelli sono allineati alla facciata e il dinamismo è conferito dalle perforazioni, tuttavia il massimo potere espressivo viene trasmesso quando i pannelli sono in posizione aperta che crea un effetto simile a tante farfalle.

I pannelli, in alluminio perforato, presentano una forma triangolare e, grazie a piccoli motori elettrici nascosti nei montanti di sostegno, possono ruotare attorno ad un'asse centrale e disporsi perpendicolarmente ai raggi solari. Il posizionamento è regolato da sensori, posti in copertura, che registrano la radiazione solare, e regolano l'apertura in funzione delle variazioni climatiche esterne. L'apertura è graduale, da 0 a 90° mentre il motivo di foratura è ottimizzato per un angolo di apertura del pannello di 30°. Il sistema di pannelli è ancorato alla struttura, dopo un'intercapedine di 60 cm, tramite un telaio in acciaio.

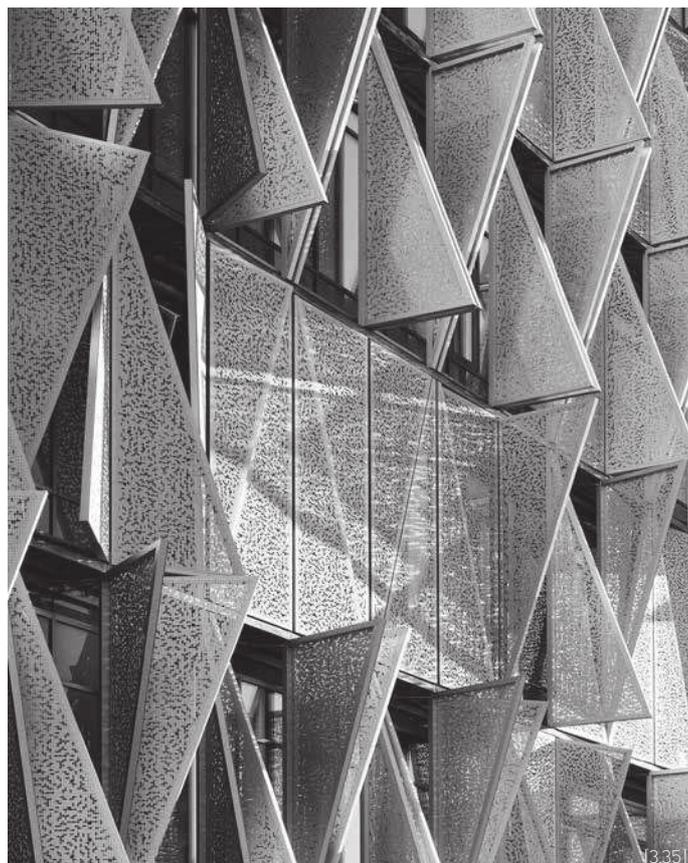
La scelta di utilizzare elementi verticali, è legata allo specifico contesto climatico in cui i raggi solari presentano principalmente un basso angolo di incidenza e per i quali gli verticali risultano essere più efficienti rispetto ai pannelli orizzontali.

Oltre al ruolo funzionale dell'involucro a doppia pelle, nel sistema di schermatura è stato introdotto un'opera dell'artista Tobias Rehberger, che amplifica il ruolo estetico dei pannelli, la natura dinamica, il contatto con l'ambiente e il tempo. Tramite una serie di 50 pannelli colorati che si muovono a intervalli fissi di uno, dieci o sessanta minuti, l'involucro diventa un orologio.

Il campus Kolding, con il suo particolare sistema di schermatura solare adattivo, è un esempio molto interessante sia di edilizia sostenibile, sia adattabilità dei sistemi di schermatura anche a climi più freddi.



[3.34]

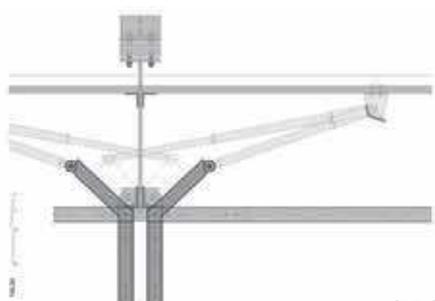


[3.35]

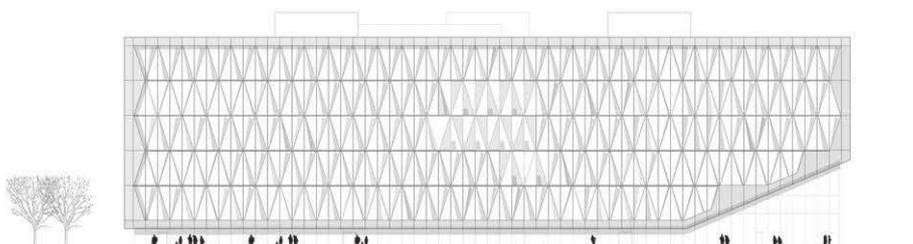
FIGURE:

- 3.30 Vista generale dell'edificio e del contesto ambientale circostante
- 3.31 Vista generale dell'involucro architettonico con i pannelli in configurazione aperta
- 3.32 Vista dell'involucro architettonico con i pannelli in configurazione aperta
- 3.33 Vista generale dell'edificio e del fiume Kolding
- 3.34 Vista in dettaglio del sistema di schermatura con i pannelli in configurazione intermedia
- 3.35 Vista in dettaglio del sistema di schermatura con i pannelli in diverse configurazioni
- 3.36 Disegno costruttivo del sistema a doppia pelle
- 3.37 Disegno del Prospetto esterno

7. <https://henninglarsen.com/en/projects/0900-0999/0942-sdu-campus-kolding>

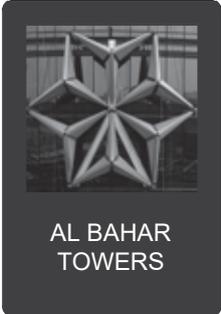
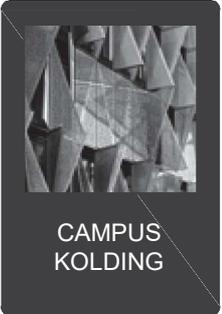


[3.36]



[3.37]

Tabella 3.1 Analisi comparativa delle soluzioni innovative per schermature solari adattive

	 THYSSENKRUPP QUARTER	 AL BAHAR TOWERS	 HEAD OFFICE OF ACG GLASS EUROPE	 CAMPUS KOLDING
FUNZIONE	Comfort Termico Comfort Visivo Comfort Acustico Estetica	Comfort Termico Comfort Visivo Comfort Acustico Estetica	Comfort Termico Comfort Visivo Estetica	Comfort Termico Comfort Visivo Comfort Acustico Estetica
TECNOLOGIA	Schermi mobili per il controllo della radiazione solare	Schermi mobili per il controllo della radiazione solare	Schermi mobili per il controllo della radiazione solare	Schermi mobili per il controllo della radiazione solare
MATERIALE	Acciaio	PTFE	Vetro serigrafato	Alluminio
SCALA SPAZIALE	Centimetri	Centimetri	Centimetri	Centimetri
CONTROLLO	Intrinseca Input: Termico Output: Meccanico	Intrinseca Input: Luminoso Output: Meccanico	Intrinseca Input: Luminoso Output: Meccanico	Intrinseca Input: Elettromagnetico Output: Meccanico
TEMPO DI RISPOSTA	Minuti	Minuti	Minuti	Secondi Minuti Ore
VISIBILITA'	Visibile	Visibile	Visibile	Visibile
GRADO DI ADATTABILITA'	Graduale	Graduale	On / Off	Graduale

3.1.5 Analisi comparativa

I quattro casi di studio: ThyssenKrupp Quarter, Al Bahar Towers, Head office of AGC Europe e Campus Kolding, sono accomunati dalle medesime funzioni associate al sistema di schermatura solare adattivo. Essi sono stati sviluppati per implementare il comfort termico, visivo e acustico degli utenti, inoltre è stata posta l'attenzione sulle tematiche di sostenibilità e di risparmio energetico. Ogni sistema di schermatura è anche la risposta ad una ricerca stilistica volta a valorizzare la facciata, e conferisce all'involucro un forte funzione estetica.

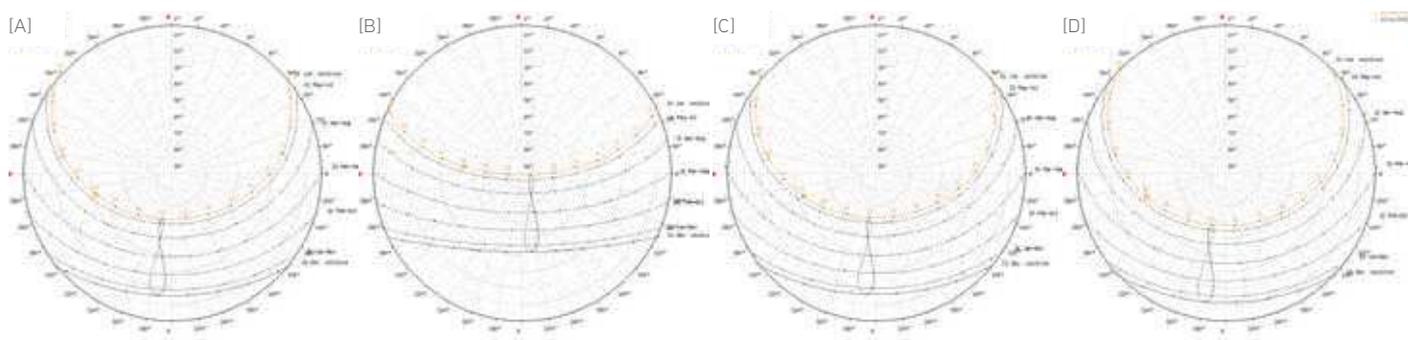
La forma degli elementi schermanti e i materiali utilizzati si differiscono nei quattro casi, passando da opachi pannelli in alluminio fino a trasparenti lamelle in vetro. Non è possibile affermare quale delle diverse soluzioni sia la migliore globalmente, tuttavia esse rappresentano il miglior sistema per le determinate condizioni climatiche presenti nel sito.

Un primo confronto può essere eseguito tra Al Bahar Towers e Campus Kolding. Essi sono situati in contesti climatici opposti: il primo negli Emirati Arabi, con clima Bsh, il secondo in Danimarca, con clima Cfb.

A livello spaziale gli elementi base del sistema presentano entrambi un pannello di forma triangolare, costruito in PTFE e in alluminio perforato. I due sistemi sfruttano la pesantezza dei pannelli in modo contrapposto: da un lato per minimizzare l'ingresso dei raggi solari incidenti, dall'altro per minimizzare le dispersioni termiche dall'involucro.

Le diverse necessità climatiche possono essere analizzate tramite i diagrammi solari polari rappresentati in Figura 3.38. L'altezza dei raggi solari di Abu Dhabi, diagramma [B], è molto più elevata rispetto ai raggi solari di Kolding, diagramma [D]; inoltre la traiettoria dei raggi solari durante Gennaio e Novembre ad Abu Dhabi è analoga alla traiettoria dei mesi caldi a Kolding, Aprile e Agosto, da cui si possono dedurre le elevate differenze climatiche.

Un secondo confronto è svolto tra il ThyssenKrupp Quarter e l'Head office of AGC Glass Europe, in cui il contesto climatico è simile: Cfb. La struttura di entrambe gli elementi base è a lamelle e, a differenza della compattezza dei sistemi precedenti, l'utilizzo del vetro o di una struttura non continua amplifica la leggerezza del sistema. Le diversità tra i due sistemi sono legate alla funzione estetica e alla ricerca architettonica sull'involucro.



[3.38] Diagramma solare polare degli edifici caso di studio:
[A] Thyssenkrupp Quarter, [B] Al Bahar Towers, [C] Head office of AGC Glass Europe., [D] Campus Kolding

3.2 INNOVAZIONI E FUTURI SVILUPPI

3.2.1 La Biomimesi

La biomimetica è definita, dalla norma ISO 18458:2015, come: “Cooperazione interdisciplinare di biologia e tecnologia, o altri campi di innovazione, con l’obiettivo di risolvere problemi pratici attraverso l’analisi funzionale dei sistemi biologici, la loro astrazione in modelli e il trasferimento e l’applicazione di questi modelli alla soluzione”⁹. In altre parole, la biomimetica ricerca nel mondo naturale principi e modelli di funzionamento, applicabili nella risoluzione dei problemi tecnologici.

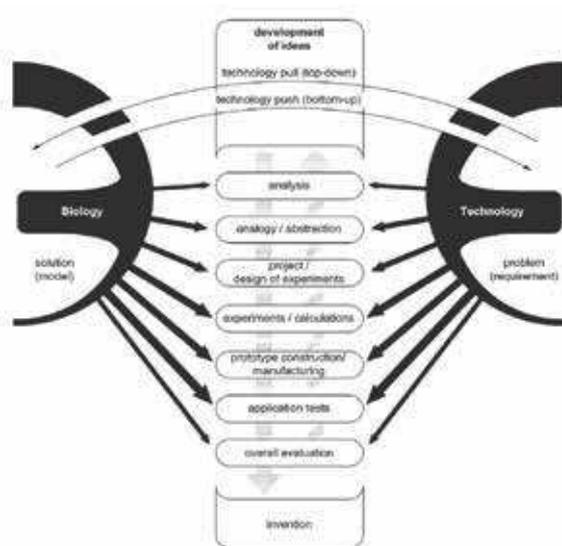
Il legame tra architettura e ambiente naturale è sia concettuale che funzionale, in quanto gli edifici dovrebbero essere capaci di mutare e adattarsi al mondo che li circonda, come avviene negli organismi viventi. Dall’ambiente naturale, che può essere analizzato a diverse scale: dall’organismo fino all’intero ecosistema, si possono dedurre conoscenze a livello morfologico: su come le proprietà fisiche dell’organismo permettano l’adattamento agli stimoli ambientali; a livello fisiologico: sui processi chimici che avvengono all’interno dell’organismo e a livello comportamentale: su come l’elemento si rapporta con l’ambiente circostante. Dallo studio dei sistemi naturali, si possono quindi dedurre dei modelli di interazione e adattabilità, che possono essere di ispirazione per lo sviluppo di innovazioni tecnologiche.

Le due definizioni presentate, differiscono leggermente nel rapporto tra biologia e tecnologia e rappresentano i due possibili approcci alla biomimetica. Nel primo, definito *top-down*, l’input iniziale è di tipo tecnologico, in quanto si ricerca nel mondo naturale un modello di soluzione per la problematica in esame. Nel secondo approccio, definito *bottom-up*, da un particolare modello naturale si ricercano possibili applicazioni nelle tecnologie. In Figura 3.39 sono rappresentati schematicamente sia i due possibili approcci, sia il flusso di analisi per lo sviluppo di un’innovazione in campo biomimetico.

9. ISO 18458:2015
Biomimetics - Terminology, concepts and methodology

10. Al Dakheel, J. et al. (2017). Building Applications, Opportunities and Challenges of Active Shading Systems: A State-of-the-Art Review. *Energies*, 10.

11. Fiorito, F. et al. (2016). Shape morphing solar shadings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 863-884.



[3.39] Diagramma sugli approcci biomimetici e sul flusso di analisi per lo sviluppo di innovazioni in ambito biomimetico. Tratta da: BS ISO 18458:2015

Nell'ambito architettonico, l'analogia più emblematica è tra l'involucro edilizio e la pelle di un organismo vivente: esso definisce un confine tra l'edificio e l'ambiente circostante, regola i flussi di calore e, in alcuni casi innovativi, è in grado di adattarsi alle diverse condizioni ambientali.

Implicito è quindi il collegamento tra la natura e i sistemi di schermatura solare adattivi, di cui gli attuali sviluppi si basano principalmente su un approccio biomimetico e altamente sostenibile. Nello specifico "le recenti tendenze nella progettazione di dispositivi di schermatura hanno cercato di sostituire i tradizionali sistemi meccanici con attuatori intelligenti e multifunzionali integrati che sono responsabili dello spostamento e del controllo del meccanismo"¹⁰; ovvero gli sviluppi si concentrano nell'applicazione della biomimetica e nello sfruttamento delle proprietà insite nei materiali per ottenere sistemi in grado di adattarsi autonomamente alle condizioni esterne, senza la necessità di apporti energetici esterni.

I due prototipi innovati di sistema di schermatura solare adattiva, analizzati nel seguito, sono accomunati dall'ispirazione biomimetica e dall'utilizzo di un gradiente di temperatura come attuatore del movimento di adattamento. Il loro posizionamento nella facciata ne consente l'esposizione diretta alla luce solare e, tramite l'effetto termico generato dalla radiazione solare, l'adattamento alle condizioni ambientali esterne può avvenire senza la necessità di sistemi meccanici o sensori.

Tramite il secondo prototipo è possibile introdurre un campo di sviluppo dei sistemi passivi di schermatura solare adattiva legato all'impiego dei materiali sensibili agli stimoli: *Stimulus-responsive materials*.

Dei vari materiali sensibili, in grado di rispondere agli stimoli esterni tramite variazioni alle proprietà fisiche o chimiche, si descrive l'utilizzo di una lega a memoria di forma, *shape memory alloys*, appartenente alla categoria dei materiali a memoria di forma, *shape memory materials*. Questa lega a memoria di forma può disporsi in due configurazioni alternative, in funzione dello stimolo esterno percepito.

"Negli ultimi decenni, le leghe a memoria di forma sono state ampiamente testate e utilizzate, e attualmente possono essere considerate i materiali più adatti per le applicazioni di ombreggiatura"¹¹.

A conclusione viene descritto un innovativo edificio, attualmente in costruzione, in cui il prototipo Pho'liage troverà applicazione.

3.2.2 Warm Motion System

Il primo prototipo analizzato: *Warm Motion System*, è un sistema di orientamento di tipo passivo, che sfrutta la naturale espansione termica per attuare il movimento. L'attuatore trova molteplici applicazioni, se integrato con pannelli fotovoltaici, è in grado di ottimizzare l'inseguimento solare; mentre se integrato con elementi frangisole, è in grado di ottimizzarne il loro posizionamento in funzione delle caratteristiche climatiche esterne: nel periodo invernale massimizza la penetrazione della radiazione solare mentre, nel periodo estivo, minimizza gli apporti solari tramite la riflessione dei raggi luminosi. Quando l'attuatore viene integrato con degli elementi schermati, il sistema costituisce un innovativo sistema di schermatura solare adattivo e passivo.

L'obiettivo alla base del sistema è di coniugare "la riduzione dei consumi energetici, con il minimo impatto ambientale, senza l'ausilio di motori, dispositivi computerizzati o fonti energetiche esterne"¹².

L'ispirazione del sistema è di tipo biomimetico: esso trova origine dal comportamento mutevole dei girasoli che, tramite le fibre del fusto, sono in grado di seguire l'andamento del sole e di disporre perpendicolarmente ai raggi solari.

Il sistema *Warm Motion System*, sviluppato dall'architetto Livio Petriccione e dagli ingegneri Fabio Fulchir e Francesco Chinellato¹³, si compone di tre elementi principali: un telaio di supporto, degli elementi espandenti e un sistema di moltiplicazione del movimento, raffigurati in Figura 3.40.

Gli elementi di espansione, attuatori del sistema di orientamento, sono delle barre in alluminio, a sezione piatta, trattate con vernice bi-componente nera¹⁴. Quando installati nella facciata, gli elementi sono soggetti ad una componente convettiva, che porterà le barre in equilibrio termico con l'aria circostante, e una componente di irraggiamento dovuta alla radiazione elettromagnetica fornita dai raggi solari incidenti. A differenza della prima, la componente solare varia nell'arco della giornata e nelle diverse stagioni, a causa del diverso angolo di incidenza dei raggi solari.

Il sistema, a seconda dell'applicazione prescelta, viene connesso agli elementi da movimentare che possono essere: pannelli fotovoltaici, pannelli solari ad aria o elementi frangisole, e conseguentemente viene definita la modalità di funzionamento. Nel seguito si concentra l'attenzione sul sistema WM in modalità "*solar shading*", strutturato per essere integrato con elementi frangisole.

12. Petriccione, L. et al. (2021). Applied innovation: Technological experiments on biomimetic façade systems and solar panels. *TECHNE*, 2, 82-86.

13. Dipartimento di Ingegneria e Architettura dell'Università di Udine.

14. Le barre utilizzate sono in alluminio: *AL_Mg_Si 6060 T6 "Anticorodal"*, con sezione 50x2 mm. La vernice bi-componente nera utilizzata, è specifica per l'alluminio e possiede un coefficiente di assorbimento compreso tra 0,85 e 0,90.

FIGURE:

3.40 Schema di funzionamento del sistema WM per l'orientamento di elementi schermanti

3.41 Sezione verticale del sistema WM in configurazione di massima apertura

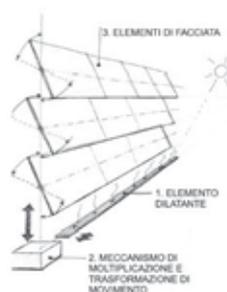
3.42 Sezione verticale del sistema WM nella facciata dell'edificio

3.43 Schema geometrico delle posizioni di orientamento delle lamelle

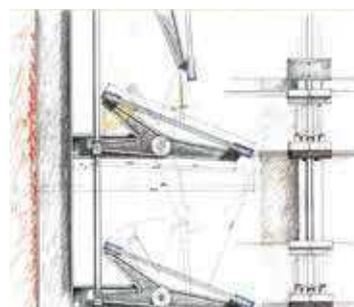
3.43 Esempio di sistema dinamico di schermatura auto-adattivo integrato nella facciata

3.45 Grafico della retta interpolatrice tra la temperatura esterna e l'inclinazione ottimale delle lamelle

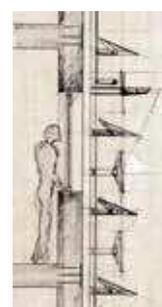
3.46 Schema geometrico di funzionamento del meccanismo di inclinazione delle lamelle.



[3.40]



[3.41]



[3.42]

A livello qualitativo il sistema funziona in modo analogo ai precedenti: nel periodo invernale consente l'ingresso di tutta la radiazione solare mentre, tramite la riflessione dei raggi solari, nel periodo estivo consente di ridurre il guadagno solare. L'innovazione, che lo rende altamente interessante, è legata al suo funzionamento: le lamelle ruotano in maniera autonoma grazie al sistema WM integrato, che ne genera il movimento tramite l'espansione termica degli elementi dilatanti.

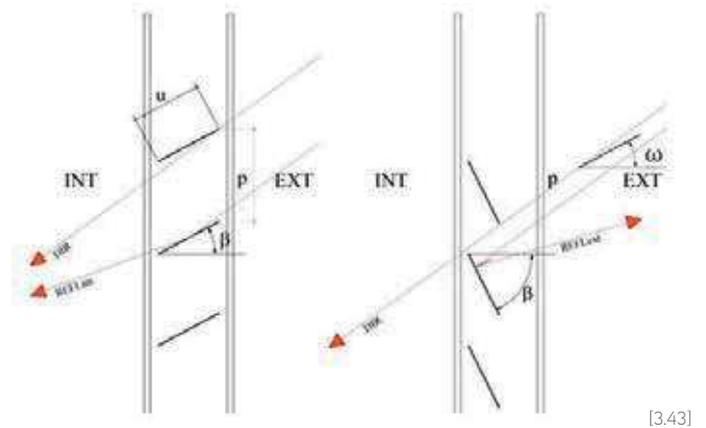
Nello specifico: "Il meccanismo genera una rotazione delle lamelle frangisole attraverso lo sfruttamento della differenza di dilatazione termica (ΔL) tra il telaio in acciaio e gli elementi dilatanti" ¹². La configurazione strutturale del sistema quando non sollecitato e quando soggetto allo stimolo esterno, sono rappresentate in Figura 3.46.

Al fine di garantire il comfort interno, il sistema è stato sviluppato considerando la temperatura esterna di 18°C come il valore soglia, in cui il sistema varia la modalità di funzionamento. Quando la temperatura è inferiore, le lamelle sono orientate parallelamente ai raggi solari, mentre quando la temperatura risulta superiore, tramite una rotazione, le lamelle vengono poste perpendicolarmente ai raggi solari, permettendone la riflessione. Nelle situazioni intermedie, è previsto un passaggio graduale tra le due configurazioni, che permette di sfruttare la percentuale di raggi solari riflessi internamente, nei periodi più freddi, o di schermarli parzialmente nei periodi prevalentemente caldi.

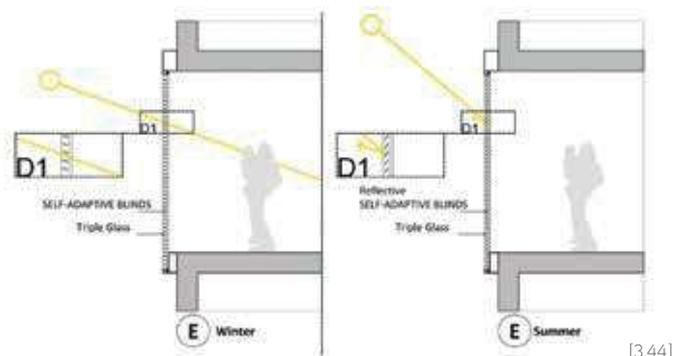
In Figura 3.45 i punti di colore viola rappresentano l'inclinazione ottimale delle lamelle frangisole in funzione della temperatura, mentre le rette ottenute tramite un'interpolazione ai minimi quadrati, rappresentano l'andamento ottimale dell'inclinazione delle lamelle, attuato tramite variazioni graduali.

Con la modalità "solar shading" è possibile integrare anche elementi contenenti pannelli solari ad aria, mentre per l'accoppiamento con i pannelli fotovoltaici è stata sviluppata la modalità "solar panel".

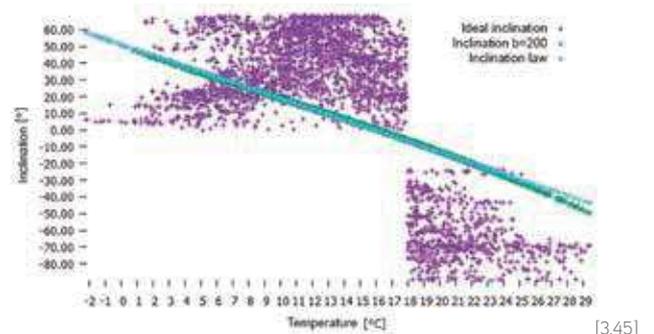
Per ulteriori dettagli si consiglia di leggere di seguente articolo: Petriccione, L., Fulchir, F. & Chinellato, F. (2021). Applied innovation: Technological experiments on biomimetic façade systems and solar panels. *TECHNE*, 2, 82-86.



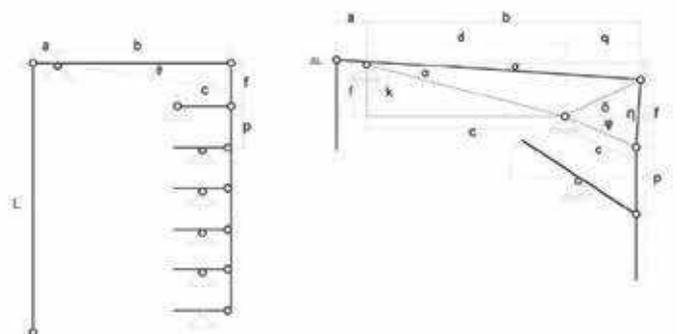
[3.43]



[3.44]



[3.45]



[3.46]

3.2.3 Pho'liage

Il secondo prototipo analizzato: *Pho'liage*, è un innovativo sistema di schermatura adattivo passivo di ispirazione biomimetica, sviluppato tramite un approccio *top-down*, che trova ispirazione sia nella forma sia nel meccanismo di apertura e chiusura dei fiori.

Il sistema, nella sua versione più recente, è composto da tre petali in lega a memoria di forma, e un cavo di acciaio inossidabile che rappresenta il sistema di supporto.

La scelta delle forme triangolare, che richiama i petali dei fiori, è in grado di migliorare la curvatura del sistema in risposta ai cambiamenti di temperatura e conferire rigidità all'elemento schermante.

La capacità di adattamento alle condizioni climatiche esterne, è ottenuta grazie alle sole proprietà insite nel materiale: sfruttando le variazioni di intensità della radiazione solare, è possibile variare autonomamente la configurazione dei petali. Il sensore e l'attivatore del sistema non sono più sistemi meccanici ma le loro funzioni vengono svolte in maniera completamente passiva tramite la dilatazione dei metalli.

Il meccanismo di apertura, di ispirazione biomimetica, richiama alcune "specie di fiori che si aprono al mattino principalmente in risposta alla temperatura, la superficie interna del petalo si espande rapidamente quando la temperatura aumenta"¹⁵, mentre "il raffreddamento si traduce in una crescita più rapida sulla superficie esterna"¹⁵.

Ogni petalo è costituito da un bimetallo termostatico, *thermostatic bimetal*, in cui due differenti leghe metalliche sono unite tramite un processo di laminazione a freddo. Grazie ai differenti coefficienti di dilatazione termica, uniti all'azione della radiazione solare, il sistema è in grado di variare da una configurazione dei petali chiusa a una configurazione di schermatura in cui i petali sono aperti. Il Figura 3.47 è rappresentato il sistema Pho'liage in configurazione naturale di chiusura mentre in Figura 3.48 è rappresentato il sistema, soggetto allo stimolo esterno, in configurazione di schermatura solare con i petali aperti. In Figura 3.49 è rappresentato schematicamente il movimento attuato dai petali, nonché elementi schermanti, quando uno stimolo esterno induce una variazione tra le due configurazioni possibili del sistema.

L'analogia con i processi di apertura dei fiori è evidente: quando sottoposte a un gradiente di temperatura, le due leghe reagiscono in maniera differente, a causa dei rispettivi coefficienti di dilatazione, permettendo l'apertura, mentre quando la temperatura torna inferiore alla soglia di

15. Artbuild. (2019). *Pho'liage. A Biomimetic Façade which increases Building Energy Efficiency.*



[3.47]



[3.48]



[3.49]

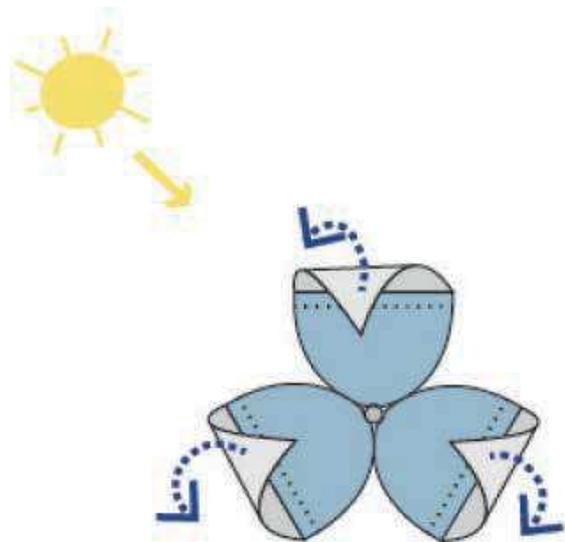
25°C , il sistema richiude autonomamente i tre petali. Il sistema di schermatura è strutturato per essere installato esternamente alla facciata quindi è soggetto all'azione degli agenti esterni: come pioggia, vento e inquinamento. Per assicurarne una resistenza alle sollecitazioni, sono stati sviluppati una serie di rivestimenti che proteggono i metalli dalla corrosione e mantengono la loro flessibilità di movimento.

I sistemi di schermatura adattivi migliorano l'efficienza globale dell'edificio, inoltre le tecnologie passive, in grado di regolarsi senza la necessità di apporti energetici, massimizzano il risparmio energetico.

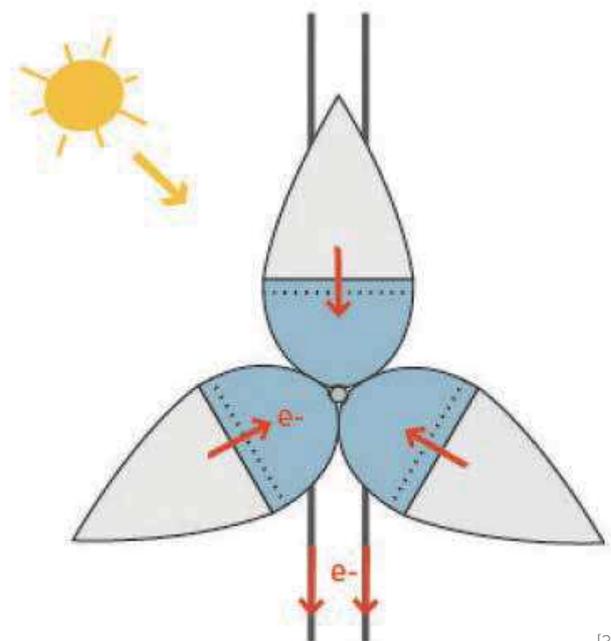
Nell'ultimo prototipo sviluppato da *ArtBuild's Lab*, sono state introdotte, nella parte terminale dei petali dei fiori, delle celle fotovoltaiche che integrano nel dispositivo la capacità di produrre energia rinnovabile. Nelle Figure 3.50 e 3.51 è rappresentato il prototipo rispettivamente nelle configurazioni di chiusura e apertura, dove la zona indicata in blu rappresenta l'attuatore in bimetallo e la zona grigia rappresenta la cellula fotovoltaica.

Rispetto alle cellule fotovoltaiche fisse, la loro applicazione negli elementi mobili di un sistema di schermatura è in grado di aumentare significativamente la produzione di energia, sfruttando l'inclinazione dei petali perpendicolare ai raggi solari.

Il sistema Pho'liage è un prototipo di schermatura solare adattivo molto interessante sia per l'utilizzo di materiali innovativi sia per la totale autonomia del sistema nel rispondere agli stimoli esterni. Esso verrà installato nella facciata dell'*IARC Headquarters*, analizzato nel seguito. Ulteriori dettagli sul prototipo *Pho'liage* sono raccolti in: Charpentier, L., et al. (2022). *Pho'liage: Towards a Kinetic Biomimetic Thermoregulating Façade*. In: Palombini, F.L., Muthu, S.S. (A cura di) *Bionics and Sustainable Design. Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes*. Singapore: Springer.



[3.50]



[3.51]

FIGURE:

- 3.47 Sistema Pho'liage in configurazione naturale di chiusura
- 3.48 Sistema Pho'liage in configurazione di apertura
- 3.49 Movimento dei petali del sistema Pho'liage
- 3.50 Schema dei materiali del sistema Pho'liage in configurazione di chiusura
- 3.51 Schema dei materiali del sistema Pho'liage in configurazione di apertura
- 3.52 Rappresentazione delle configurazioni del sistema Pho'liage installato in facciata



[3.52]



[3.53]

3.2.4

IARC HEADQUARTERS

ARTBUILT + UNANIME

LYON (FR)

2020 - IN COSTRUZIONE

L'interesse per la nuova sede dell'IARC (*International Agency for Research on Cancer*) è legato ai due innovativi sistemi di schermatura solare adattivi e passivi di cui si avvale l'edificio. Nella facciata esterna, il sistema a doppia pelle presenta dei motivi organici ottenuti grazie a vetri fotosensibili; mentre nella corte interna è previsto l'utilizzo del prototipo Pho'liage come sistema di schermatura.

A livello architettonico l'edificio è stato sviluppato attorno a tre concetti chiave: il primo è la trasparenza e l'apertura dell'edificio all'ambiente circostante, il secondo è un forte legame con la natura e, infine, è stata posta attenzione alle tematiche di benessere degli utenti e alla sostenibilità ambientale.

La trasparenza e l'apertura trovano applicazione grazie alla struttura dell'edificio. Esso si compone di un volume monolitico, che raccoglie le aree destinate alla ricerca e gli uffici, che appare sospeso.

Tramite una sottrazione circolare, è stato ottenuto un atrio centrale che permette di illuminare gli uffici affacciati e l'inserimento di elementi naturali tramite un giardino interno. Nelle facciate interne, in corrispondenza delle aree ristoro, delle ampie facciate vetrate collegano gli spazi interni con il fulcro centrale dell'edificio.

Nel piano terra si ha la massima espressione dei concetti di apertura e trasparenza, sviluppati tramite l'impiego di due involucri completamente vetrati che permettono il contatto tra l'ambiente esterno e l'atrio centrale. Nelle aree racchiuse tra i due involucri vetrati, trovano spazio i luoghi collettivi come la caffetteria e la sala per le conferenze.

Nella zona occidentale, esternamente all'edificio, è stato progettato un parco pubblico con dei percorsi pedonali. Se si osserva l'edificio da questo punto di vista, nel volume monolitico si ritrova un'ulteriore sottrazione che lascia il posto ad ampie vetrate in grado di trasmettere ulteriormente il senso di permeabilità dell'edificio. Di fronte ad esse, elementi naturali trovano un aggiuntivo punto di applicazione, creando un giardino verde inglobato nel volume dell'edificio.

Il concetto della biomimetica, si ritrova sia nell'estesa applicazione della natura, sia nei due involucri architettonici che racchiudono l'edificio.

Esternamente l'edificio è rivestito da un sistema a doppia pelle, dove nella parte interna le aperture hanno una configurazione tradizionale e presentano un rivestimento in alluminio.



[3.54]



[3.55]



[3.56]



[3.57]



[3.58]

La seconda pelle, dell'involucro esterno, è strutturata da una facciata continua con pannelli in vetri termocromatici. Essi, grazie ai diversi livelli di trasparenza ed opacità del materiale, sono in grado di fornire protezione dai raggi solari incidenti e di creare un motivo organico che caratterizza l'estetica esterna dell'edificio. "La grafica delle piante apparirà sulla facciata quando il sole è luminoso e scomparirà quando è nuvoloso. La percezione esterna dell'edificio cambierà costantemente, a seconda dell'ora del giorno, del tempo e delle stagioni"¹⁶.

Di notte, quando le vetrate appaiono trasparenti, tramite un progetto di illuminazioni di Gilbert Coudène i motivi organici vengono risaltati creando un ulteriore elemento estetico nell'involucro architettonico.

L'involucro interno, che riveste gli ambienti affacciati nell'atrio centrale, presenta un sistema di aperture tradizionali, incorniciate in rivestimenti in intonaco ed elementi lignei, e ampie facciate continue nelle zone relax. Nei piani superiori, in cui sono ricavate le zone adibite ad uffici, l'illuminazione è principalmente naturale e i raggi solari vengono modulati tramite il sistema di schermatura solare adattivo. E' in questo punto dell'edificio che il prototipo *Pho'liage* verrà installato, come rivestimento esterno dell'atrio centrale.

Il collegamento con la ricerca sui temi di benessere è evidente: "La qualità ambientale degli spazi interni, la scelta dei materiali naturali, il design ispirato alla biomimetica, tutti questi elementi sono stati considerati per creare un ambiente di lavoro unico e ottimale"¹³.

La ricerca della sostenibilità ambientale comprende tutto l'edificio, il cui bisogno energetico è stato minimizzato grazie a: un volume compatto, un involucro efficiente energeticamente e termicamente, a sistemi di protezione solare flessibili e all'utilizzo interno di attrezzature ad alta efficienza energetica. Grazie all'attenta progettazione l'edificio ha ottenuto l'etichetta *Effinergie+*.

Il progetto in esame è stato sviluppato dagli architetti dello studio *Art & Build*, insieme allo studio *Unanime*. La costruzione dell'edificio è iniziata il 6 Febbraio 2020, con la cerimonia della posa della prima pietra, dopo un periodo di sospensione dei lavori a causa della situazione pandemica, l'edificio è attualmente in fase di ultimazione. La conclusione dei lavori è prevista per Settembre 2022, mentre la sede diventerà operativa da Gennaio 2023.

L'attenzione all'edificio verrà posta anche successivamente alle fasi di costruzione, poiché è uno dei primi esempi in cui questi nuovi prototipi passivi trovano applicazione. Interessante sarà svolgere valutazioni a lungo termine sul ciclo vita degli elementi schermanti, quando posti in opera e soggetti alle condizioni ambientali esterne, e valutarne la loro efficienza nella riduzione dell'incidenza dei raggi solari. Un'ulteriore ambito di ricerca interessante sarebbe valutare l'interazione tra un sistema schermante attivato autonomamente in funzione degli stimoli esterni e gli utenti interni, di cui si potrebbe analizzare il grado di soddisfazione nei confronti di questa innovativa tecnologia.

16. Governing Council of IARC. (2018). *Update on the "Nouveau Centre"*, GC/60/11



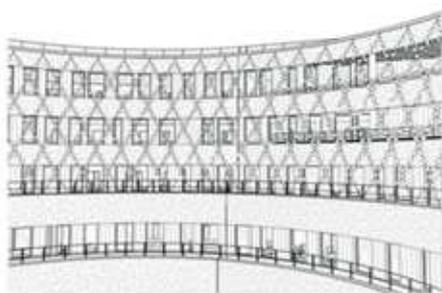
[3.59]



[3.60]



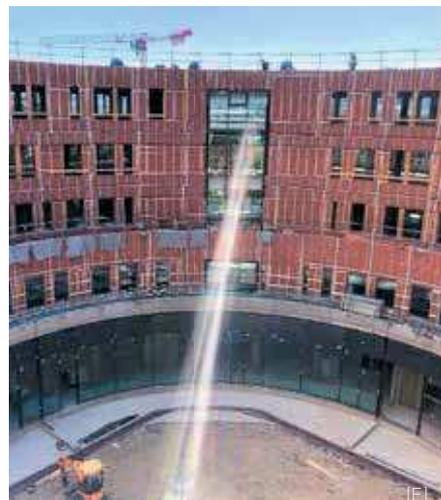
[3.61]



[3.62]

FIGURE:

- 3.53 Rendering generale dell'edificio e dell'inserimento nel contesto
- 3.54 Rendering dell'atrio centrale
- 3.56 Rendering degli spazi collettivi al piano terra
- 3.56 Rappresentazione schematica del prototipo Pho'liage installato nell'atrio centrale
- 3.57 Rappresentazione schematica del funzionamento giornaliero dei vetri termocromatici
- 3.58 Rappresentazione schematica del funzionamento notturno dei vetri termocromatici
- 3.59 Rendering dell'ingresso dell'edificio
- 3.60 Rendering generale dell'edificio con l'illuminazione notturna
- 3.61 Rendering delle aree relax e delle facciate continue panoramiche
- 3.62 Rappresentazione dell'atrio centrale e del sistema Pho'liage installato



[3.63] Foto dei lavori durante la costruzione dell'IARC Headquarters:

[A]: Vista del sistema interno a doppia pelle dell'involucro esterno

[B]: Vista dei vetri termocromatici dell'involucro esterno

[C]: Vista dell'involucro esterno

[D]: Vista del rivestimento interno dell'atrio centrale

[E]: Vista del sistema portante dell'atrio centrale

3.2.5 Analisi comparativa

L'analisi comparativa svolta, non mira a definire un prototipo migliore, bensì ad analizzare i vantaggi ottenibili con i diversi sistemi presentati e i loro possibili sviluppi.

Sia il sistema Warm Motion che il sistema Pho'liage sono di tipologia passiva, e sfruttano l'espansione termica differenziata di due metalli interagenti, per generare l'attuazione del movimento. Inoltre entrambi sono accomunati dalle origini biomimetiche, essi traggono ispirazione dal funzionamento dei fiori, e dalla possibilità di integrare sistemi fotovoltaici.

Nel primo prototipo analizzato, l'integrazione con il pannello fotovoltaico è ottimizzata grazie al movimento graduale, che dispone l'elemento sempre in posizione perpendicolare ai raggi solari incidenti. Tramite il confronto della produzione di corrente elettrica di tre piccoli pannelli fotovoltaici è stato osservato che "la produzione di corrente elettrica di un pannello fotovoltaico montato sull'impianto WM è stata maggiore del 25% rispetto a un pannello fisso disposto verticalmente mentre, rispetto ad uno orizzontale, l'incremento è stato pari al 40%"¹².

Ulteriore vantaggio è dato dal materiale utilizzato, le barre in alluminio sono reperibili a basso costo e, gli eventuali costi possono essere ammortizzati grazie a un costo minore legato al funzionamento ridotto degli impianti di riscaldamento e raffreddamento. La tecnologia potrebbe vedere uno sviluppo tramite "l'utilizzo di materiali innovativi ad alto coefficiente di dilatazione termica e trattamenti superficiali ad alto assorbimento solare"¹².

Il secondo prototipo stupisce per la bellezza estetica della configurazione dei petali schermanti, tuttavia gli sviluppi si sono concentrati sull'ottimizzazione del rapporto tra configurazione aperta e piegata.

L'utilizzo di materiali innovativi come le leghe a memoria di forma è emblematico, tuttavia questa tecnologia presenta costi elevati e problematiche di produzione di suono dovuto alla distorsione del materiale quando soggetto al carico termico.

Entrambi i sistemi rappresentano uno sviluppo molto interessante dei sistemi di schermatura solare adattivi, in grado di eliminare le criticità dei sistemi elettromeccanici e di ridurre i notevoli costi di installazione e manutenzione.

Il futuro dei sistemi schermanti è orientato verso le tecnologie passive, il cui funzionamento non incide nella domanda energetica dell'edificio, bensì possono essere fonte di energia rinnovabile.

CONCLUSIONI

L'obiettivo dell'analisi storica e tecnologica, svolta nel seguente lavoro di tesi, è stato di investigare l'involucro architettonico vetrato e le sue possibili integrazioni con i sistemi di schermatura adattivi, finalizzate a sfruttare le potenzialità della luce solare per sviluppare un'architettura sostenibile.

L'importanza della salvaguardia dell'ambiente può essere dedotta tramite l'analisi degli obiettivi mondiali: l'Accordo di Parigi, che prefigge di mantenere l'innalzamento della temperatura almeno al di sotto dei 2°C, tramite le politiche europee sulla minimizzazione delle emissioni di gas serra entro il 2050, e, specificatamente a livello architettonico, tramite l'instaurazione di un nuovo modello di architettura: *nearly Zero Energy Building*.

Nel contesto climatico attuale, i sistemi di schermatura solare adattivi rivestono un ruolo chiave poiché essi possono sfruttare le potenzialità della luce solare, per ridurre l'impatto nel bilancio energetico dei sistemi di riscaldamento, raffreddamento e illuminamento, mantenendo le condizioni ambientali interne ottimali; ovvero sono elementi tecnologici in grado di contribuire allo sviluppo di un sistema edilizio di qualità, in grado di rispondere alle esigenze degli utenti tramite le sue prestazioni. Tramite l'analisi storica è possibile interpretare come il vetro, e successivamente le facciate continue, siano diventati gli elementi caratterizzanti l'involucro architettonico. Dai casi di studio tradizionali: Il Seagram Building e il Channel 4 Headquarters, apprendiamo come i sistemi a facciata continua hanno fondamenta storiche nel costruito e come l'utilizzo estensivo del vetro porti con sé sia potenzialità di trasparenza e di collegamento con l'ambiente circostante, sia limitazioni nel risparmio energetico dovute alle basse capacità termiche dei vetri. Dai sistemi tradizionali a montanti e traversi, ai sistemi cellulari si ottenne un aumento nella velocità di posa in opera e nella qualità dei sistemi, che confluiscono nel sistema a fissaggi puntuali in grado di massimizzare l'ambito estetico grazie alla limitazione degli elementi opachi. Tuttavia, attualmente il sistema che trova maggior impiego è quello a doppia pelle, poiché in grado di ridurre la richiesta energetica rispetto ai sistemi tradizionali.

Nei casi di studio recenti, vediamo un'applicazione delle più moderne tecniche, in cui i concetti di sostenibilità sono elementi centrali nel progetto. Il Lakhta Center grazie ad un sistema a doppia pelle ha ottenuto la certificazione LEED Platinum, mentre nel 70 St. Mary Axe, la certificazione LEED Gold è ottenuta grazie ad avanzati sistemi di facciata continua con l'integrazione di un sistema di schermatura solare fisso.

Riprendendo l'analisi storica dalle opere di Le Corbusier, si sono analizzati i primi esempi di schermatura solare nell'architettura moderna. Renzo Piano e Jean Nouvel hanno ripreso il concetto della luce solare con una nuova chiave di lettura legata alla consapevolezza ambientale. Nell'architettura contemporanea gli elementi schermanti hanno visto diverse mutazioni nelle configurazioni spaziali, originate dalla una ricerca stilistica e funzionale che li ha resi l'elemento caratterizzante l'involucro architettonico

Nei quattro casi di studio: ThyssenKrupp Quarters, Al Bahar Towers, Head Office of AGC Glass Europe e Campus Kolding, l'impatto estetico della schermatura nell'aspetto dell'edificio è notevole, grazie anche alle forme originali, ai diversi materiali impiegati e ai giochi di luce che essi creano, tuttavia essi rappresentano quattro esempi di architettura contemporanea in cui la sostenibilità è stata raggiunta all'unisono con il benessere degli utenti. Dai confronti posti se ne deduce come variazioni nella configurazione spaziale e funzionale siano in grado di originare dei sistemi di schermature solari adattivi integrabili con diverse condizioni climatiche.

I risultati più interessanti, sia nell'ottica del lavoro svolto, sia nel futuro dell'architettura, sono stati ottenuti dall'analisi dei sistemi di schermatura solare adattivi e passivi. Il sistema Warm Motion e il prototipo Pho'liage sono in grado di migliorare le criticità dei sistemi elettromeccanici precedentemente utilizzati: mantenendo l'ottimizzazione delle condizioni ambientali interne e conseguentemente il benessere degli utenti e minimizzando il consumo energetico, grazie allo sfruttamento dell'espansione termica, dovuta alla sola radiazione termica, come attuatore del sistema di schermatura.

L'ultimo caso di studio è l'IARC Headquarters, un edificio attualmente in costruzione in cui verrà installato il sistema di schermatura Pho'liage. Esso rappresenta un'innovazione nel campo dell'architettura e, tramite future analisi, sarebbe interessante valutare l'interazione tra un sistema di schermatura in grado di adattarsi autonomamente agli stimoli esterni e il grado di soddisfacimento degli utenti.

BIBLIOGRAFIA

- Abdelrazaq, A., Travush, V., Shakhvorostov, A., Timofeevich, A., Desyatkin, M., & Jung, H. (2020). The Structural Engineering Design And Construction Of The Tallest Building In Europe Lakhta Center, St. Petersburg. *Russia. International Journal of High-Rise Buildings*, 9, 283-300. <https://doi.org/10.21022/IJHRB.2020.9.3.283>
- Aelenei, D., Aelenei, L., & Vieira, C. P. (2016). Adaptive Façade: concept, applications, research questions. *Energy Procedia*, 91, 269-275. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.218>
- Aelenei, L., Aelenei, D., Romano, R., Mazzucchelli, E. S., Brzezicki, M., Rico-Martinez, J. M. (2018). *Case Studies - Adaptive Facade Network*. TU Delft Open for the COST Action 1403. Disponibile in: http://tu1403.eu/?page_id=1562
- Al Dakhneel, J., Tabet Aoul, K. (2017). K. Building Applications, Opportunities and Challenges of Active Shading Systems: A State-of-the-Art Review. *Energies*, 10. <https://doi.org/10.3390/en10101672>
- Almodovar M., J. M., Lainez, J. M. C. & Verdejo, J. R. J. (2008). Nineteen Thirties Architecture for Tropical Countries: Le Corbusier's Brise-Soleil at the Ministry of Education in Rio de Janeiro. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 7, 9-14. <https://doi.org/10.3130/jaabe.7.9>
- Alotaibi, F. (2015). The Role of Kinetic Envelopes to Improve Energy Performance in Buildings. *Journal of Architectural Engineering Technology*, 4. <https://dx.doi.org/10.4172/2168-9717.1000149>
- ArtBuild (2019) *Pho'liage. A Biomimetic Façade which increases Building Energy Efficiency*. Disponibile in: <https://www.artbuild.com/lab/pholiage>
- Arup. (2013). The Al Bahar towers: multidisciplinary design for Middle East high-rise. *The Arup Journal*, 2, 60 - 73. Disponibile in: <https://www.arup.com/perspectives/publications/the-arup-journal/section/the-arup-journal-2013-issue-2>
- Beccu, M., Spartaco, P. (2008). *L'invulcro architettonico contemporaneo tra linguaggio e costruzione*. Roma: RDesign Press.
- Benevolo, L., (2008). *L'architettura del nuovo millennio*. Roma: GLF editori Laterza.
- Boyd, N. L. (2019). *The Villa Baizeau and the Casa O'Gorman: The Modern House in 1929 Through Two Case Studies*. Tesi: City University of New York. Disponibile in: https://academicworks.cuny.edu/hc_sas_etds/452
- Building Performance Institute Europe. (2017). *97% of buildings in the EU need to be upgraded*. Disponibile in: <https://www.bpie.eu/publication/97-of-buildings-in-the-eu-need-to-be-upgraded/>
- Casaburi, R., Prato, F., & Vineis, D. (2016). *Manuale pratico per la Progettazione sostenibile*. Roma: Legislazione Tecnica.
- Castelli, S. (2015). *Schermature solari e architettura. Analisi qualitativa e quantitativa del loro utilizzo*. Tesi di laurea magistrale: Politecnico di Milano.
- Ceccherini N., L., D'Audino, E., Lusardi, A. P., Sala, M., & Trombadore, A. (2000). *Schermature solari*. Firenze: Alinea editrice.
- Ciccarelli, L. (2016). *Kimbell Art Museum Expansion*. Disponibile in: <https://www.fondazionerenzopiano.org/it/project/kimbell-art-museum-expansion/#section-documents>
- Collins, M., Knutti, R. (2013). Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. Disponibile in: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- Comunicazione della Commissione Europea "Un pianeta pulito per tutti: visione strategica europea a lungo termine per un'economia prospera, moderna, competitiva e climaticamente neutrale", COM (2018)773, finale.
- Cruz, E., Hubert, T., Chancoco, G., Naim, O., Chayaamor-Heil, N., Cornette, R., Menezo, C., Badarnah, L., Raskin, K., & Aujard, F. (2021). Design processes and multi-regulation of biomimetic building skins: A comparative analysis. *Energy and Buildings*, 246. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111034>
- Daqiqeh Rezaei, S., Shannigrahi, S., Ramakrishna, S. (2017). A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 159, 26-51. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.08.026>
- Dassori, E., Morbiducci, R., (2020). *Costruire l'architettura. Tecniche e tecnologie per il progetto*. Milano: Tecniche Nuove.
- Daly, J. (2021). Renzo Piano: 'Buildings are like children - you want them to have a happy life'. *Financial times*. Disponibile in: <https://www.ft.com/content/7f70d4f4-d136-45fb-8dac-0376d2715517>
- Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio 2002/91/CE del 16 dicembre 2002 sul rendimento energetico nell'edilizia.

- Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio 2010/31/UE del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell'edilizia (rifusione).
- Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio 2018/844/UE del 30 maggio 2018 che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica.
- Drusian, F. (2020). *Facciate auto-adattanti: dispositivi tecnologici per un'edilizia autosostenibile*. Tesi di laurea: Università degli Studi di Padova.
- European Commission, Directorate-General for Climate Action. (2019). *Going climate neutral by 2050: a strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate-neutral EU economy*. Publications Office. Disponibile in: <https://data.europa.eu/doi/10.2834/02074>
- Faragalla, A.M.A.; Asadi, S. (2022). Biomimetic Design for Adaptive Building Façades: A Paradigm Shift towards Environmentally Conscious Architecture. *Energies*, 15. <https://doi.org/10.3390/en15155390>
- Fiorito, F., Sauchelli, M., Arroyo, D., Pesenti, M., Imperadori, M., Masera, G., & Ranzi, G. (2016). Shape morphing solar shadings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 863 – 884. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.086>
- Frampton, K. (2008). *Storia dell'architettura moderna*. Bologna: Zanichelli
- Fanger, P. O. (1970). *Thermal comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Copenhagen: Danish technical press.
- Gaspari, J. (2020). *Climate responsive building envelopes. From façade shading systems to adaptive shells*. Milano: Franco Angeli.
- Governing Council of IARC. (2018). *Update on the "Nouveau centre"*, GC/60/11.
- Karanouh, A., Kerber, E. (2015). Innovations in dynamic architecture. The Al-Bahr Towers Design and delivery of complex facades. *Journal of Facade Design and Engineering*, 3, 185-221. Disponibile in: <https://content.iospress.com/articles/journal-of-facade-design-and-engineering/fde0040>
- Li, Y., Kubicki, S., & Guerriero, A. (2019). Review of building energy performance certification schemes towards future improvement. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 113. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109244>
- Loonen, R. C. G. M., Rico-Martinez, J. M., Favoino, F., Brzezicki, M., Menezo, C., La Ferla, G., & Aelenei, L. (2015). *Design for façade adaptability: Towards a unified and systematic characterization*. In 10th Conference on Advanced Building Skins, 1284-1294. Disponibile in: https://www.researchgate.net/publication/279955723_Design_for_façade_adaptability_-_Towards_a_unified_and_systematic_characterization
- Marostica, A. (2019). *Sistemi di facciata, tecniche e tecnologie applicate al building information modeling*. Tesi di laurea: Università degli Studi di Padova.
- Mijović, D. D., Milanović, D., & Savić, J. (2018). *Curtain walls: history and a continuing challenge*. Disponibile in: https://www.researchgate.net/publication/328733163_CURTAIN_WALLS_HISTORY_AND_A_CONTINUING_CHALLENGE
- Navarro, M. (2012). City's law tracking energy use yields some surprise. *The New York Times*. Disponibile in: <https://www.nytimes.com/2012/12/25/science/earth/new-york-citys-effort-to-track-energy-efficiency-yields-some-surprises.html>
- Petriccione, L., Fulchir, F., & Chinellato, F. (2020). Self-adaptive façade systems: experimentation regarding the exploitation of thermal dilation. *Journal of Green Building*, 15, 67-90. <https://doi.org/10.3992/jgb.15.4.67>
- Petriccione, L., Fulchir, F., & Chinellato, F. (2021). Applied innovation: Technological experiments on biomimetic façade systems and solar panels. *TECHNE - Journal of Technology for Architecture and Environment*, 2, 82-89. <https://doi.org/10.13128/techne-10687>
- Petriccione, L. (2021). Slide del corso di *Architettura tecnica*.
- Piano, L. (2010). *La Menil Collection*. Disponibile in: <https://www.fondazioneerenzopiano.org/it/project/menil-collection/#section-documents>
- Piano, L. (2011). *The New York Times*. Disponibile in: <https://www.fondazioneerenzopiano.org/it/project/the-new-york-times-building/#section-documents>
- Premier, A. (2012). *Superfici dinamiche. Le schermature mobili nel progetto di architettura: innovazione tecnologica, architectural design, sostenibilità*. Milano: Franco Angeli.
- Radwan, A. H. (2017). *Smart Facades. From adaptation with climate, changing esthetical values, till digital drawings on buildings envelope*. Disponibile in: https://www.researchgate.net/publication/320934449_

Smart_Facades_From_adaptation_with_climate_changing_esthetical_values_till_digital_drawings_on_buildings_envelope

Rinaldi, A. (2010). *Progettazione ed efficienza energetica*. Santarcangelo di Romagna: Maggioli Editore.

Rossetti, M. (2018). *L'involucro architettonico contemporaneo: tecnologia, funzioni, materiali*. Santarcangelo di Romagna: Maggioli Editore.

Samyn, P., De Coninck, J. (2014) *AGC Glass Building*. Tiel: Lannoo Publisher. Disponibile in: https://samynandpartners.com/17_e-books/AGC-Glass-Building-EN/mobile/index.html#p=1

Scientific Council of IARC. (2022). *Update on the "Nouveau centre" and on resource mobilization*, SC/58/7.

Sinopoli, N. (1981). La normativa tecnica. In M. Zaffagnini (A cura di), *Progettare nel processo edilizio: la realtà come scenario per l'edilizia residenziale*, 71 – 94. Bologna: Edizioni Luigi Parma.

Tabadkani, A., Roetzel, A., Li, H.X., Tsangrassoulis, A. (2021). Design approaches and typologies of adaptive facades: A review. *Automation in Construction*, 121. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103450>

Tatano, V., Rossetti, M. (2012). *Schermature solari. Evoluzione, progettazione e soluzioni tecniche*. Santarcangelo di Romagna: Maggioli Editore.

Trelcat, S., Chariot, C., Troublé, R., & Roulin, D. (2017). Bilame. *ArchiSTORM*, 29, 84-87. Disponibile in: <https://www.artbuild.com/lab/archistorm-artbuild-special-edition>

Tucci, F. (2006). *Involucro ben temperato. Efficienza energetica ed ecologica in architettura attraverso la pelle degli edifici*. Firenze: Alinea Editrice.

Van Hoof, J. (2010). Thermal comfort: Research and practice. *Frontiers in Bioscience*, 15(2), 765-788.

Vasileva, I.L., Nemova, D.V., Vatin N.I., Fediuk R.S., & Karelina M.I. (2022). Climate-Adaptive Façades with an Air Chamber. *Buildings*, 12. <https://doi.org/10.3390/buildings12030366>

Yalaz, E.T., Tavil, A.U., & Celik, O.C. (2018). Lifetime performance evaluation of stick and panel curtain wall systems by full-scale testing. *Construction and Building Materials*, 170,254-271. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.061>

Ýlhan, Y., Aygün, M. (2006). *Constructional classification of continuously and point fixed curtain wall systems*. Disponibile in: <https://www.irbnet.de/daten/iconda/06059012493.pdf>

Zaffagnini, M. (1981). Le alternative nella progettazione tipologica. In M. Zaffagnini (A cura di), *Progettare nel processo edilizio: la realtà come scenario per l'edilizia residenziale*, 121 – 148. Bologna: Edizioni Luigi Parma.

Zhang, T., Tan, Y., Yang, H., & Zhang, X. (2016). The application of air layers in building envelopes: A review. *Applied Energy*, 165, 707-734. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.108>

NORMATIVA

UNI 8289:1981	Edilizia. Esigenze dell'utenza finale. Classificazione.
UNI 8290-1:1981	Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia.
UNI 8290-2:1983	Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Analisi dei requisiti.
UNI 8290-3:1987	Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Analisi degli agenti.
UNI 10838:1999	Edilizia. Terminologia riferita all'utenza, alle prestazioni, al processo edilizio e alla qualità edilizia.
EN ISO 7730:2005	Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria
EN 16798-1:2019	Energy performance of buildings - Ventilation for buildings. Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics - Module M1-6
EN 17037:2018	Daylight in buildings
EN 12464-1:2021	Light and lighting - Lighting of work places. Part 1: Indoor work places
EN 14501:2021	Blinds and shutters - Thermal and visual comfort - Performance characteristics and classification
ISO 18458-2015	Biomimetics - Terminology, concepts and methodology

SITOGRAFIA

<https://www.ahr.co.uk/Al-Bahr-Towers>
<https://www.archdaily.com/644709/head-office-of-agc-glass-europe-samyn-and-partners>
<https://arquitecturaviva.com/works/edificio-del-new-york-times-2>
<https://www.artbuild.com/work/circ-centre-international-de-recherche-sur-le-cancer>
<https://www.arup.com/projects/al-bahr-towers>
<http://www.chaixetmorel.com/fr/cat/3/9/>
<https://www.demathieu-bard.fr/projet/centre-international-de-recherche-sur-le-cancer/>
https://ec.europa.eu/info/index_en
<https://www.domusweb.it/it.html>
<https://faraone.it/prodotti/facciate-e-tetti/tutti-i-modelli-facciate/#1>
<https://www.focchi.it/it/progetti/70-st-mary-axe>
<http://www.fondationlecorbusier.fr/corbuweb/morpheus.aspx?sysId=11&sysLanguage=en-en&sysParentId=11&sysParentName=home&clearQuery=1>
<https://www.fondazionerenzopiano.org/it/>
<http://www.rpbw.com/>
<https://www.ft.com/content/7f70d4f4-d136-45fb-8dac-0376d2715517>
<https://gorproject.ru/en/projects/lakhta-center/>
<https://henninglarsen.com/en/projects/0900-0999/0942-sdu-campus-kolding>
<https://hrs.ch/it/progetti/swisstech-convention-center>
<http://www.jeannouvel.com/en/>
<https://josef-gartner.permasteelisagroup.com/calendar>
<https://www.jswd-architekten.de/projekte/thyssenkrupp-quartier/>
<http://www.lillisystems.com/prodotti/facciata-puntuale>
<https://www.metrabuilding.com/en/products/curtain-walls/untised-construction-line/>
<https://newtecnic.com/lakhta-center-saint-petersburg-russia>
<https://rshp.com/projects/office/channel-4-hq/>
<https://samynandpartners.com/portfolio/head-office-of-agc-glass-europe-5/>
<https://www.som.com/projects/lever-house/>
<https://www.unanime.fr/projets/centre-de-recherche-international-sur-le-cancer>
<https://unfccc.int/>
<https://www.wernersobek.com/projects/thyssenkrupp-headquarters/>
<https://www.wicona.com/it/it/prodotti/facciate-wictec/Montanti-e-Traversi/wictec50a/>

LISTA DELLE FIGURE

Capitolo 1

1.1	Definizione della qualità edilizia nell'approccio esigenziale-prestazionale. Schema funzionale degli elementi suddivisi tra utenti e sistema edilizio.....	10
1.2	Schema delle classi di esigenze definite secondo la norma UNI 8289:1981.....	11
1.3	Ricerca delle condizioni di comfort nell'architettura. Utilizzo del controllo climatico attivo e passivo. Ridisegnato dall'autore. Tratta da: Rinaldi (2010).....	14
1.4	Proporzione di individui termicamente insoddisfatti al variare della temperatura ambientale. La linea di sinistra illustra la probit della percentuale di "insoddisfatti da freddo". La linea di destra mostra la probit della percentuale di "insoddisfatti". Tratta da Fanger (1970).....	17
1.5	Percentuale prevista di insoddisfatti (PPD) come funzione del voto medio previsto (PMV). Tratta da BS EN ISO 7730:2005.....	17
1.6	Grafici dell'intervallo di temperatura ottimale, in funzione dell'abbigliamento e dell'attività per un valore di umidità relativa pari al 50%. Tratta da BS EN ISO 7730:2005.....	18
1.7	Schematizzazione delle emissioni medie di gas serra in Italia. Percentuali dell'incidenza dei vari settori sulle emissioni totali nel 2011. © Ispra.....	24
1.8	Schematizzazione dell'utilizzo dell'energia nell'Unione Europea. © BPIE.....	24
1.9	Rappresentazione spaziale dell'aumento di temperatura previsto per il 2100 negli scenari peggiori e migliori. Tratta da: Collins et al. (2013).....	25
1.10	Effetti dei cambiamenti climatici in Europa. Tratta da: COM (2018)77, finale.....	26
1.11	Sequenza temporale delle direttive europee relative al certificato energetico. Tratta da Li (2019).....	27
1.12	Distribuzione degli edifici in UE per classe di certificazione energetica. Tratta da: Building Performance Institute Europe (2017).....	28

Capitolo 2

2.1	Galerie d'Orléans, Fontain, Parigi (FR), 1829.....	32
2.2	Palm House, Turner e Burton, Londra (GB), 1848. © Steve Cadman.....	32
2.3	Lime Street Station, Turner e Locke, Liverpool (GB), 1850. © Radarsmum67.....	32
2.4	Crystal Palace, Paxton, Londra (GB), 1851.....	33
2.5	Crystal Palace. Foto del 30 Novembre 1936 durante l'incendio.....	33
2.6	Padiglione di vetro, Taut, Colonia (DE), 1914.....	33
2.7	Officine "Fagus", Gropius e Meyer, Alfeld (DE), 1911. © Carsten Janssen.....	34
2.8	Edificio Bauhaus, Gropius, Dessau (DE), 1926. © Alexander Kluge.....	34
2.9	Sedia Wassily, Marcel Breuer, 1925 nell'edificio Bauhaus. © Frans Drewniak.....	34
2.10	Edificio Bauhaus. Dettaglio sistema di apertura del curtain wall. © Alexander Kluge.....	35
2.11	Villa Savoye, Le Corbusier, Poissy (FR), 1931. © Thomas Nemeskeri.....	35
2.12	Villa Savoye. Dettaglio curtain wall al piano terra. © Archigreek.....	35
2.13	Padiglione di Barcellona, Mies van der Rohe, Barcellona (ES), 1929. © Ashley Pomeroy.....	36
2.14	Padiglione di Barcellona. Dettaglio curtain wall. © Naotake Murayama.....	36
2.15	Casa Farnsworth, Mies van der Rohe, Plano (US), 1951. © David Wilson.....	37
2.16	Crown Hall dell'IIT, Mies van der Rohe, Chicago (US), 1956. © Scott Dierdorf.....	37
2.17	Crown Hall. Dettaglio curtain wall. © Ani Od Chai.....	37
2.18	Lever House, Skidmore, Owings e Merrill, New York (US), 1952. © Ezra Stoller/Esto.....	37
2.19	Classificazione dei sistemi di facciata continua in base alla tipologia costruttiva: [A] Montanti e traversi, [B] Cellulare, [C] Fissaggio puntuale, [D] Doppia pelle. Ridisegnato dall'autore. Tratto da: Rossetti (2018).....	39
2.20	Sezione del sistema WICTEC 50.....	40
2.21	Vista assonometrica del sistema WICTEC 50.....	40
2.22	Seagram Building. Vista del prospetto principale. © Ken Ohyama.....	41
2.23	Seagram Building. Vista in dettaglio del sistema di facciata. © Ezra Stoller / Esto.....	41

2.24 Seagram Building. Vista del sistema di facciata al piano terra. Tratta da: https://seagram375park.com/the-building/exterior/	41
2.25 Seagram Building. Disegno costruttivo del sistema di facciata. Tratta da: https://en.wikiarquitectura.com/building/seagram-building/	41
2.26 Seagram Building. Vista della piazza e dell'ingresso Tratta da: http://architecture-history.org/architects/architects/MIES%20VAN%20DER%20ROHE/objects/1958,%20The%20Seagram%20Building,%20New%20York,%20New%20York.html	41
2.27 Seagram Building. Vista dell'edificio con annessa piazza Tratta da: http://architecture-history.org/architects/architects/MIES%20VAN%20DER%20ROHE/objects/1958,%20The%20Seagram%20Building,%20New%20York,%20New%20York.html	41
2.28 Sezione della soluzione strutturale a lastre sfalsate, sistema POLIEDRA SKY FAST 80.....	43
2.29 Sezione della soluzione strutturale a lastre allineate, sistema POLIEDRA SKY FAST 80.....	43
2.30 Vista assonometrica del sistema, POLIEDRA SKY FAST 80.....	43
2.31 Sezione della soluzione meccanica a pressore, sistema POLIEDRA SKY FAST 80.....	44
2.32 Sezione della soluzione meccanica a fermavetro, sistema POLIEDRA SKY FAST 80.....	44
2.33 Vista assonometrica del sistema, POLIEDRA SKY FAST 80.....	44
2.34 70 St. Mary Axe. Vista del prospetto principale e laterale. © Sokari Higgwe.....	45
2.35 70 St. Mary Axe. Vista dello skyline della City di Londra. Tratta da: https://70stma.co.uk/	45
2.36 70 St. Mary Axe. Vista del sistema di facciata curvo dei prospetti Nord e Sud. Tratta da: https://www.agc-yourglass.com/it-IT/casi-di-studio-di-progetti/70-st-mary-axe	45
2.37 70 St. Mary Axe. Vista del 30 St. Mary Axe dall'interno, con dettaglio del sistema cellulare. © Sokari Higgwe.....	45
2.38 70 St. Mary Axe. Disegno assonometrico del sistema di facciata dei prospetti curvi. © Foggo Associates.....	45
2.39 70 St. Mary Axe. Disegno del prospetto Est o Ovest con evidenziata la regolarità del sistema di facciata. © Focchi.....	45
2.40 Prospetto del sistema di fissaggio S.J.S.....	47
2.41 Vista assonometrica del sistema di fissaggio S.J.S. © Lilli Systems.....	47
2.42 Sezione trasversale con montante in acciaio.....	47
2.43 Sezione trasversale con montante in alluminio.....	47
2.44 Sezione trasversale con montante in vetro strutturale.....	47
2.45 Sezione trasversale con sistema di fissaggio a tensostruttura.....	47
2.46 Vista assonometrica del sistema di fissaggio Air system.....	48
2.47 Sezione trasversale sistema di fissaggio Air system.....	48
2.48 Sezione trasversale sistema di fissaggio Quadrifoglio.....	48
2.49 Vista assonometrica del sistema di fissaggio Quadrifoglio.....	48
2.50 Channel 4 Headquarters. Vista interna della facciata sospesa con rappresentate in dettaglio le crociere. © RSHP.....	49
2.51 Channel 4 Headquarters. Esploso assonometrico della crociera ad H. © RSHP.....	49
2.52 Channel 4 Headquarters. Disegno schematico dell'edificio con rappresentati i tre volumi. © RSHP.....	49
2.53 Channel 4 Headquarters. Vista interna della tensostruttura con rappresentazione in dettaglio del sistema di sostegno. © steve_frost.....	49
2.54 Channel 4 Headquarters. Vista complessiva dell'edificio inclusa la piazza antistante. © RSHP.....	49
2.55 Channel 4 Headquarters. Vista dell'ingresso a facciata sospesa. © Matt Brown.....	49
2.56 Classificazione dei sistemi a doppia pelle in base alle modalità di flusso. Tratta da: Zhang et al.(2016). 51	51
2.57 Classificazione dei sistemi a doppia pelle in base alla geometria. Tratta da: Zhang et al. (2016).....	51
2.58 Lakhta Center. Vista della torre durante le fasi di costruzione. © Yatsko Stepan.....	52
2.59 Lakhta Center. Vista della torre e dell'edificio multifunzionale durante un evento nevoso. © Красный..	52
2.60 Lakhta Center. Vista durante la fase di installazione del sistema di facciata interno. © Lakhta Center.....	52
2.61 Lakhta Center. Vista generale della torre e del sito. © Anton Galahov.....	52

2.62 Lakhta Center. Vista aerea della torre. © Viktor Sukharukov.....	52
2.63 Lakhta Center. Vista aerea della torre con dettaglio della guglia. © Alexander Zotov.....	52
2.64 Lakhta Center. Proiezione verticale della torre. © Urban planning Institute of residential and public buildings.....	53
2.65 Lakhta Center. Disegno assonometrico del Lakhta center comprendente la torre, l'edificio multifunzionale e la piazza. © Urban planning Institute of residential and public buildings.....	53
2.66 Lakhta Center. Vista aerea della torre con dettaglio del sistema di facciata. © Anton Galahov.....	53
2.67 Lakhta Center. Prospetto del sistema di facciata: partizione della facciata interna. © Josef Gartner GmbH.....	53
2.68 Lakhta Center. Prospetto del sistema di facciata: partizione della facciata esterna. © Josef Gartner GmbH.....	53
2.69 Lakhta Center. Prospetto del sistema di facciata: dettaglio del sistema della guglia. © Josef Gartner GmbH.....	53
2.70 Lakhta Center. Prospetto del sistema di facciata: partizione della facciata della buffer zone. © Josef Gartner GmbH.....	53
2.71 Villa Baizeau, Le Corbusier, Cartagine (TN), 1931. Prospetto Est, Primo progetto. © FLC/ADAGP.....	54
2.72 Villa Baizeau, Le Corbusier, Cartagine (TN), 1931. Prospetto Nord, Primo progetto. © FLC/ADAGP.....	54
2.73 Villa Baizeau, Le Corbusier, Cartagine (TN), 1931. Prospetto Nord, Secondo progetto. © FLC/ADAGP.....	54
2.74 Ministero dell'Educazione e della sanità, Costa, Rio de Janeiro (BR), 1945. © Oscar Liberal.....	55
2.75 Ministero dell'Educazione. Dettaglio brise soleil.....	55
2.76 Unité d'habitation, Le Corbusier, Marsiglia (FR), 1952. © FLC/ADAGP.....	55
2.77 Villa Shodhan, Le Corbusier, Ahmedabad (IN), 1956. © FLC/ADAGP.....	56
2.78 Alta Corte, Le Corbusier, Chandigarh (IN), 1955. © FLC/ADAGP.....	56
2.79 Palazzo dell'Assemblea, Le Corbusier Chandigarh (IN), 1962. © FLC/ADAGP.....	56
2.80 Melin Collection, Piano & Fitzgerald, Huston (US), 1986. © Piano & Fitzgerald, architects.....	57
2.81 Disegno del sistema schermante "foglia". © Fondazione Renzo Piano.....	57
2.82 Renzo Piano building workshop, RPBW, Genova (IT), 1991. © RCS Mediagroup.....	57
2.83 The New York Times Building, RPBW, New York (US), 2007. © THE.ARCH.....	58
2.84 The New York Times Building, RPBW, New York (US), 2007. © Michel Denancé.....	58
2.85 The New York Times Building. Sezione della facciata. © Renzo Piano Building Workshop.....	58
2.86 Arab World Insitute, Jean Nouvel, Parigi (FR), 1987. © Architecturestudio.....	59
2.87 Arab World Insitute. Dettaglio facciata. © Adrian Lo.....	59
2.88 Agbar tower, Jean Nouvel, Barcellona (ES), 2004. © Rockwool A/L.....	59
2.89 Agbar tower. Dettaglio facciata. © Philippe Ruault.....	59
2.90 Kimbell Art Museum, RPBW, Fort Worth (US), 2013. © RPBW - Renzo Piano Building Workshop.....	60
2.91 Kimbell Art Museum. Dettaglio della copertura. © Robert Polidori.....	60
2.92 Kimbell Art Museum. Disegno del sistema di copertura. © Renzo Piano.....	60
2.93 Swisstech Convention Center, Richter Dahl Rocha, Losanna (CH), 2014. © Fernando Guerra.....	61
2.94 Swisstech Convention Center. Vista interna degli elementi schermanti. © Fernando Guerra.....	61
2.95 Kiefer Technic Showroom, Ernst Giselbrecht, Bad Gleichenberg (AT), 2007. © Paul Ott.....	61
2.96 Kiefer Technic Showroom. Dettaglio dell'involucro. © Paul Ott.....	61
2.97 Classificazione dei sistemi di schermatura adattivi.....	62
2.98 Tipologie di vetri a trasmissione variabile. Ridisegnato dall'autore. Tratta da: Daqiqeh et al. (2017).....	63
2.99 Comportamento estivo dei dispositivi di schermatura dinamici.....	66
2.100 Comportamento invernale dei dispositivi di schermatura dinamici.....	67
2.101 Panoramica dei parametri di caratterizzazione dell'adattabilità dell'involucro. Tratto da Aeleni (2016).....	69

Capitolo 3

3.1 ThyssenKrupp Quarter. Vista del Prospetto Sud. © Tuxyso.....	72
3.2 ThyssenKrupp Quarter. Vista interna delle facciate panoramiche dall'atrio centrale. © Michael Wolff...	72
3.3 ThyssenKrupp Quarter. Vista generale dell'edificio e della piazza antistante. © Christian Richters.....	72
3.4 ThyssenKrupp Quarter. Disegno rappresentante le diverse angolazioni dei pannelli di schermatura in funzione del posizionamento del sole durante l'arco della giornata. Tratta da: Aalenei (2018).....	72
3.5 ThyssenKrupp Quarter. Planimetria generale.....	72
3.6 ThyssenKrupp Quarter. Vista del Prospetto Sud con il sistema di schermatura solare adattivo. © Gunter Wett.....	73
3.7 ThyssenKrupp Quarter. Dettaglio delle lamelle del sistema di schermatura solare. © Gunter Wett.....	73
3.8 ThyssenKrupp Quarter. Sezione verticale dell'involucro architettonico.....	73
3.9 ThyssenKrupp Quarter. Sezione orizzontale dell'involucro architettonico.....	73
3.10 Al Bahar Towers. Vista generale delle torri e del contesto. © Christian Richters.....	74
3.11 Al Bahar Towers. Vista generale dell'involucro architettonico. © Christian Richters.....	74
3.12 Al Bahar Towers. Vista generale dell'involucro con elementi in configurazione chiusa e aperta. © Aedas.....	74
3.13 Al Bahar Towers. Vista del sistema di schermatura solare dinamico. © Aedas.....	74
3.14 Al Bahar Towers. Vista interna del sistema di schermatura solare dinamico. © Christian Richters.....	74
3.15 Al Bahar Towers. Vista in dettaglio del reticolo poligonale. © Aedas.....	75
3.16 Al Bahar Towers. Vista in dettaglio dell'elemento schermante. © Arup.....	75
3.17 Al Bahar Towers. Disegno dei diversi strati che compongono l'involucro architettonico. © AHR Group	75
3.18 Al Bahar Towers. Disegno dell'elemento schermante nelle tre diverse configurazioni. © Aedas.....	75
3.19 Al Bahar Towers. Dettaglio costruttivo dell'elemento schermante. Tratta da: Karanouh et al. (2015)....	75
3.20 Head office of AGC Glass Europe. Vista generale dell'involucro architettonico. © Jean Michel Byl.....	76
3.21 Head office of AGC Glass Europe. Vista interna del sistema a doppia pelle. © Jean Michel Byl.....	76
3.22 Head office of AGC Glass Europe. Vista generale dell'involucro architettonico. © Marie Françoise.....	76
3.23 Head office of AGC Glass Europe. Vista dal sistema di terrazze a Est. © Marie Françoise.....	76
3.24 Head office of AGC Glass Europe. Vista generale dell'edificio. © Marie Françoise.....	76
3.25 Head office of AGC Glass Europe. Disegno del sistema di schermatura orizzontale. © Philippe Smyrn and Partners.....	77
3.26 Head office of AGC Glass Europe. Disegno del sistema di schermatura verticale. © Philippe Smyrn and Partners.....	77
3.27 Head office of AGC Glass Europe. Vista dall'interno del sistema in configurazione aperta © Marie Françoise.....	77
3.28 Head office of AGC Glass Europe. Vista dall'interno del sistema in configurazione chiusa © Marie Françoise.....	77
3.29 Head office of AGC Glass Europe. Vista generale dell'edificio. © Marie Françoise.....	77
3.30 Campus Kolding. Vista generale dell'edificio e del contesto ambientale circostante. © Hufton + Crow..	78
3.31 Campus Kolding. Vista generale dell'involucro architettonico con i pannelli in configurazione aperta. © Jens Lindhe.....	78
3.32 Campus Kolding. Vista dell'involucro architettonico con i pannelli in configurazione aperta. © Hufton + Crow.....	78
3.33 Campus Kolding. Vista generale dell'edificio e del fiume Kolding. © Martin Schurbert.....	78
3.34 Campus Kolding. Vista in dettaglio del sistema di schermatura con i pannelli in configurazione intermedia. © Jens Lindhe.....	79
3.35 Campus Kolding. Vista in dettaglio del sistema di schermatura con i pannelli in diverse configurazioni. © Hufton + Crow.....	79
3.36 Campus Kolding. Disegno costruttivo del sistema a doppia pelle.....	79

3.37	Campus Kolding. Disegno del Prospetto esterno.....	79
3.38	Diagramma solare polare degli edifici caso di studio: [A] Thyssenkrupp Quarter, [B] Al Bahar Towers, [C] Head office of AGC Glass Europe., [D] Campus Kolding. © SunEarthTools.....	81
3.39	Diagramma sugli approcci biomimetici e sul flusso di analisi per lo sviluppo di innovazioni in ambito biomimetico. Tratta da: BS ISO 18458:2015.....	82
3.40	Schema di funzionamento del sistema WM per l'orientamento di elementi schermanti. Tratta da: Petriccione et al. (2021).....	84
3.41	Sezione verticale del sistema WM in configurazione di massima apertura. Tratta da: Petriccione et al. (2020).....	84
3.42	Sezione verticale del sistema WM nella facciata dell'edificio. Tratta da: Petriccione et al. (2020).....	84
3.43	Schema geometrico delle posizioni di orientamento delle lamelle. Tratta da: Petriccione et al. (2021)..	85
3.44	Esempio di sistema dinamico di schermatura auto-adattivo integrato nella facciata. Tratta da: Petriccione et al. (2020).....	85
3.45	Grafico della retta interpolatrice tra la temperatura esterna e l'inclinazione ottimale delle lamelle. Tratta da: Petriccione et al. (2020).....	85
3.46	Schema geometrico di funzionamento del meccanismo di inclinazione delle lamelle. Tratta da: Petriccione et al. (2020).....	85
3.47	Sistema Pho'liage in configurazione naturale di chiusura. Tratta da: ArtBuild (2019).....	86
3.48	Sistema Pho'liage in configurazione di apertura. Tratta da: ArtBuild (2019).....	86
3.49	Movimento dei petali del sistema Pho'liage. Tratta da: Trelcat et al. (2017).....	86
3.50	Schema dei materiali del sistema Pho'liage in configurazione di chiusura. Tratta da: ArtBuild (2019)..	87
3.51	Schema dei materiali del sistema Pho'liage in configurazione di apertura. Tratta da: ArtBuild (2019)..	87
3.52	Rappresentazione delle configurazioni del sistema Pho'liage installato in facciata. Tratta da: Trelcat et al. (2017).....	87
3.53	IARC Headquarters. Rendering generale dell'edificio e dell'inserimento nel contesto. © Unanime Architectes.....	88
3.54	IARC Headquarters. Rendering dell'atrio centrale. © Unanime Architectes.....	88
3.55	IARC Headquarters. Rendering degli spazi collettivi al piano terra. © Unanime Architectes.....	88
3.56	IARC Headquarters. Rappresentazione schematica del prototipo Pho'liage istallato nell'atrio centrale. Tratta da: https://www.iarc.who.int/about-iarc-newbuilding/	88
3.57	IARC Headquarters. Rappresentazione schematica del funzionamento giornaliero dei vetri termocromatici. Tratta da: https://www.iarc.who.int/about-iarc-newbuilding/	88
3.58	IARC Headquarters. Rappresentazione schematica del funzionamento notturno dei vetri termocromatici. Tratta da: https://www.iarc.who.int/about-iarc-newbuilding/	88
3.59	IARC Headquarters. Rendering dell'ingresso dell'edificio. © Unanime Architectes.....	89
3.60	IARC Headquarters. Rendering generale dell'edificio con l'illuminazione notturna. © Unanime Architectes.....	89
3.61	IARC Headquarters. Rendering delle aree relax e delle facciate continue panoramiche. © Unanime Architectes.....	89
3.62	IARC Headquarters. Rappresentazione dell'atrio centrale e del sistema Pho'liage istallato. ©ArtBuild..	89
3.63	Foto dei lavori durante la costruzione dell'IARC Headquarters: [A]: Vista del sistema interno a doppia pelle dell'involucro esterno, [B]: Vista dei vetri termocromatici dell'involucro esterno, [C]: Vista dell'involucro esterno, [D]: Vista del rivestimento interno dell'atrio centrale, [E]: Vista dell sistema portante dell'atrio centrale. A,B,C © Google D,E ©SC58/7.....	90

LISTA DELLE TABELLE

Capitolo 1

1.1	Classificazione dei requisiti tecnologici e relative definizioni. Tratta da: UNI 8290-2:1983.....	15
1.2	Scala ASHRAE psico-fisica a sette punti.....	16
1.3	Intervalli di temperatura operativa per la stagione estiva ed invernale, in funzione della tipologia di edificio e della categoria. Tratta da BS EN ISO 7730:2005.....	19
1.4	Valori minimi e massimi di temperatura operativa per ambienti con ventilazione meccanica, in funzione della tipologia di edificio. Tratto da BS UNI EN 16798-1:2019.....	20
1.5	Livello di illuminamento minimo in funzione dell'attività svolta. Tratta da: EN 16798-1:2019.....	22

Capitolo 3

3.1	Analisi comparativa delle soluzioni innovative per schermature solari adattive.....	80
-----	---	----