



**UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI TRIESTE**



**Carlo Antonio Stival**  
via A. Valerio 6/1  
34127 Trieste  
+390405583489  
cstival@units.it

**ARGOMENTO**

**16**

**22 MARZO 2023**

**Utilizzo passivo di fonti rinnovabili  
per i servizi energetici dell'edificio**

**Illuminazione**

---

**A. A. 2022-2023**

Laboratorio di **Costruzione dell'Architettura**

Corso di **Tecnologie e soluzioni edilizie**

**per la sostenibilità ambientale**

# Classificazione delle esigenze: URR

classe	esigenze	requisiti	
<b>URR.</b> Uso razionale delle risorse	Utilizzo razionale dei materiali da costruzione	URR.1.1	Utilizzo di materiali, elementi e componenti riciclati
		URR.1.2	Utilizzo di materiali, elementi e componenti aventi potenziale di riciclabilità
		URR.1.3	Utilizzo di tecniche costruttive per il disassemblaggio a fine vita
		URR.1.4	Utilizzo di materiali, elementi e componenti caratterizzati da un'elevata durabilità
	Utilizzo razionale delle risorse derivanti da scarti e rifiuti	URR.2.1	Raccolta differenziata dei rifiuti solidi urbani
	Utilizzo razionale delle risorse idriche	URR.3.1	Riduzione del consumo di acqua potabile
		URR.3.2	Recupero, per usi compatibili, delle acque meteoriche
	Utilizzo razionale delle risorse climatiche ed energetiche Salvaguardia dei sistemi naturalistici e paesaggistici	URR.4.1	Utilizzo passivo di fonti rinnovabili per il riscaldamento
		URR.4.2	Utilizzo passivo di fonti rinnovabili per il raffrescamento e la ventilazione igienico – sanitaria
		URR.4.3	Utilizzo passivo di fonti rinnovabili per l'illuminazione
		URR.4.4	Isolamento termico
		URR.4.5	Inerzia termica per la climatizzazione
URR.4.6		Riduzione del fabbisogno d'energia primaria e sostituzione di fonti energetiche da idrocarburi con fonti rinnovabili	

# 16.1

---

## **Strategie di illuminazione naturale**

# Illuminazione naturale

La condizione di **comfort visivo** negli ambienti interni è ottenibile mediante il corretto impiego della luce naturale, tenendo conto degli **effetti** che essa produce **sull'utenza** nelle sue forme diretta e diffusa. È possibile individuare alcuni fattori di benessere visivo:

- **prestazione visiva**, ossia la qualità e l'accuratezza richieste per lo svolgimento di una determinata attività, o compito visivo;
- **gradevolezza** dell'ambiente, in riferimento alla sensazione generale percepita dall'utenza all'interno di un locale, in dipendenza dalle caratteristiche dello spazio e dalla qualità dell'illuminazione fornita.

## OBIETTIVI DELLA PROGETTAZIONE DELL'ILLUMINAZIONE DEGLI AMBIENTI

ILLUMINAMENTO

RIDUZIONE IMPIEGO  
ILLUMINAZIONE ARTIFICIALE

RIDUZIONE EFFETTI DI  
DISTURBO

RESA CROMATICA  
DEL COLORE

# Valutazione dell'illuminazione naturale

La determinazione dei livelli di illuminazione minimi per gli organismi edilizi residenziali, in particolare per gli spazi primari, è tutt'ora affidata al **Decreto Ministeriale 5 luglio 1975**.

All'articolo 5 è stabilito che nei locali di abitazione, ad eccezione di quelli destinati a servizi igienici, disimpegni, corridoi, vani scale, ripostigli (fascia funzionale secondaria), **il valore minimo per il fattore medio di luce diurna sia fissato al 2%, e comunque si impone che l'area della superficie finestrata apribile non sia comunque inferiore a 1/8 della superficie utile del pavimento**; la legge fa dunque esplicito riferimento al cosiddetto **rapporto aeroilluminante**, nel quale a numeratore compare la superficie apribile (associabile alla ventilazione) e non la superficie trasparente.

È opportuno evidenziare che non tutte le norme che disciplinano l'edilizia residenziale (ad esempio i Regolamenti Edilizi) richiamano la prima condizione, relativa al fattore medio di luce diurna, limitandosi ad introdurre la seconda sul rapporto aeroilluminante.

Destinazioni d'uso		FLD <sub>M,MIN</sub> [%]
Residenze	spazi primari	2
	spazi accessori	-
Ospedali	degenze; diagnostica; laboratori	3
	palestre; refettori	2
	uffici; spazi di distribuzione	1
Scuole	ambienti ad uso didattico	3
	palestre; refettori	2
	uffici; spazi di distribuzione	1

# Valutazione dell'illuminazione naturale

La Circ. M. LL. PP. N. 3151/1967 definisce il Fattore Medio di Luce Diurna FLDM secondo l'espressione:

$$FLD_M = \frac{A_g \cdot \tau \cdot \varepsilon \cdot \psi}{S_{TOT} \cdot (1 - \rho_M)} [\%]$$

in cui compaiono:

- la sola **superficie trasparente** della chiusura  $A_g$ ;
- la **trasmissione luminosa**  $\tau$  del vetro;
- il **fattore finestra**  $\varepsilon$  relativo alla porzione di volta celeste visibile dalla finestra (effetto delle ostruzioni);
- il **fattore**  $\psi$  che tiene conto **dell'arretramento della superficie trasparente** rispetto al filo esterno della chiusura opaca;
- l'area totale  $S_{TOT}$  delle **superfici interne** che delimitano il volume del locale;
- il **coefficiente medio pesato** di **riflessione**  $\rho_M$  delle superfici interne.

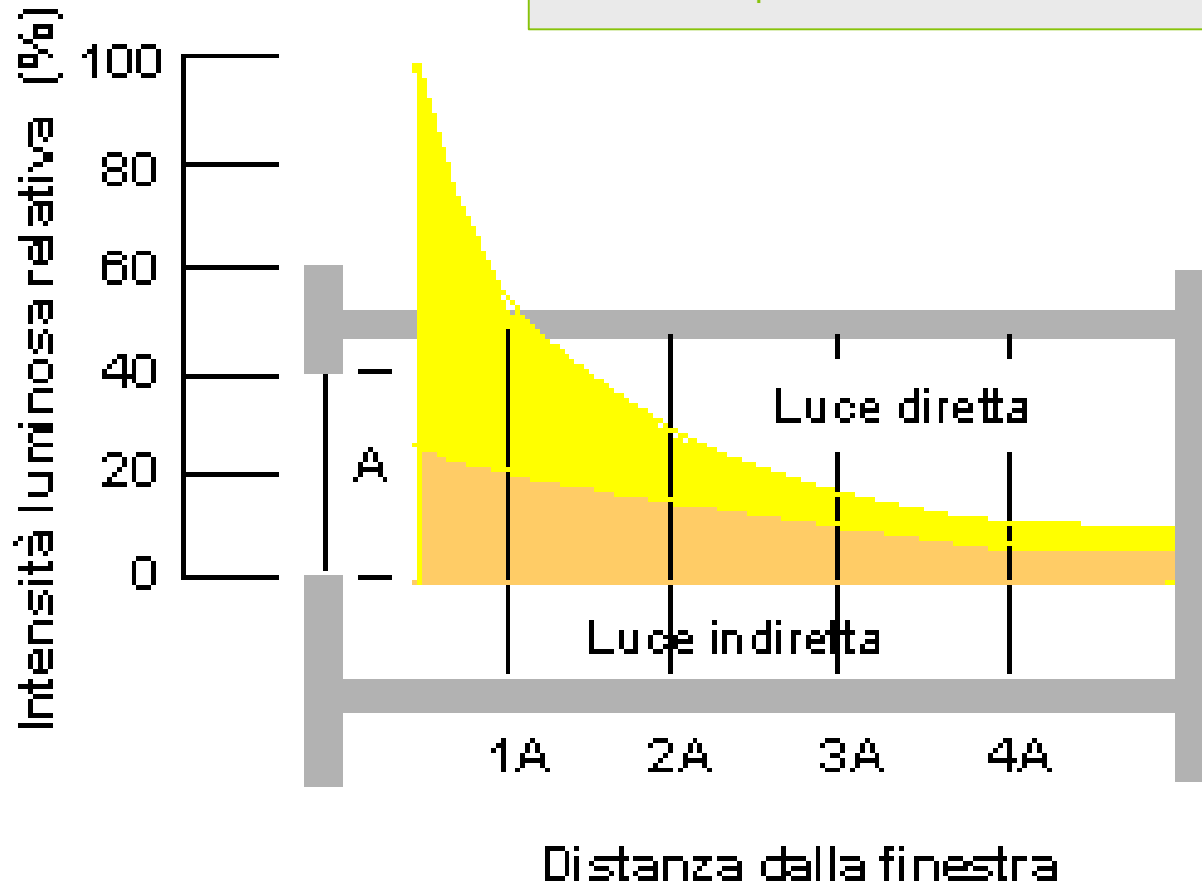
Altri decreti stabiliscono i valori minimi del fattore medio di luce diurna da garantire per edifici a destinazione d'uso diversa da quella residenziale. Si citano in merito:

- la Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici n. 13011/1974, che stabilisce alcuni requisiti per gli organismi edilizi ospedalieri;
- il Decreto Ministeriale 18/12/1975 per l'edilizia scolastica.

Il  $FLD_M$  è una grandezza deputata alla valutazione della **qualità dell'illuminazione naturale** in un punto dell'ambiente confinato e **diminuisce all'aumentare della distanza dalla finestra**; indica sostanzialmente il rapporto intercorrente tra l'illuminamento  $E_i$  nel punto e quello che si manifesta nello stesso istante su un piano orizzontale  $E_e$  posto all'esterno, illuminato dalla volta celeste in assenza di ostruzioni.

# Valutazione dell'illuminazione naturale

Il Fattore di Luce Diurna FLD varia in ogni punto dell'ambiente e diminuisce esponenzialmente all'aumentare della distanza dalla finestra.



# Valutazione dell'illuminazione naturale

Il  $FLD_M$  si riferisce ad un **piano** che si trova a **0,85 ml** di **quota** rispetto al **pavimento (tavolo di lavoro)** e dista circa 1 ml dalla chiusura trasparente.

Il metodo di calcolo che fa riferimento al  $FLD_M$  è applicabile nel caso in cui si verificano entrambe le condizioni seguenti:

- spazi di **forma regolare** con profondità, misurata ortogonalmente al piano della finestra, non superiore a 2,5 volte la distanza tra la quota del pavimento e la quota più alta del componente trasparente dell'infisso;
- **finestra** giacente su un piano **verticale**.

## CALCOLO DI $FLD_M$

1

determinazione di  $\tau$ 

2

calcolo della superficie trasparente A

3

calcolo delle superfici interne S

4

determinazione di  $r_m$ 

5

determinazione di  $\psi$ 

6

determinazione di  $\epsilon$



# Valutazione dell'illuminazione naturale

1	Tipo di vetro	Fattore solare g [-]	Trasmittanza termica U [W/m <sup>2</sup> K]	Trasmissione luminosa $\tau_L$ [-]
	Vetrocamera mm (4+15+4) Intercapedine: aria	0,77	2,80	0,81
	Vetrocamera mm (4+15+4) Intercapedine: argon 85%	0,77	2,60	0,81
	Vetrocamera low-e (1) mm (4+15+4) Intercapedine: aria	0,72	1,40	0,79
	Vetrocamera low-e (1) mm (4+15+4) Intercapedine: argon 85%	0,72	1,20	0,79
	Vetrocamera low-e (2) mm (2,4+15+4) Intercapedine: aria	0,41	1,40	0,71
	Vetrocamera low-e (2) mm (2,4+15+4) Intercapedine: argon 85%	0,41	1,10	0,71
	Vetrocamera a basso fattore solare mm (1,6+15+4) Intercapedine: aria	0,34	2,70	0,39
	Vetrocamera selettivo mm (2,4+15+4) Intercapedine: argon 85%	0,32	1,10	0,50

(1) Il rivestimento basso emissivo è applicato sulla lastra float interna, sulla superficie rivolta verso l'intercapedine.

(2) Il rivestimento basso emissivo è applicato sulla lastra float esterna, sulla superficie rivolta verso l'intercapedine.

# Valutazione dell'illuminazione naturale

2

Si calcola, attraverso relazioni geometriche, la superficie trasparente  $A$  della chiusura trasparente in funzione del telaio installato.

3

Si calcola la somma delle superfici interne  $S$  dell'ambiente da valutare (pavimento, soffitto e pareti interne ed esterne comprese le finestre).

4

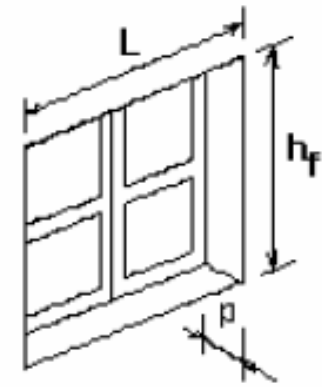
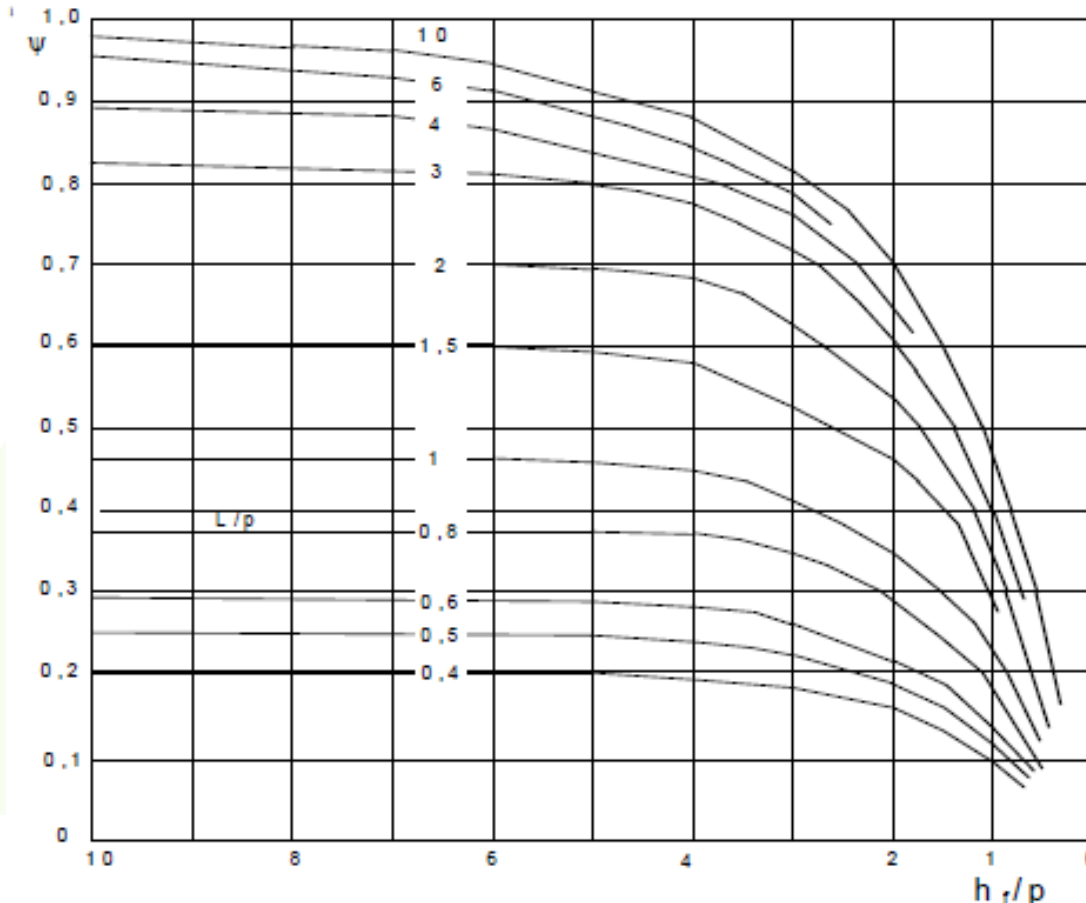
Si calcola il coefficiente di riflessione medio  $r_m$  come media pesata dei coefficienti di riflessione delle singole superfici interne dell'ambiente.

Materiale e natura della superficie	Coefficiente di riflessione luminosa
Intonaco comune bianco (latte di calce o simili) recente o carta	0,8
Intonaco comune o carta di colore molto chiaro (avorio, giallo, grigio)	0,7
Intonaco comune o carta di colore chiaro (grigio perla, avorio, giallo limone, rosa chiaro)	$0,6 \div 0,5$
Intonaco comune o carta di colore medio (verde chiaro, azzurro chiaro, marrone chiaro)	$0,5 \div 0,3$
Intonaco comune o carta di colore scuro (verde oliva, rosso)	$0,3 \div 0,1$
Mattone chiaro	0,4
Mattone scuro, cemento grezzo, legno scuro, pavimenti di tinta scura	0,2
Pavimenti di tinta chiara	$0,6 \div 0,4$
Alluminio	$0,8 \div 0,9$

# Valutazione dell'illuminazione naturale

5

Si determina  $\psi$  mediante normogramma.



ascisse:  $h_f / p$

ordinate:  $\psi$

curve:  $L / p$

# Valutazione dell'illuminazione naturale

6

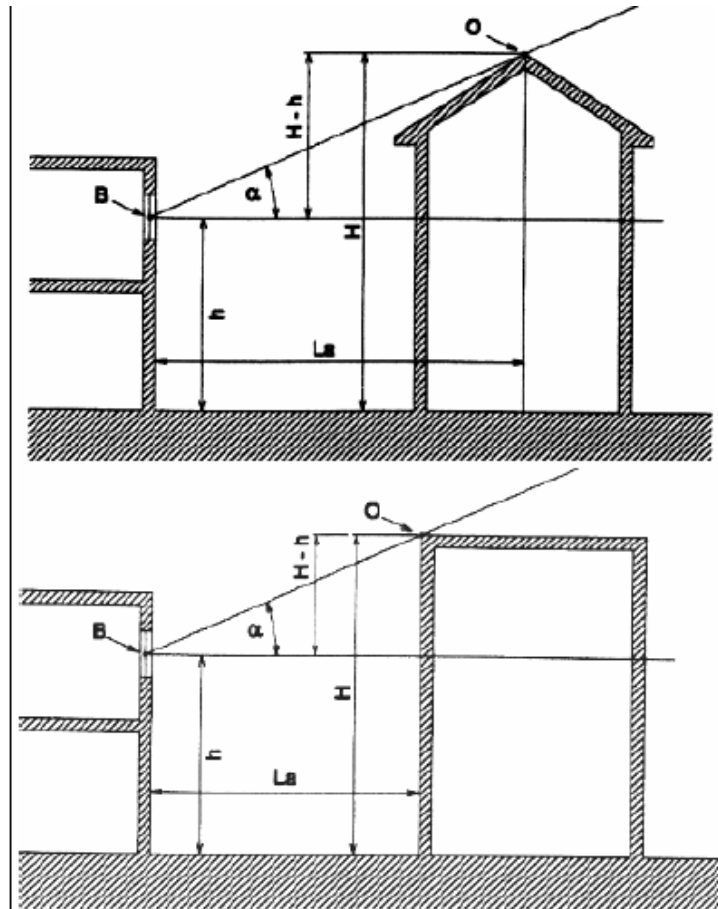
Si determina il fattore finestra  $\varepsilon$  in base alle ostruzioni presenti. Si individuano dapprima le ostruzioni presenti sulla chiusura, siano esse esterne o aggettanti. Nel caso in cui non vi siano ostruzioni,  $\varepsilon = 1$ .

$$\varepsilon = \frac{1 - \sin \alpha}{2}$$

$h$  = altezza dal baricentro B della finestra al piano stradale

$H$  = altezza del fabbricato contrapposto dal piano stradale

$La$  = distanza tra il fabbricato contrapposto (o comunque dell'ostacolo) e la finestra



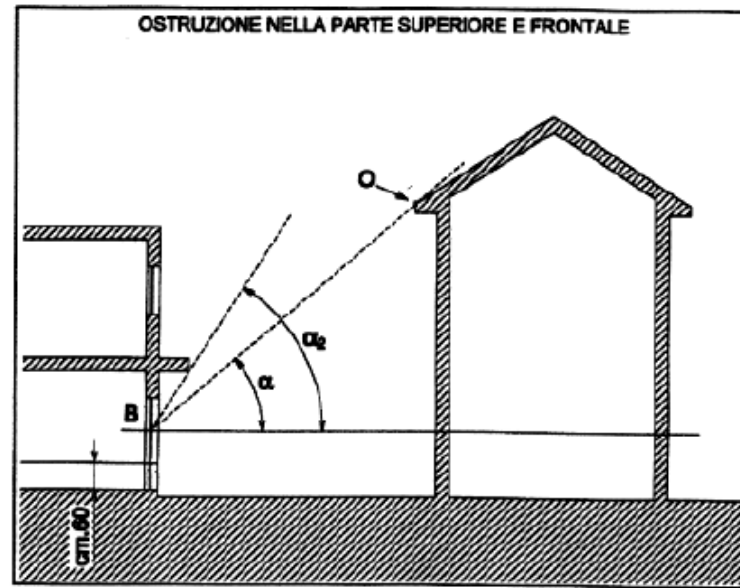
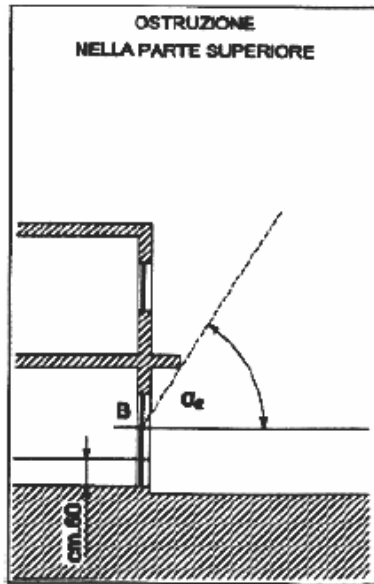
# Valutazione dell'illuminazione naturale

6

Si determina il fattore finestra  $\varepsilon$  in base alle ostruzioni presenti. Si individuano dapprima le ostruzioni presenti sulla chiusura, siano esse esterne o aggettanti. Nel caso in cui non vi siano ostruzioni,  $\varepsilon=1$ .

$$\varepsilon = \frac{\sin \alpha_2}{2}$$

$$\varepsilon = \frac{\sin \alpha_2 - \sin \alpha}{2}$$



# Soluzioni per l'illuminazione naturale

Diversi sono i fattori che influenzano l'efficacia dell'illuminazione naturale, sia in termini di organizzazione spaziale che di soluzioni tecnologiche.

Per l'aspetto spaziale sono significativi:

- il mutuo **rappporto** tra gli **edifici**;
- la **forma volumetrica** complessiva dell'organismo edilizio;
- **l'altezza** e la **profondità** degli **ambienti**;
- **l'orientamento**, la **dimensione** e la **posizione** delle **superfici trasparenti** rispetto alle superfici da illuminare.

La geometria complessiva di un organismo edilizio comporta una conflittualità tra l'esigenza di illuminazione naturale e la necessità di contenere i consumi energetici nell'edificio. Si è visto infatti che il primo e basilare strumento per il controllo delle dispersioni termiche risiede nel conferimento di una forma compatta all'organismo edilizio, in modo da garantire un rapporto di forma S/V basso.

La penetrazione della luce naturale è invece favorita dall'articolazione planivolumetrica dell'edificio, così da disporre di una maggiore superficie per l'inserimento di aperture trasparenti.

Per quanto riguarda la configurazione delle aperture, è possibile individuare tre schemi ricorrenti in merito alla provenienza della luce e, quindi alla disposizione delle aperture.



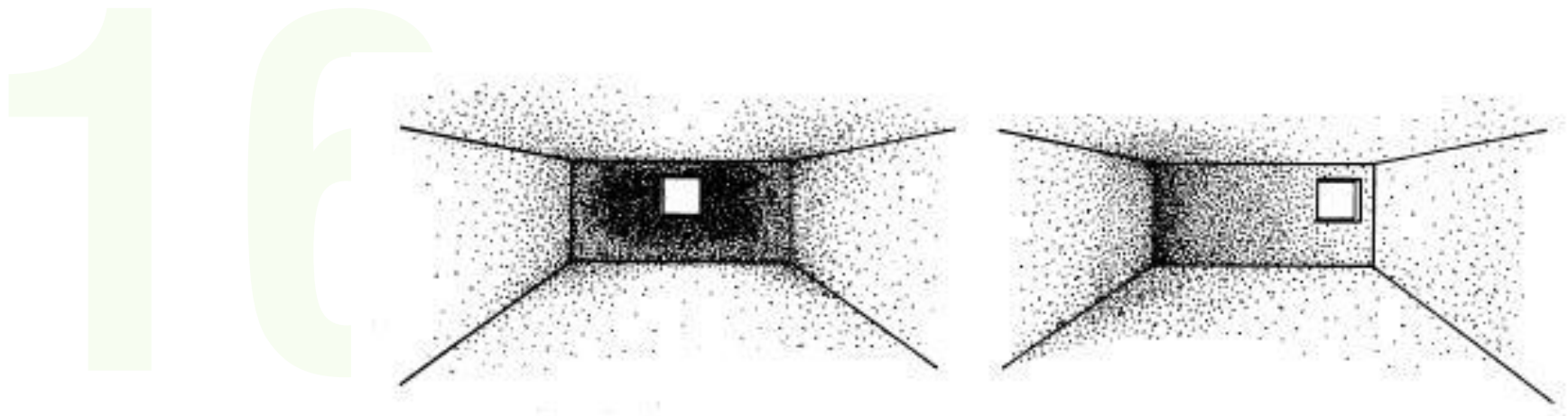
# Sidelighting

Una chiusura trasparente con giacitura verticale trasmette luce prevalentemente **diffusa** e **riflessa** (dal terreno e dalle superfici circostanti), in quanto la radiazione diretta perviene all'ambiente solo quando il sole è visibile attraverso la chiusura stessa.

L'efficacia dell'illuminazione è decisamente **influenzata dall'esposizione** che caratterizza i fronti dell'organismo edilizio.

Le aperture con orientazione **Sud** permettono una maggiore **flessibilità** di **controllo** della trasmittanza luminosa e della trasmittanza termica.

La modulazione degli apporti luminosi diviene più complessa per esposizioni **Est** ed **Ovest**: Il **sole**, in tarda primavera e in estate, **transita** su queste esposizioni con **altezza contenuta**. La modulazione della radiazione deve avvenire prevedendo **schermature mobili**, a sviluppo preferibilmente verticale, oppure ricorrendo a superfici trasparenti diffondenti.



# Toplighting

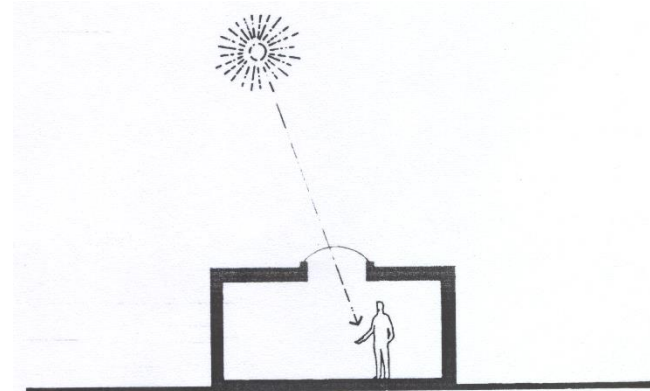
L'illuminazione dall'alto o zenitale (**toplighting**) ben si presta agli **ambienti lavorativi**, in quanto la **luce perviene** primariamente sul **piano orizzontale**. La giacitura delle aperture in sommità consente di superare la criticità delle aperture laterali (profondità di penetrazione della luce) e di fruire di una maggiore disponibilità di luce esterna, dovuta ad una più ampia visuale del cielo.

Sono però immediatamente riscontrabili tre **criticità**:

- l'illuminazione dall'alto è **fruibile solo al livello superiore** dell'edificio, a meno di non ricorrere ad un ambiente di altezza multipla;
- la luce proveniente dall'alto può colpire un operatore prima di raggiungere un piano di lavoro, rendendo **problematica** la **visione** e vanificando la possibilità di ottenere un illuminamento funzionale;
- le aperture zenitali **non consentono** di godere della **vista verso l'esterno**, per cui dovrebbero comunque essere integrate da aperture con giacitura verticale.

Sulla base di queste osservazioni, l'illuminazione zenitale è prevista solo per **sostituire** di una non realizzabile illuminazione laterale; l'illuminazione dall'alto può inoltre rendersi necessaria in ambienti caratterizzati da **notevole altezza**.

Il dimensionamento delle aperture zenitali deve tenere conto delle implicazioni nell'ambito del comfort termico. Le chiusure superiori sono maggiormente **esposte al sole estivo**, generando un **carico termico indesiderato**; queste aperture, poi, sono di solito prive di elementi schermanti esterni.

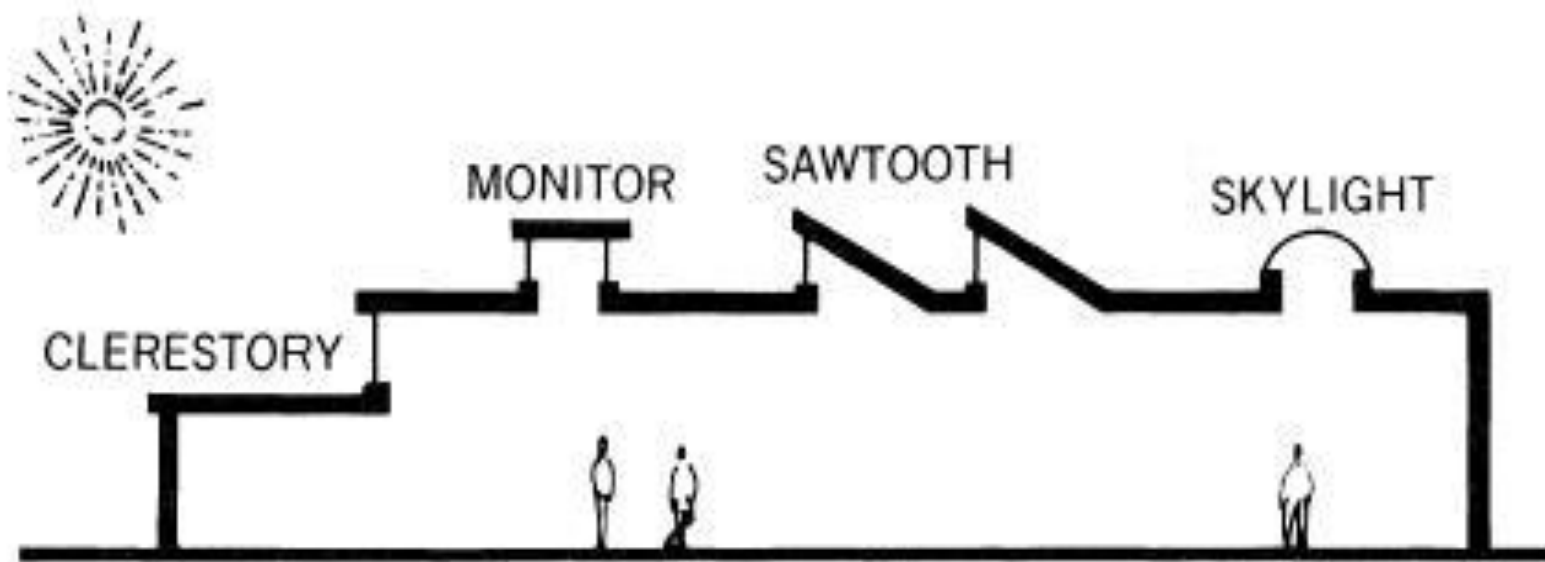




# Toplighting

Risulta quindi opportuno ricorrere a particolari **configurazioni** delle aperture poste in copertura, accomunate dalla **disposizione verticale** dell'elemento trasparente. Queste speciali configurazioni sono assimilabili ad aperture verticali poste nella porzione superiore di una chiusura verticale.

A parità di superficie trasparente, la disposizione geometrica delle aperture può privilegiare la **porzione centrale** del locale da illuminare, o il suo perimetro. La prima disposizione, rispetto alla seconda, comporta una **minore uniformità** di illuminamento nel locale, a un minore costo d'installazione.



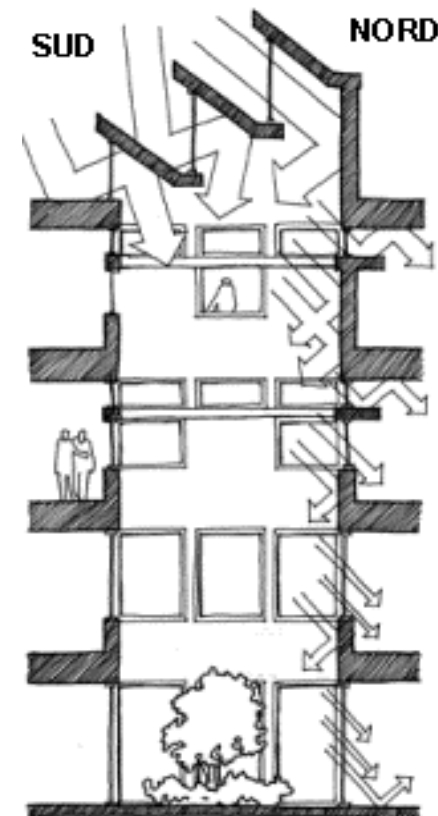
# Corelighting

Il concetto di **corelighting** fa necessariamente riferimento ad uno **spazio interno** che **interseca** e **connette visivamente** tutti i **livelli** di un edificio. Se tale spazio ad altezza multipla è chiuso in sommità da una superficie trasparente, è definito atrio.

Le funzioni assolve da un **atrio** sono molteplici; oltre a garantire l'illuminazione indiretta di spazi non direttamente affacciati verso l'esterno, permette di instaurare **meccanismi** di **ventilazione naturale**, e si configura come **spazio di relazione**.

L'effetto di convogliamento della luce zenitale verso i livelli più bassi si può garantire conferendo all'atrio una sezione a tronco di piramide e, in alternativa o in sinergia, prevedendo **superfici chiare** nei livelli più alti allo scopo di **dirigere la luce verso il basso**; tale soluzione deve però essere resa priva di situazioni di abbagliamento. Si richiamano inoltre le stesse problematiche viste per il concetto di *toplighting* per quanto riguarda il possibile **surriscaldamento estivo**.

È opportuno che le superfici trasparenti poste in sommità siano apribili per consentire l'asportazione, per ventilazione notturna ed effetto camino, del calore accumulatosi durante il giorno.

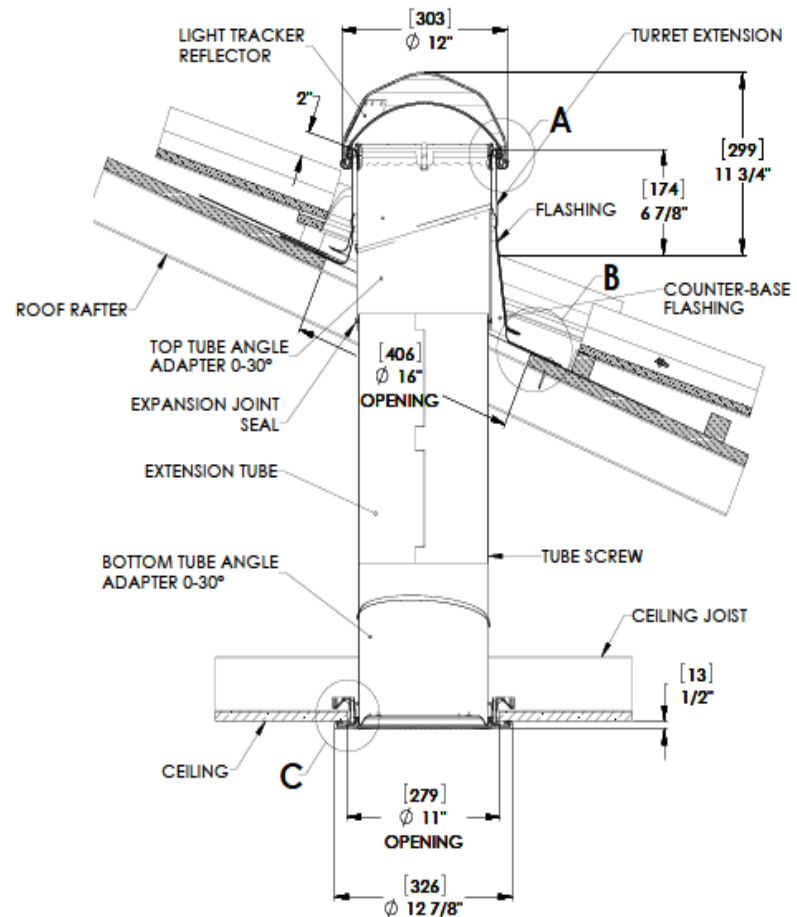


# Convogliamento della luce - lightpipe

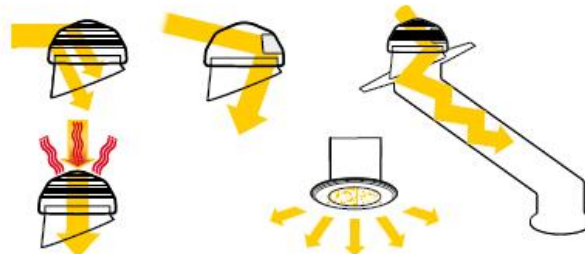
I **condotti luminosi**, detti anche **sistemi anidolici**, consentono la captazione della luce naturale ed il suo convogliamento in ambienti confinati a ridotta illuminazione o non sono dotati di aperture sui fronti.

Un sistema di conduzione della luce solare è solitamente costituito da un dispositivo di norma fisso, detto **eliostato**, che capta la luce grazie ad un insieme di specchi; la luce, attraversando un sistema di trasporto dotato di **superfici altamente riflettenti** (quali argento, alluminio, pellicole microprismatiche o vernici riflettenti), perviene ai locali.

I condotti luminosi sono adatti a fornire l'illuminazione all'interno di **edifici multipiano**, tenendo conto che l'efficienza del sistema dipende dalla configurazione geometrica e **distributiva** dei condotti solari stessi: **l'intensità luminosa trasmessa**, infatti, **diminuisce** in **proporzione** alla **lunghezza** del **condotto**. Il condotto termina con un diffusore applicato al soffitto che traduce la luce nell'ambiente confinato in modo diffuso.



# Convogliamento della luce - lightpipe



Solotube 330 DS



Solotube 750 DS



# 16.2

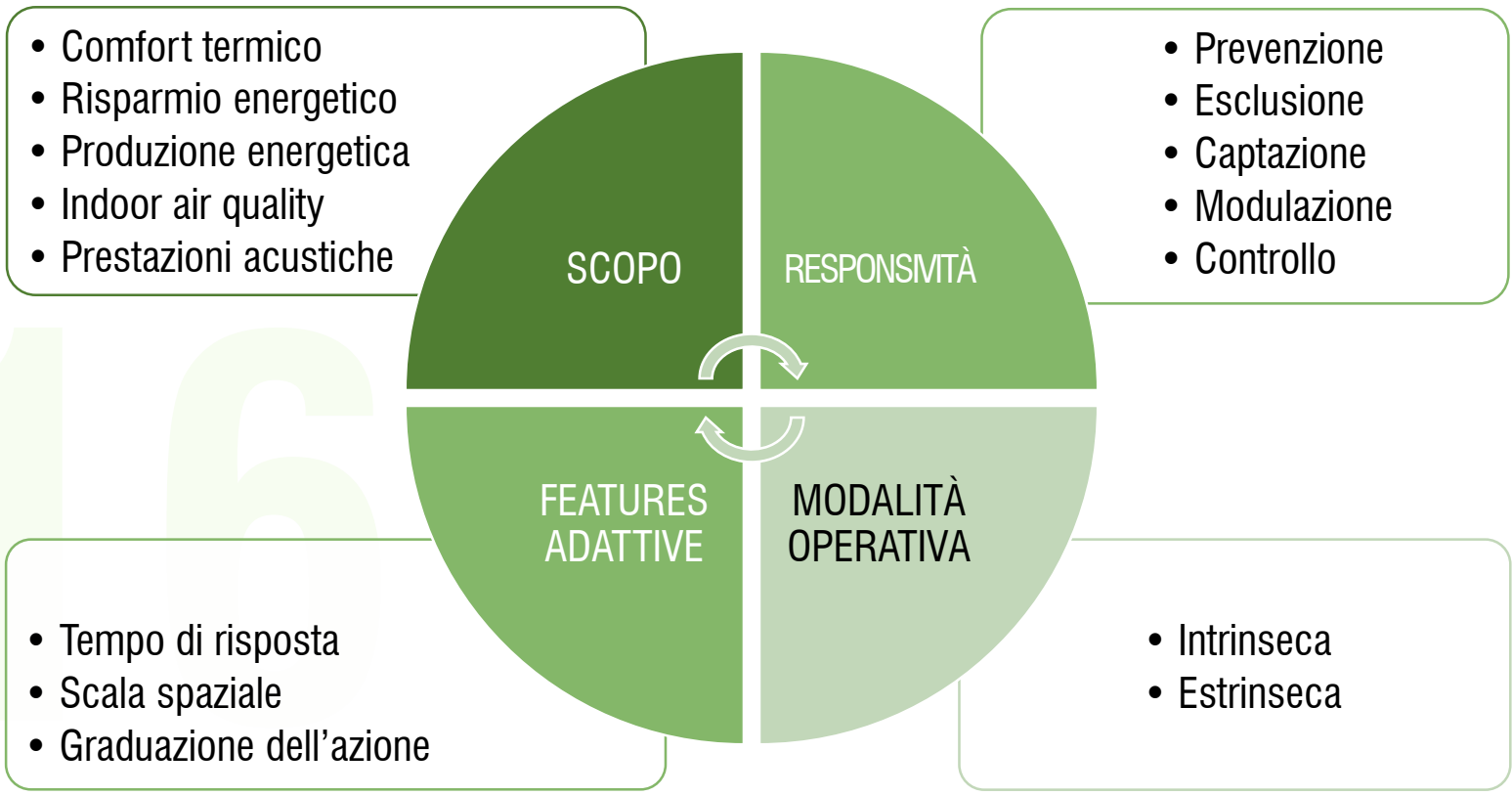
---

**Soluzioni per «smart façade»  
e «adaptive façade»**

# Caratterizzazione delle facciate adattive

Le facciate «tradizionali» hanno carattere **statico** o **quasi-statico**, per cui non possono adattarsi al mutare delle condizioni ambientali, o alle **esigenze contingenti** da parte degli **utenti**.

Da qui le tecnologie delle **facciate adattive**, che possono sovrintendere a diversi scopi afferenti al **comfort indoor** e/o alla **riduzione** dei **consumi energetici**.



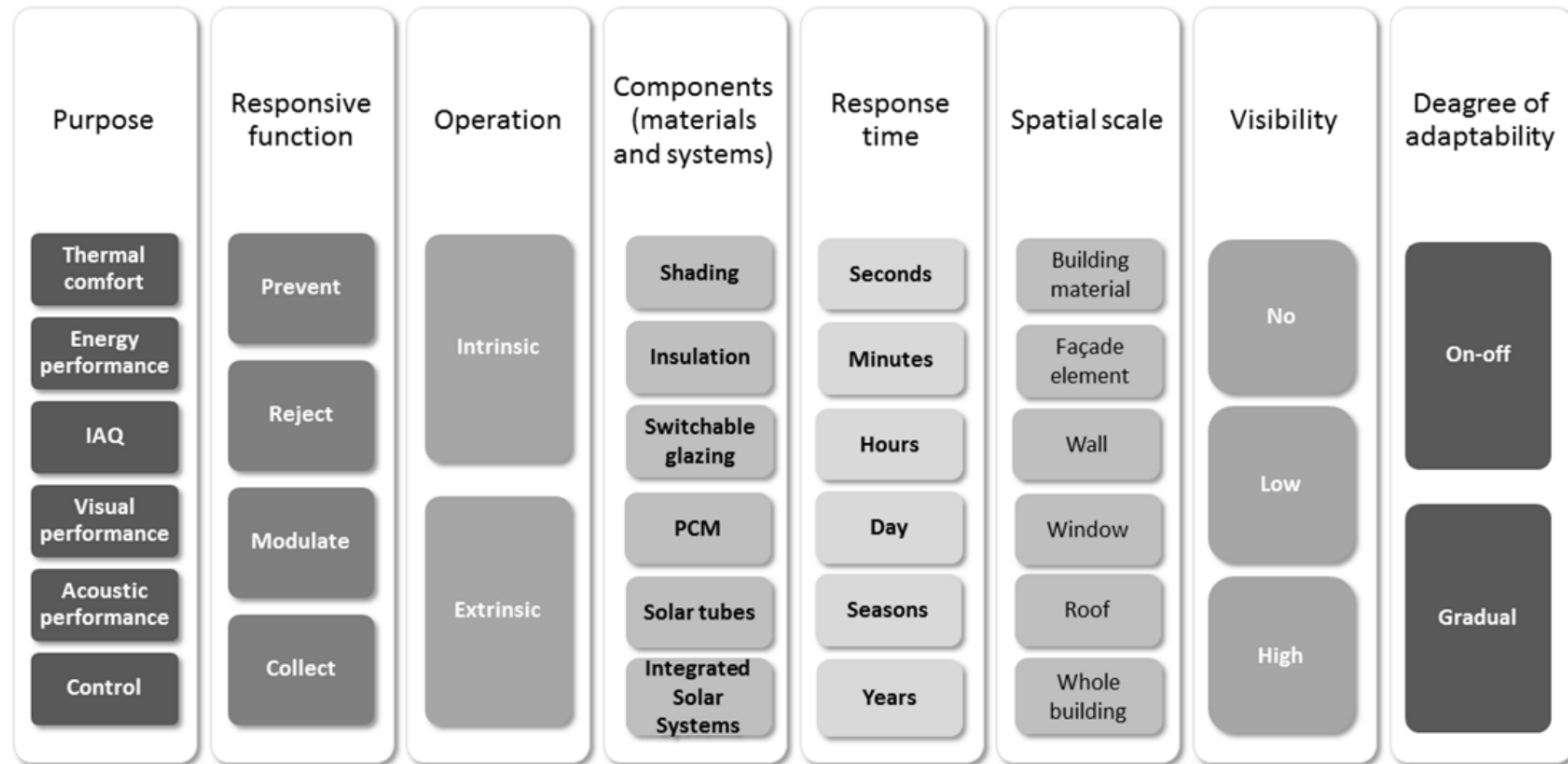
# Caratterizzazione delle facciate adattive

Una facciata **adattabile** al clima (condizioni meteorologiche, cicli di temperatura giornalieri e stagionali) ha la **capacità** di **modificare ciclicamente**, in modo **reversibile**, **alcune** delle sue **funzioni**, **caratteristiche** o **comportamento** nel tempo in risposta al cambiamento dei livelli di prestazione e delle condizioni al contorno variabili, e lo fa con l'obiettivo di migliorare le prestazioni complessive dell'edificio.

Per «**sistema di facciata adattivo**» viene inteso l'intero **blocco** di facciata **assemblato**, comprese le **componenti** che possono essere **preassemblate** negli impianti di produzione come unità prefabbricate o fornite separatamente in loco, progettate per funzionare come **parte integrante** della costruzione.



# Caratterizzazione delle facciate adattive

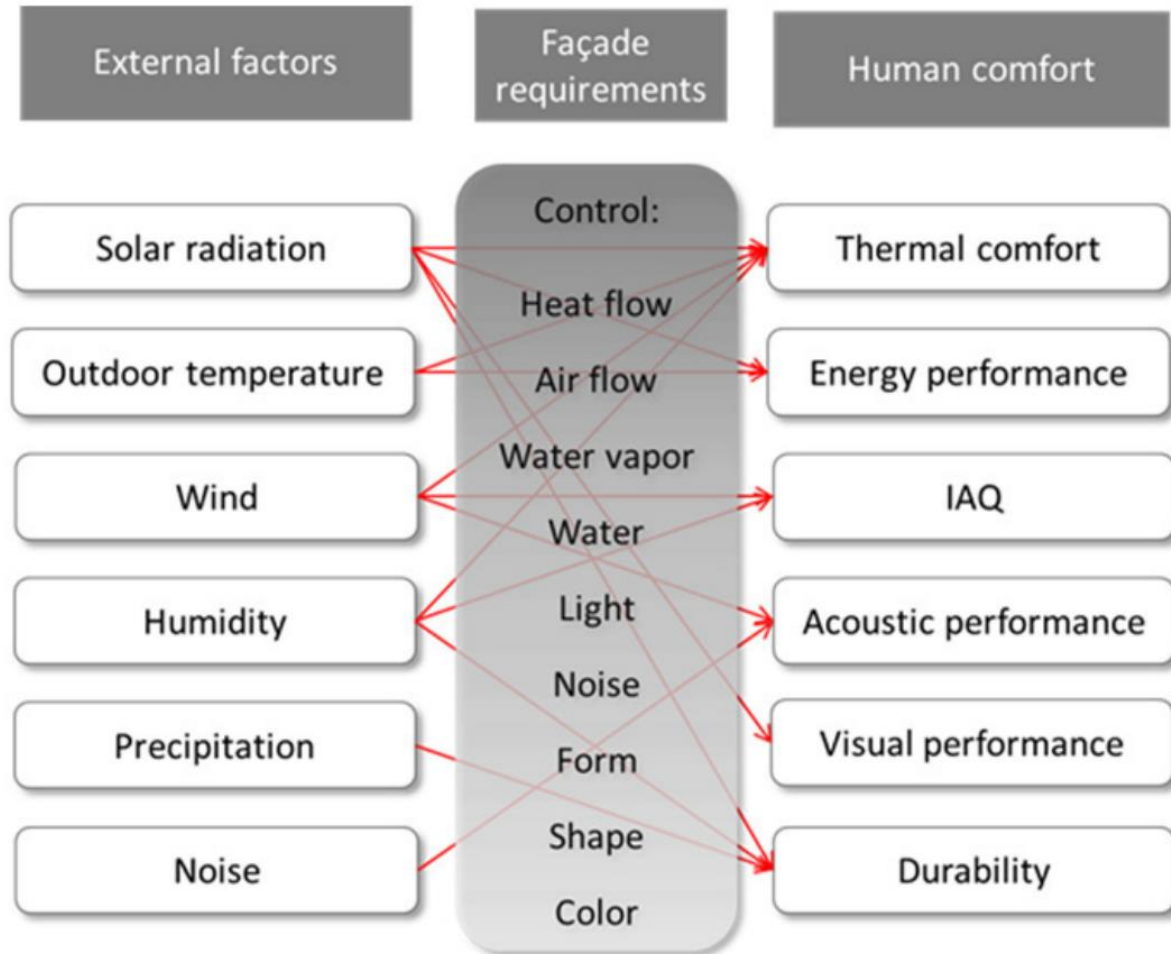


Adaptive Façade: concept, applications, research questions  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216303162>



# Caratterizzazione delle facciate adattive

Adaptive Façade: concept, applications, research questions  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216303162>



16

# Caratterizzazione delle facciate adattive

[https://www.youtube.com/watch?v=FCb6Y2z\\_8zg](https://www.youtube.com/watch?v=FCb6Y2z_8zg)



[http://www.soma-architecture.com/index.php?page=theme\\_pavilion&parent=2#](http://www.soma-architecture.com/index.php?page=theme_pavilion&parent=2#)



<https://en.wikiarquitectura.com/building/sahmri-south-australian-health-and-medical-research-institute/>

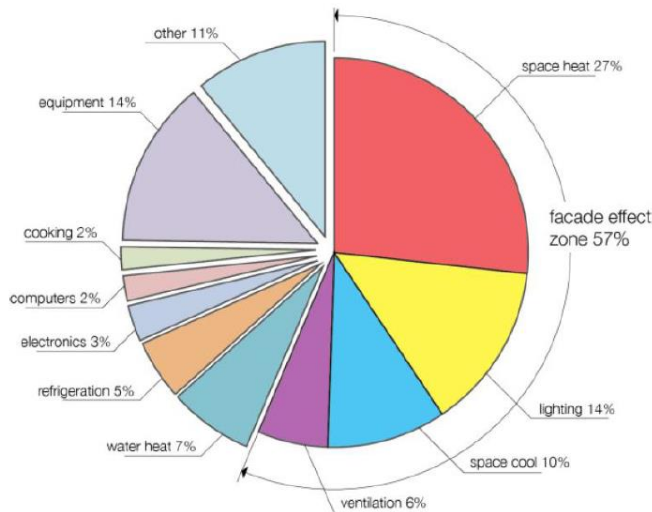


<https://www.youtube.com/watch?v=iCAGlu4vPog>



# Caratterizzazione delle facciate adattive

Principali voci di consumo energetico in un edificio, e voci correlate alle prestazioni di facciata



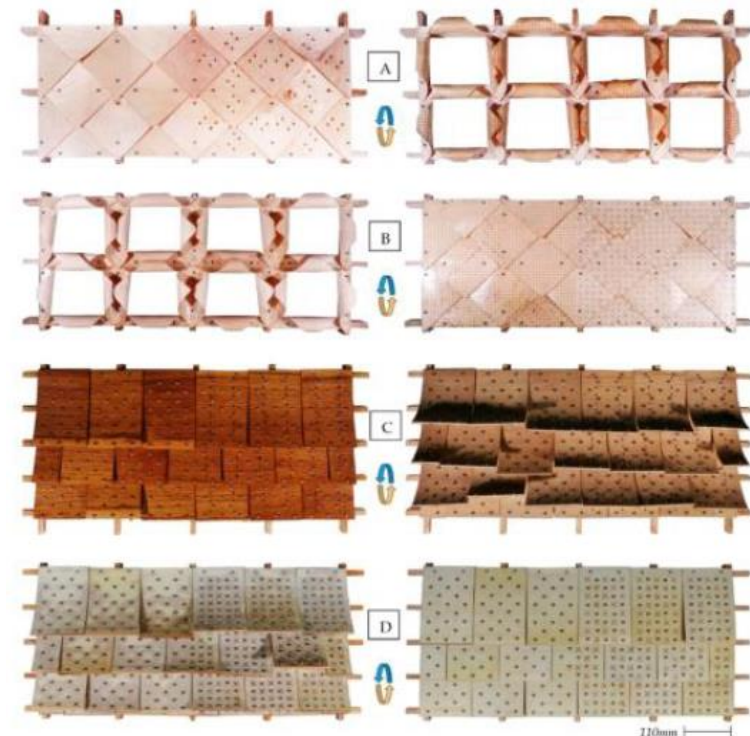
Negli ultimi decenni, la progettazione di **edifici a basso consumo energetico** si è diramata in due direzioni principali: integrazione di tecnologie di tipo **attivo** e strategie di progettazione di tipo **passivo**. La prima si pone come obiettivo il miglioramento del livello di sostenibilità delle costruzioni introducendo dispositivi tecnologici innovativi, capaci di utilizzare fonti di energia rinnovabile oppure di garantire un'efficienza energetica maggiore. Con «**strategie passive**» ci si riferisce alla progettazione di edifici e alla loro forma. Questi parametri ricoprono un ruolo decisivo nell'acquisizione, immagazzinamento e distribuzione di energia da fonti di energia rinnovabile.

# Materiali per facciate adattive

Considerando le caratteristiche delle facciate adattive, particolare attenzione deve essere fornita ai materiali che le compongono, in quanto tali soluzioni risultano **sollecitate** in modo **diversa** rispetto alle facciate tradizionali.

Di difficile valutazione sono le caratteristiche termofisiche e le **prestazioni meccaniche** dei materiali sotto **carichi ciclici** e a lunga durata, come anche i fenomeni dovuti alla **fatica**, il degrado dovuto alle **condizioni ambientali**, le variazioni di temperatura.

Le caratteristiche principali ricercate in tali materiali sono l'abilità di **cambiare forma** e **prestazioni** in funzione di **forzanti esterne** come sforzi meccanici, variazione di temperatura e di umidità, irraggiamento solare.

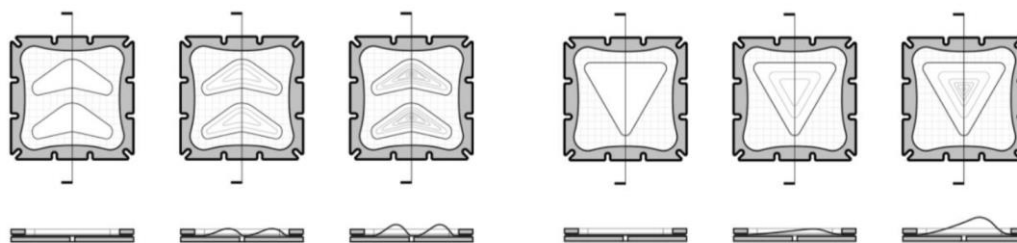
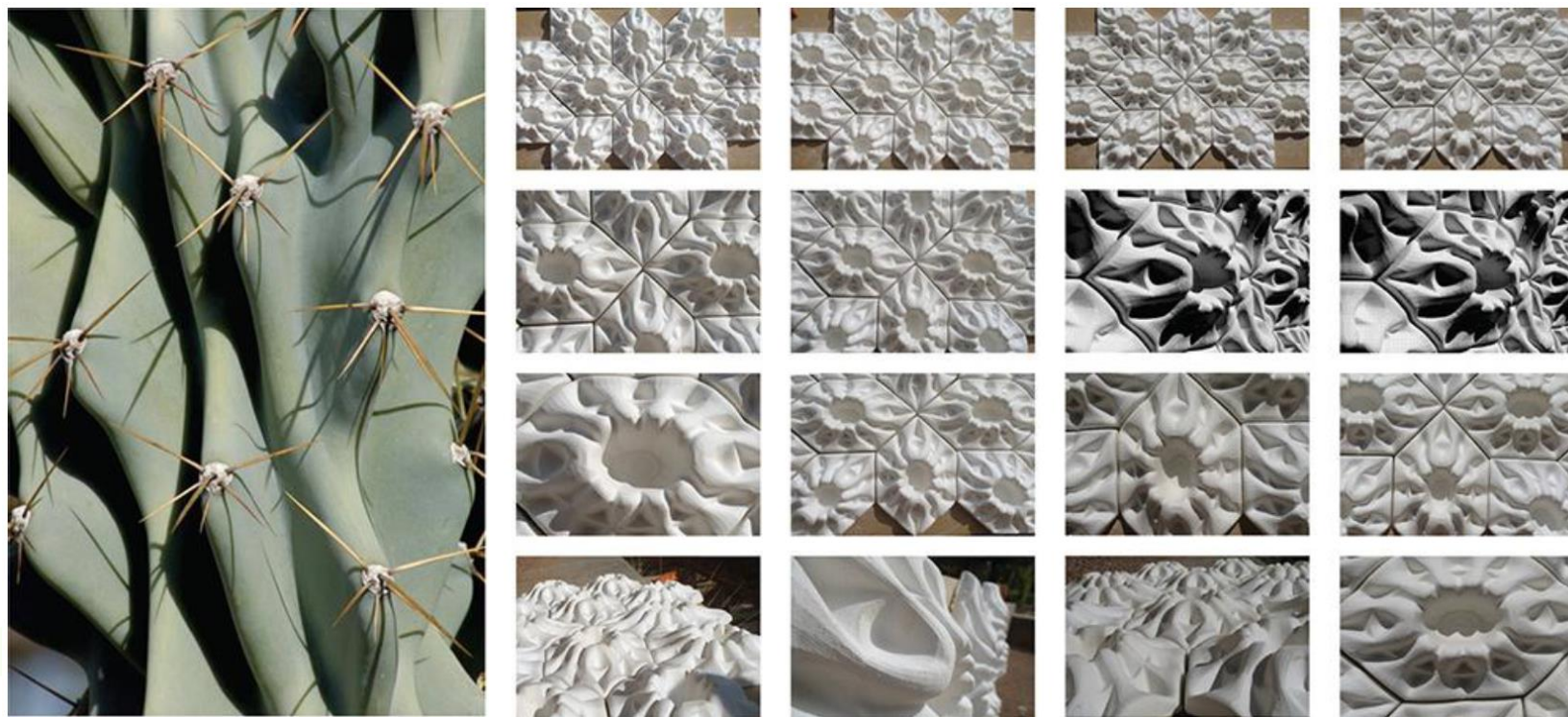


Structural characterisation of adaptive facades in Europe – Part I: Insight on classification rules, performance metrics and design methods  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710218311306>

# Materiali per facciate adattive

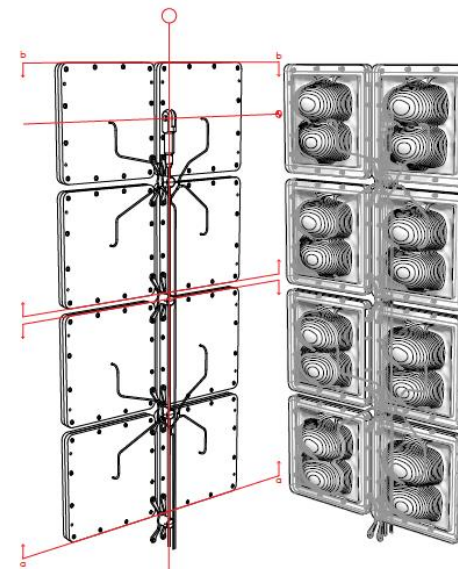
Class of materials	Conventional activation	Material	Activation
Smart	Energy	Glass-Fiber Reinforced Polymers (GFRPs)	Mechanical force
		Fiberglass-Reinforced Plastic	
		Polypropylene sheets	Heat source provided by electrical current
		Shape Memory Alloys (SMAs)	
		Elastic Polymer Materials with SMAs	
		SMA wires	
		Shape Memory Polymers	
Thermoplastic resin matrix, reinforced by SMAs	Heat source provided by solar radiation		
Adaptive	Environment	Electro-Active Polymers (EAP)	Electricity
		Thermo-bimetals	Temperature
		Heat sensitive plastics	
		SMAs	Light
		Thermochromic polymers	
		Phase Change Materials (PCM)	
		Phosphorescence pigments	
		Light responsive polymers	
		Photocromic dyes	Humidity
		Wood (beech, European maple, cut veneer)	
		Hydrogel	
		Carbon dioxide responsive polymers	Carbon Dioxide
Titanium dioxide			

# Facciate adattive con polimeri a memoria di forma

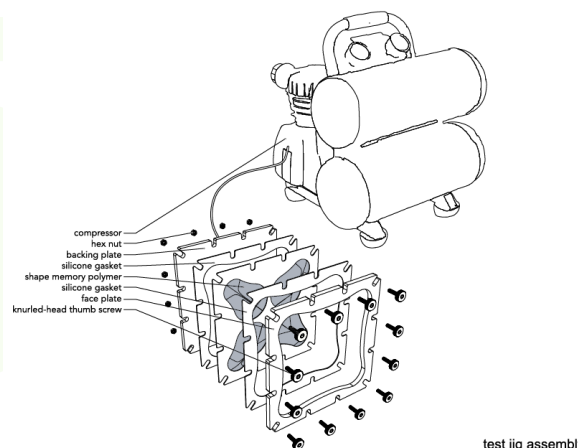


Application of the dynamic characteristics of shape-memory polymers to climate adaptive building facades  
<http://dro.dur.ac.uk/23079/>

# Facciate adattive con polimeri a memoria di forma

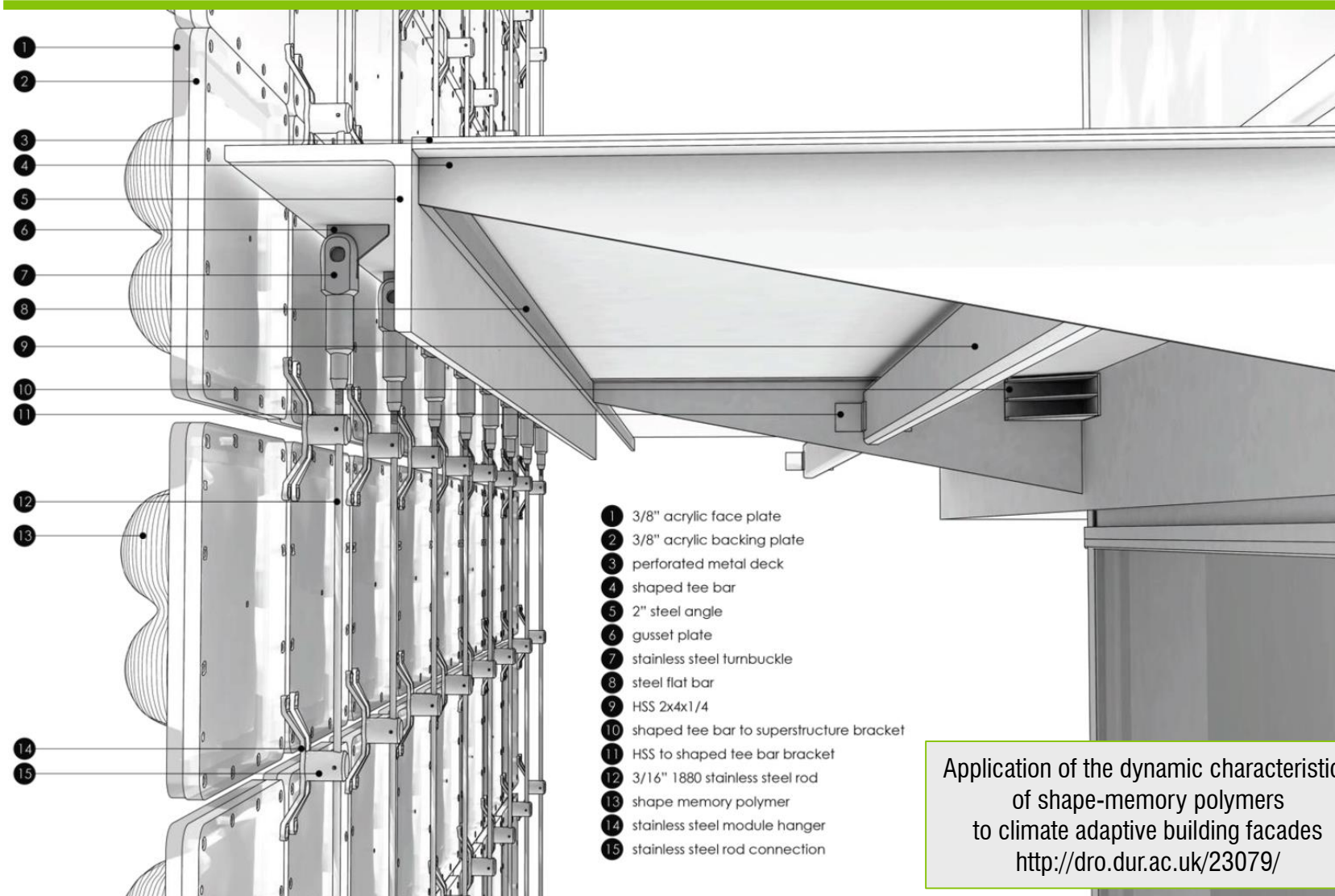


16



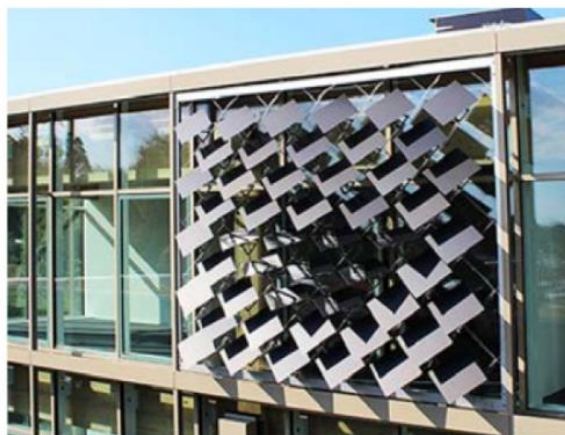
Application of the dynamic characteristics of shape-memory polymers to climate adaptive building facades  
<http://dro.dur.ac.uk/23079/>

# Facciate adattive con polimeri a memoria di forma





# Facciate adattive azionate da sistemi pneumatici



(a)



(b)

<http://www.moritz-begle.com/asf---adaptive-solar-facade.html>



(c)

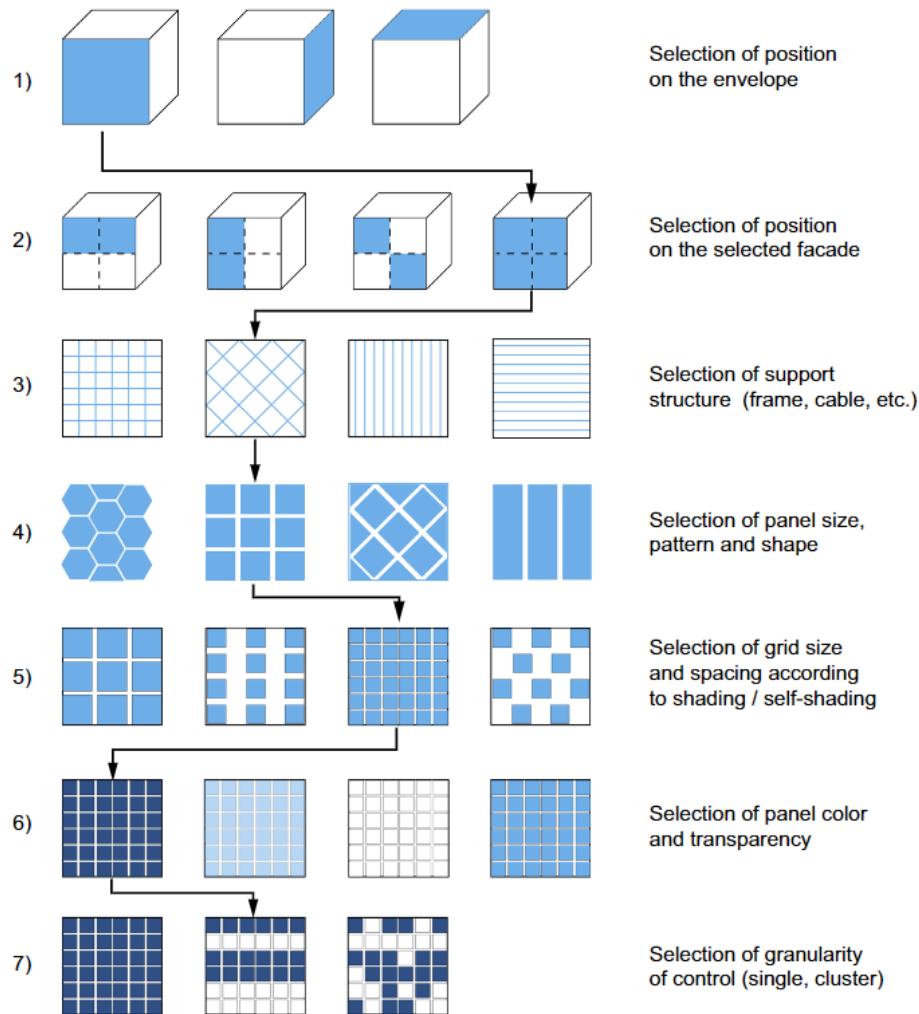


(d)

[https://www.youtube.com/watch?v=h\\_Fzlh4vLk](https://www.youtube.com/watch?v=h_Fzlh4vLk)

Structural characterisation of adaptive facades in Europe – Part I: Insight on classification rules, performance metrics and design methods  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710218311306>

# Schema a blocchi di progettazione



The Adaptive Solar Facade: From concept to prototypes  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095263516300048>