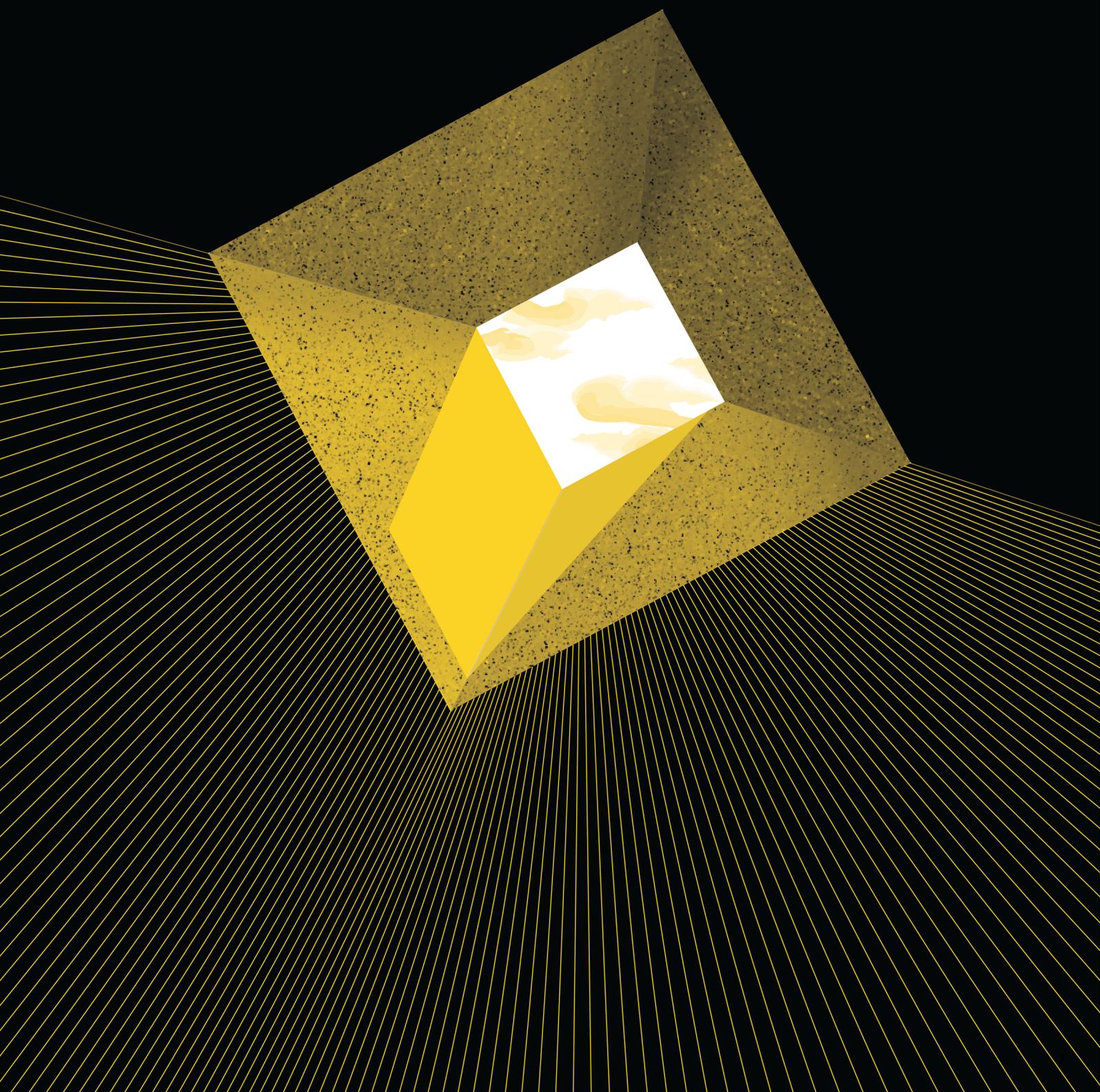


Luce naturale e benessere negli edifici

# Il ruolo dell'illuminazione zenitale





Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale  
**Architettura Costruzione Città**

Luce naturale e benessere negli edifici  
**Il ruolo dell'illuminazione zenitale**

Tesi di Laurea Magistrale  
Settembre 2024

**Relatore**  
Prof.ssa Anna Pellegrino

**Correlatore**  
Prof. Valerio Roberto Maria Lo Verso

**Candidata**  
Amina El Achak

*“Usually we see light merely as a medium of vision ... Light is life : we live with light, attune ourselves to light and resonate with the conditions of illumination”*

*Juhani Pallasmaa, 2016*

# INDICE

- 01 Abstract**
  
- 02 Illuminazione incentrata sull'Uomo**  
Risposta visiva alla luce.  
Percezione visiva.  
Comfort visivo.  
Vista verso l'esterno.  
Quantificazione della luce diurna.
  
- 03 Effetti non visivi della luce**  
Luce come regolatore fisiologico e psicologico.  
Risposta fotopica alla luce.  
Effetti della luce sul corpo.  
Quantificazione della luce circadiana.
  
- 04 Requisiti per la luce diurna**  
Quadro normativo e legislativo.  
Protocolli nazionali e internazionali.
  
- 05 Luce naturale e architettura**  
Illuminazione zenitale.  
Classificazione dei sistemi zenitali.  
Matrice strategie zenitali
  
- 06 Interazione luce e materia**  
Componente trasparente / sistemi vetri.  
Componente trasparente / sistemi polimerici.  
Componente schermante.
  
- 07 Casi studio**  
Schedatura progetti.
  
- 08 Analisi delle condizioni di illuminazione naturale**  
Selezione casi studio.  
Modellazione.  
Effetto fotopico della luce naturale.  
Effetto melanopico della luce naturale.  
Valutazione simulazioni.
  
- 09 Risultati delle analisi**  
Caso scolastico.  
Caso industriale / sistema zenitale a shed.  
Caso industriale / sistema zenitale a lucernario.  
Conclusioni.

# 01

## Abstract

## Abstract /

La luce naturale riveste un ruolo essenziale nella progettazione di un ambiente interno, non solo per il suo contributo al benessere psicofisico degli individui, ma anche per la sua capacità di migliorare l'efficienza energetica degli edifici. Tradizionalmente, l'illuminazione naturale è stata prevalentemente garantita attraverso aperture verticali, come finestre e vetrate, che consentono l'ingresso della luce diurna. Tuttavia, l'evoluzione delle tecnologie e delle strategie progettuali ha portato a un crescente interesse verso i sistemi di illuminazione zenitale, che sfruttano aperture dall'alto per massimizzare l'apporto di luce naturale all'interno degli spazi architettonici.

Il lavoro di tesi si propone di valutare l'efficacia e i benefici dell'illuminazione naturale ottenuta mediante sistemi zenitali rispetto ai sistemi verticali tradizionali per ottenere una condizione di comfort visivo e non visivo, che ad oggi assume sempre più importanza nella progettazione architettonica.

Nella prima parte, si focalizza l'attenzione agli effetti che la luce esercita sul benessere del corpo, non solo gli aspetti visivi legati alla qualità della luce e alla percezione spaziale, ma anche quelli non visivi, come la regolazione del ritmo circadiano, l'influenza sulla produzione di ormoni come la melatonina e il cortisolo, gli impatti sullo stato di vigilanza e sull'umore degli occupanti. In seguito vengono introdotti i principi teorici che implicano l'illuminazione zenitale, le varie tipologie di sistemi e le sue applicazioni in diversi contesti architettonici, il tema

del vetro e delle schermature che influiscono sulla prestazione dei sistemi zenitali, oltre ai criteri normativi che ne guidano la progettazione. E infine si racchiude questo aspetto tecnico-scientifico della tesi in una raccolta di casi studio esistenti per capire come questi sistemi zenitali vengono applicati, in quali contesti sono maggiormente impiegati e in che modo.

Le condizioni di illuminazione in ambiente interno con l'uso di questi sistemi zenitali determinano le condizioni di comfort delle persone, oltre a favorire il loro rendimento e produttività. In quest'ottica si vuole, nella seconda parte della tesi, fare una verifica di questi requisiti non più attraverso una lettura di scheda di progetto ma di una serie di simulazioni per osservare che prestazioni offrono dei sistemi di illuminazione zenitale in rapporto ad un quadro di esigenze più ampio, tramite un modello tipo su due ambiti di applicazione, quello scolastico e quello industriale, mettendo a confronto tipologie di sistemi zenitali diversi. Attraverso un'analisi critica dei risultati ottenuti dalle simulazioni si cercherà di evidenziare come i sistemi zenitali rispondono ai requisiti di illuminazione fotopica e melanopica secondi criteri di un quadro normativo vigente, per migliorare la qualità della luce negli spazi interni di lavoro.

L'obiettivo finale di questa ricerca è di fornire un quadro chiaro e approfondito delle potenzialità e delle sfide connesse a mettere in pratica dei sistemi di illuminazione zenitale, al fine di supportare i progettisti nella scelta delle soluzioni più adeguate, sia per la progettazione che la valutazione degli edifici, al fine di garantire una condizione di illuminazione naturale ottimale negli spazi costruiti mettendo al centro il benessere degli occupanti.

# 02

## illuminazione incentrata sull'Uomo

## Luce e Uomo /

L'illuminazione incentrata sull'Uomo è un linguaggio che mira a descrivere soluzioni di illuminazione che tengano conto sia degli aspetti convenzionali della qualità della luce connesse alla visione, sia delle esigenze biologiche e psicologiche degli individui.

Questo approccio non si limita solo a garantire un'adeguata visibilità, ma si preoccupa anche di come la luce possa influenzare l'umore, la salute e il benessere generale. L'ascesa dell'illuminazione nel campo nella progettazione architettonica che mette al centro l'Uomo, mette in gioco la percezione visiva, il comfort e le prestazioni cognitive. Ovviamente è difficile influenzare l'esposizione alla luce delle persone in qualunque situazione, e la cosa migliore da fare è quindi di offrire la luce giusta al momento giusto, a seconda delle esigenze.<sup>[1]</sup>

Le condizioni di illuminazione hanno in tal modo un diretto impatto sul comportamento dell'individuo, principalmente attraverso due sistemi: **sistema visivo** e **sistema circadiano**. L'effetto dell'illuminazione sulla vista è l'impatto più evidente della luce sugli esseri umani.

In questo capitolo verrà inizialmente descritto il sistema visivo, che può essere sintetizzato attraverso tre processi che coinvolgono direttamente una risposta dell'occhio in rapporto ad uno stimolo luminoso: **risposta visiva**, **percezione visiva** e **comfort visivo**.

## 2.1 Risposta visiva alla luce/

La risposta visiva alla luce naturale si riferisce alla reazione del sistema visivo umano all'illuminazione naturale proveniente dal sole e dalla volta celeste. Questo sistema, che coinvolge sia gli occhi che il cervello, include elementi anatomici e fisiologici che collaborano per convertire i segnali luminosi in immagini comprensibili dal cervello, permettendo così la visione.

L'occhio è il principale strumento sensoriale incaricato di captare ed elaborare le informazioni provenienti dall'ambiente circostante, utilizzando la luce come mezzo fondamentale per la vista. È costituito da varie componenti, tra cui la cornea, la pupilla, il cristallino e la retina. La luce penetra nell'occhio attraversando la cornea, passa attraverso la pupilla (la cui apertura è regolata dall'iride) e viene messa a fuoco dal cristallino sulla retina.<sup>[2]</sup>

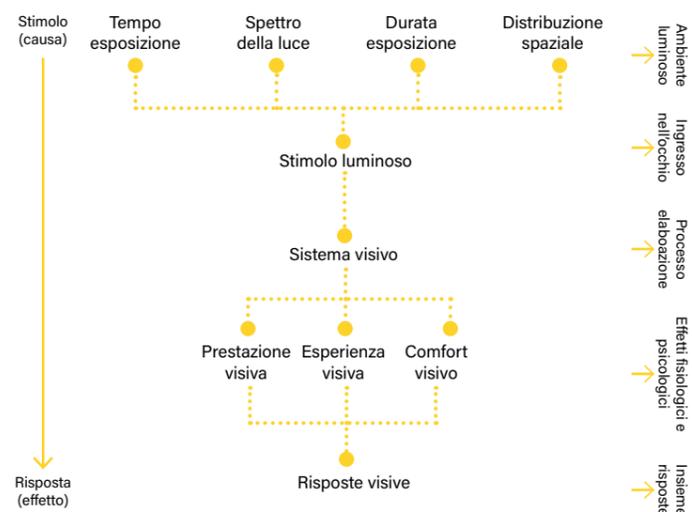
Nel momento in cui uno stimolo visivo raggiunge l'occhio, viene trasformato in un fascio di luce che attraversa la lente e si focalizza sulle cellule nervose della retina. Successivamente, gli impulsi elettrici generati dai fotorecettori, principalmente dai bastoncelli e dai coni, vengono trasmessi al cervello tramite il nervo ottico. Il cervello elabora queste informazioni essenziali, come forma, movimento e colore, per creare un'immagine chiara e dettagliata dell'ambiente circostante.<sup>[3]</sup>

La risposta visiva è determinata da proprietà luminose che comprendono la direzione del flusso di luce e una gerarchia di illuminazione che prende forma sugli oggetti, generando ombre definite e migliorando la percezione della tridimensionalità.<sup>[4]</sup>

Questo sistema, oltre a consentire la vista, influisce anche sulle prestazioni visive, sul comfort visivo e sulle reazioni psicofisiche ed emotive degli individui.

Vedere non è una risposta passiva ai modelli di luce, ma un'attività dinamica di raccolta e interpretazione dei dati ricevuti e guidati dal cervello. I dati visivi sensoriali vengono integrati con informazioni relative al contesto provenienti dagli altri sensi e da esperienze precedenti simili.<sup>[2]</sup> Questi dati ricevono attenzione in base alla classificazione dello stimolo come segnale o rumore. Il valore di uno stimolo è determinato più dal suo contenuto informativo e dal contesto in cui si trova che dalla sua intensità. Questo meccanismo ha un impatto notevole su ciò che vediamo e percepiamo, influenzando in gran parte la nostra esperienza visiva complessiva e il modo in cui ci rapportiamo all'ambiente circostante.<sup>[5]</sup>

Il grafico sottostante illustra come le caratteristiche principali della luce in ambiente contribuiscono alla risposta visiva di uno stimolo luminoso.<sup>[6]</sup>



**Grafico elaborato**  
risposta visiva ad uno stimolo luminoso

## 2.2 Percezione visiva/

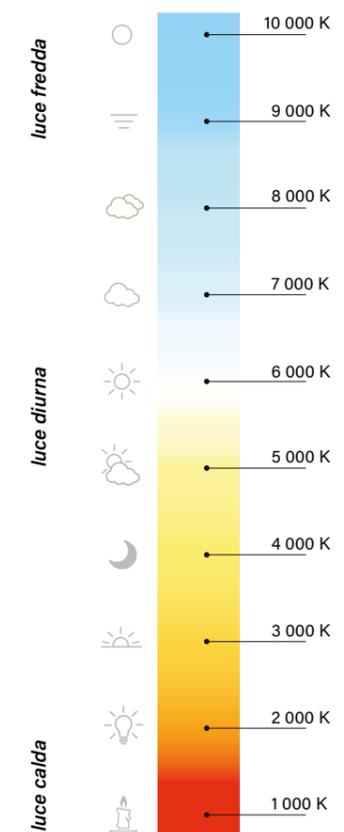
Il sistema visivo non solo permette di vedere, ma anche di interpretare e rispondere all'ambiente che ci circonda. Oltre a elaborare le informazioni visive, il cervello combina altri input sensoriali (come suoni e tatto) per creare un'esperienza ambientale multidimensionale. Questo processo è definito dalle esperienze passate, dalla memoria e dall'attenzione del soggetto. L'atmosfera percepita può essere considerata come un'esperienza propria con effetti psicologici derivanti dal contatto con uno spazio architettonico, strettamente in legame al soggetto. Tale percezione è influenzata da vari fattori, tra cui la qualità della luce naturale, l'interazione tra luce e materiali, i colori, le forme e la disposizione degli elementi all'interno dello spazio.<sup>[4]</sup>

La luce naturale riveste un ruolo cruciale nel definire l'atmosfera percepita, poiché può influire sull'umore, sulla produttività e sul comfort visivo. L'interazione della luce con superfici e materiali genera effetti di ombra e riflessione che valorizza l'esperienza visiva, attraverso una sensazione più tridimensionale dello spazio. La percezione visiva è dunque un processo complesso che consente all'individuo di interpretare e comprendere l'ambiente mediante la luce, coinvolgendo una serie di meccanismi biologici e cognitivi che elaborano i segnali luminosi in esperienze visive significative, in base ai numerosi fattori interni ed esterni presenti.

Il principio di percezione cognitiva viene introdotto dai psicologi della scuola «della forma» a inizio Novecento, dove elaborano il pensiero che la percezione è un fenomeno complesso che nasce dall'interdipendenza di elementi. Secondo la teoria "L'intero è più della somma delle parti"<sup>[7]</sup> nessuno stimolo possiede in sé un significato immutabile e costante, ma al contrario, assume un significato differente in base al contesto.<sup>[8]</sup> Questi fattori che influenzano la percezione cognitiva, tra cui la natura degli stimoli luminosi, il contesto percepito e le esperienze personali, sono strettamente legati alle risposte emotive. Quando interagiamo con l'ambiente, le informazioni vengono elaborate anche

dalla parte emotiva del cervello, determinando il nostro grado di apprezzamento per ciò che ci circonda e contribuendo al nostro benessere psicologico.

Nel contesto della luce, l'esperienza visiva è determinata dalla percezione dell'illuminazione ambientale e dalle emozioni che essa suscita, come la sensazione di spaziosità, piacevolezza o rilassamento. Questa risposta percettiva consente di riconoscere immediatamente se c'è uno stato di comfort o discomfort, influenzando l'idoneità dello spazio per svolgere delle attività. Anche il colore della luce gioca un ruolo significativo nel modellare l'umore, generando sensazioni positive o negative. Ad esempio, la luce solare, con una temperatura di colore più calda (circa 5500K), crea contrasti accentuati che possono causare discomfort visivo e abbagliamento. Al contrario, la luce del cielo, con una temperatura di colore più fredda (circa 6500K), ha una luminanza più bassa e distribuisce la luce solare in modo più uniforme, riducendo il rischio di abbagliamento e migliorando il comfort visivo.<sup>[2]</sup>



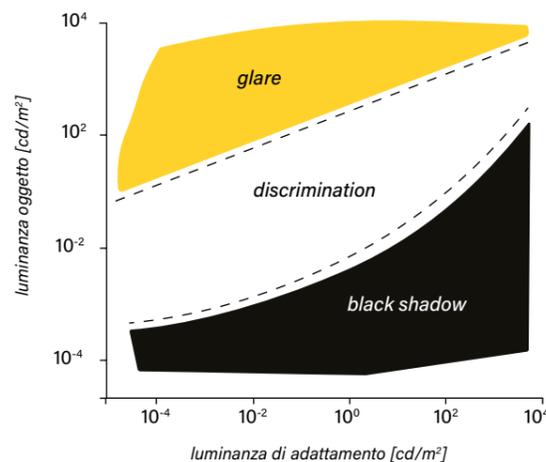
**Schema**  
riporta la temperatura di alcune sorgenti luminose.<sup>[9]</sup>

## 2.3 Comfort visivo/

*“Good quality lighting should include lighting for health, in parallel with meeting the other needs of people who will occupy the space”*

*William M. C. Lam, 1977*

Il comfort visivo è una nozione centrale nell'ambito dell'illuminazione architettonica e si riferisce alla qualità delle condizioni visive che consentono alle persone di svolgere le proprie attività in modo efficace. Per raggiungere un livello di comfort visivo adeguato, è essenziale comprendere le capacità del sistema visivo e le proprietà della luce che coinvolgono vari parametri fisici, fisiologici e psicologici. Tra questi, l'intensità luminosa riveste un ruolo chiave: un'illuminazione insufficiente può provocare affaticamento visivo, mentre una distribuzione uniforme della luce è necessaria per evitare zone d'ombra e ridurre contrasti eccessivi che possono stancare gli occhi. Anche le caratteristiche spettrali della sorgente, come la tonalità della luce, influenzano la percezione visiva e l'umore, contribuendo a creare ambienti rilassanti o stimolanti. Infine, l'adattamento luminoso nella figura seguente [10], ovvero il processo di adattamento dell'occhio ai cambiamenti di livelli di luce nell'ambiente, è fondamentale, poiché un elevato contrasto di luminosità può generare discomfort visivo.



Considerando che il livello di comfort si basa sulla percezione individuale di benessere, risulta complesso valutare in maniera scientifica una sensazione intrinsecamente soggettiva. [2]

Un alto grado di comfort percepito favorisce a migliorare le prestazioni lavorative e lo stato emotivo, influenzando positivamente la capacità di concentrazione e diminuendo la sensazione di affaticamento. Al contrario, l'affaticamento visivo può causare sintomi come irritazione oculare, stanchezza e mal di testa. Questi sintomi sono fortemente influenzati dalle condizioni di illuminazione, che possono derivare da una luminosità insufficiente, differenze elevate di luminanza e sfarfallio.

Due parametri principali per valutare il comfort visivo sono il livello di illuminamento e il livello di abbagliamento. Il livello di illuminamento, misurato in lux, riguarda la superficie illuminata (ad esempio un piano di lavoro) necessario per lo svolgimento del compito visivo a seconda dell'ambiente, al fine di garantire il comfort visivo delle persone ed evitare rischi di discomfort visivo. [11] Si possono evidenziare tre tipi di abbagliamento: [10] [12]

### ■ Abbagliamento perturbatore:

Implica una riduzione della visibilità che causa una compromissione o l'impedimento totale delle prestazioni visive. Questo abbagliamento si verifica quando una sorgente luminosa è direttamente visibile nel campo visivo e ha un'elevata luminanza. Negli ambienti interni illuminati dalla luce diurna, si riscontra spesso un abbagliamento fastidioso e per limitarlo viene consigliato l'utilizzo di sistemi schermanti.

### ■ Abbagliamento molesto:

Implica un effetto fastidioso o distraente, che interferisce con la capacità di visione ma non compromette necessariamente la visione dell'ambiente. Tuttavia, può causare disagio o affaticamento degli occhi.

### ■ Abbagliamento riflesso:

Implica una riflessione speculare della luce incidente su superfici o materiali, che può oscurare parzialmente o totalmente i dettagli visibili, diminuendo il contrasto tra sfondo e primo piano e, di conseguenza, compromettendo l'efficacia del compito visivo.

## 2.4 Vista verso l'esterno/

La vista verso l'esterno riveste un ruolo importante nella percezione visiva e nel benessere psicologico all'interno degli ambienti costruiti. Ma spesso la vista, rispetto a ciò che si vede fuori, e la luce del giorno, rispetto all'illuminazione trasmessa all'interno dell'ambiente, sono viste come funzioni separate della finestra. [13] La possibilità di avere una connessione diretta con l'ambiente naturale offre numerosi vantaggi che vanno oltre il semplice aspetto estetico, influenzando significativamente il comfort visivo e la qualità dell'esperienza spaziale degli occupanti. Vari studi dimostrano che avere un accesso visivo a elementi naturali come piante, acqua e paesaggi verdi ha un impatto positivo sullo stato emotivo e sul livello di concentrazione degli individui. [14]

La possibilità di guardare all'esterno fornisce anche un riferimento visivo sulla percezione del tempo. L'esposizione alla luce naturale dinamica influenza il nostro ritmo biologico, contribuendo a migliorare l'umore e la produttività e riducendo i sintomi di affaticamento e depressione.

La qualità della vista è in stretta correlazione con

la percezione visiva degli spazi illuminati con la luce naturale, oltre alla fornitura e la distribuzione di luce naturale all'interno di uno spazio. [15] In tal senso, il design degli ambienti architettonici (orientamento degli edifici, dimensione delle aperture...) deve tener conto dell'importanza della vista verso l'esterno per massimizzare i benefici visivi e psicologici degli occupanti. La qualità della vista verso l'esterno viene valutata secondo la norma UNI 17035:2018, che verrà in seguito approfondita nel capitolo dedicato ai requisiti per la luce diurna.

La vista verso l'esterno non è misurabile solo a partire dall'angolo di visione che si può avere ad una certa posizione all'interno di un ambiente (che può ad esempio essere ostacolata da elementi interni o esterni), ma dalla percentuale totale di cielo visibile indipendentemente dalla posizione in cui ci si trova all'interno dell'ambiente. E questa percentuale viene in parte influenzata dalla posizione dell'apertura, come lo mostra lo schema sottostante [16], dove è evidente che l'apertura verticale non permette di avere una totale vista verso il cielo rispetto ad un'apertura più inclinata o orizzontale, priva di ostruzioni, con una maggiore percentuale del cielo visibile e di esposizione alla luce della volta celeste.

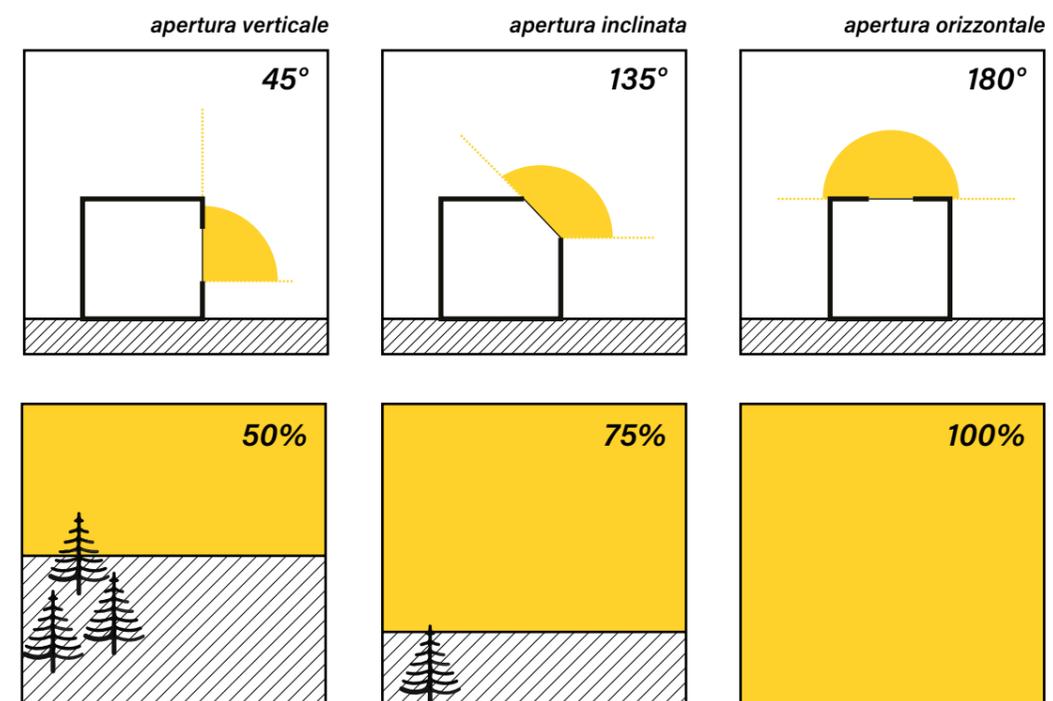


Grafico elaborato  
percentuale del cielo visibile [10]

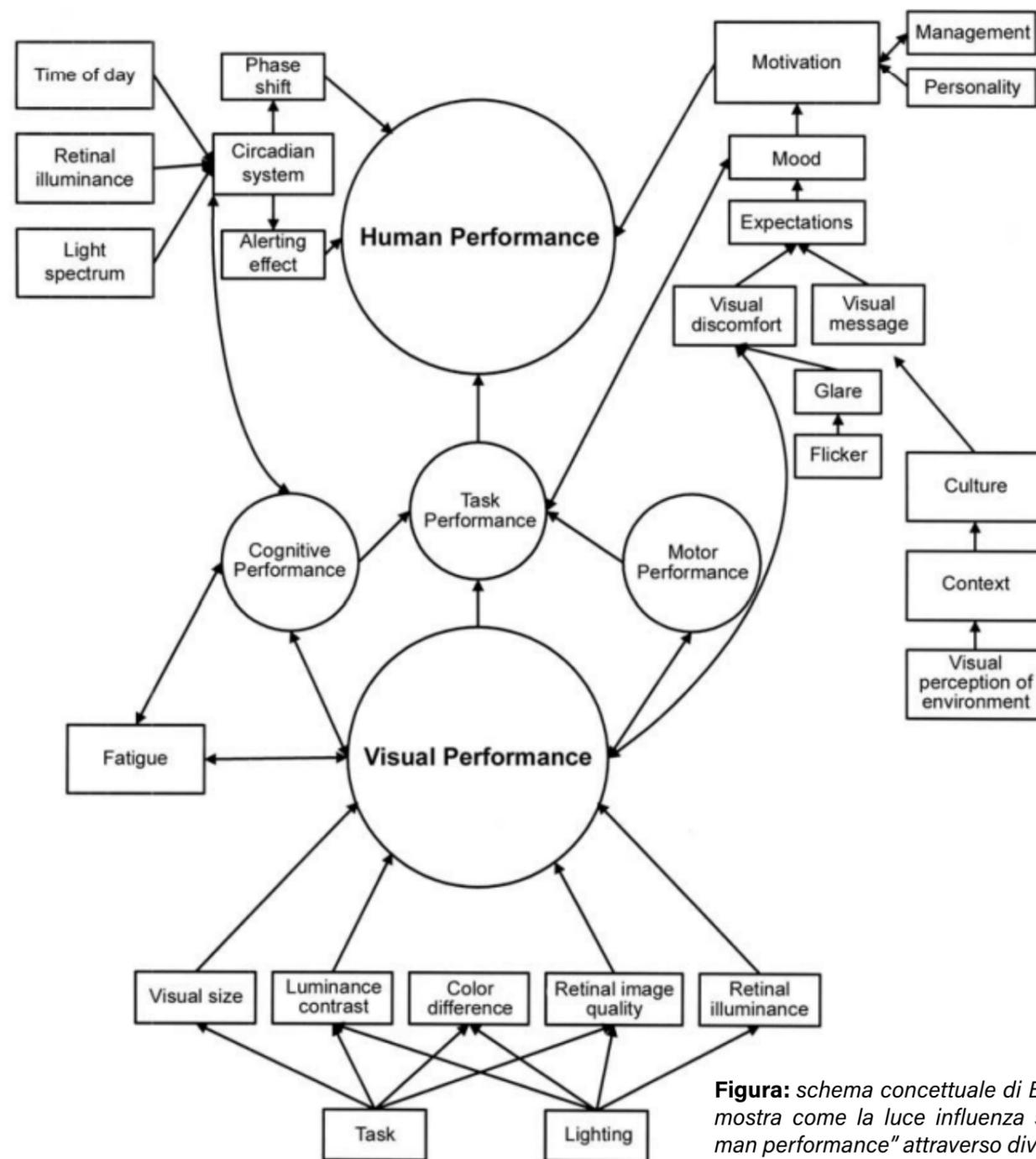
Abbiamo visto come la percezione dello spazio interno e delle condizioni di illuminazione naturale hanno un impatto sul comfort e sulle prestazioni delle persone. Facendo riferimento allo schema concettuale di Boyce e Rea [17], emergono tre fattori principali attraverso i quali la luce incide sulle prestazioni umane: il sistema visivo, il sistema circadiano e il sistema percettivo. La prestazione visiva è direttamente influenzata dalle condizioni di illuminazione. Il sistema circadiano regola il ciclo sonno-veglia e risponde agli stimoli luminosi, mentre il sistema percettivo è condizionato da diversi fattori, tra cui la luce. Sebbene ciascuno di questi fattori possa essere

analizzato separatamente, è evidente che la loro interazione è cruciale per una comprensione completa del modo in cui la luce influisce sulle prestazioni umane. Tuttavia si può notare in questo schema che la prestazione visiva può essere ottenuta indipendentemente dal tipo di luce utilizzato.

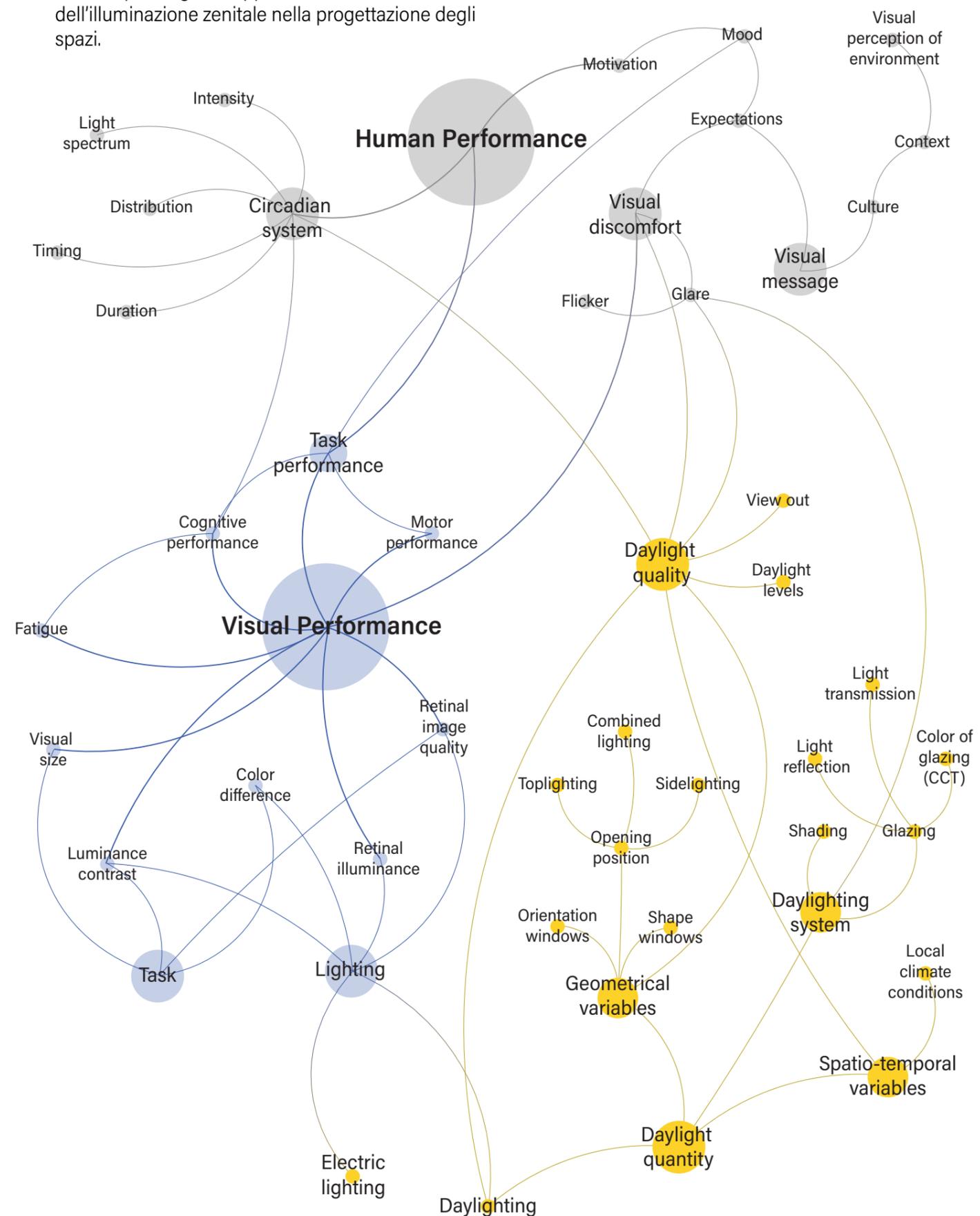
Partendo da questo presupposto, il modello complesso degli effetti di interazione tra la luce e le prestazioni umane è stato ulteriormente sviluppato, introducendo parametri specifici legati al tema di luce naturale. Questi includono elementi come la vista verso l'esterno, i parametri geometrici dei sistemi di illuminazione naturale, le caratteristiche

del vetro e dei sistemi schermanti, e altri fattori rilevanti per comprendere l'impatto dei sistemi zenitali non solo sulla prestazione visiva, ma anche sul sistema circadiano. Tali aggiustamenti sono fondamentali per cogliere appieno l'efficacia e il valore dell'illuminazione zenitale nella progettazione degli spazi.

**Schema:** elaborazione dello schema concettuale di Boyce introducendo parametri specifici alla luce naturale che influenza sulla human performance.



**Figura:** schema concettuale di Boyce che mostra come la luce influenza sulla "human performance" attraverso diversi fattori, mentre le frecce indicano gli effetti. [17]



## 2.5 Quantificazione della luce diurna/

### Grandezze fotometriche <sup>[18]</sup>

#### Flusso luminoso / $\Phi_v$ [lm]

Il flusso luminoso indica la quantità di energia luminosa emessa, trasferita o ricevuta, da una sorgente nell'unità di tempo. Non dà informazioni sulla qualità della luce, né della sua distribuzione nello spazio.

#### Intensità luminosa / $I_v$ [cd]

L'intensità luminosa indica la quantità di flusso luminoso emessa all'interno di un angolo solido in una direzione specifica.

#### Illuminamento / $E_v$ [lux]

L'illuminamento indica la quantità del flusso luminoso incidente su una superficie.

#### Luminanza / $L_v$ [cd/m<sup>2</sup>]

La luminanza indica l'intensità luminosa emessa da una sorgente luminosa in una direzione specifica rispetto all'area apparente della superficie emettente. Rivela come la luce viene percepita dall'occhio umano, e permette la valutazione dell'abbagliamento.

### Parametri

#### Distribuzione spettrale della potenza / SPD [W/m<sup>2</sup>/nm]

È una misura dell'energia (in Watt) emessa da una sorgente luminosa per unità di superficie in funzione della lunghezza d'onda. Ovvero, l'SPD descrive la quantità di potenza emessa dalla sorgente luminosa all'interno di ciascuna banda di lunghezza d'onda (misurata da uno spettrometro)<sup>[19]</sup>. La curva SPD fornisce informazioni sulla composizione spettrale delle sorgenti, incluse in alcune lunghezze d'onda non visibili all'occhio umano. Assieme alla SPD, le proprietà di riflessione e di assorbimento dei materiali influenzano le interazioni tra luce e materia.

#### Temperatura di colore correlata / CCT [K]

È la temperatura a cui occorre portare un corpo nero affinché le radiazioni che emette abbiano la tonalità più simile a quelle della sorgente. Una sorgente di luce fredda ha una temperatura di colore più elevata (>5300K), una sorgente di luce calda ha una temperatura di colore inferiore (<3300K), mentre la luce diurna viene rappresentata dallo standard D65 con una temperatura di colore pari a 6500K.<sup>[18]</sup>

#### Indice di resa cromatica / CRI o Ra [-]

La resa cromatica misura il grado di fedeltà del colore di un oggetto illuminato da una sorgente di prova rispetto a quello stesso oggetto illuminato da una sorgente di riferimento. Tale indice viene con valori da 0 a 100.<sup>[19]</sup>

### Metriche di valutazione della luce diurna

#### Fattore di Luce Diurna / DF [%]

Il Fattore di luce diurna è una delle principali metriche per il calcolo dell'illuminazione naturale negli ambienti confinati. Esprime come percentuale la quantità di luce diurna disponibile all'interno di una stanza, sul piano di lavoro, rispetto alla quantità di luce diurna disponibile all'esterno in condizioni di cielo coperto, determinate da Hopkins nel 1963, tenendo conto di varie caratteristiche dello spazio:

- dimensione, posizione e trasmittanza delle aperture;
- dimensione dello spazio interno;
- proprietà riflettenti delle superfici interne;
- grado in cui le strutture esterne oscurano la vista del cielo.

Il requisito minimo principale considerato nella normativa italiana nella valutazione della luce naturale è il Fattore medio di luce diurna,  $FLD_m$ , che considera globalmente la luce diurna in un ambiente e non in maniera puntuale.<sup>[20]</sup> I requisiti  $FLD_m$  vengono approfonditi nel capitolo 4.

#### Indice di uniformità / U [-]

L'indice di uniformità esprime il rapporto tra il valore minimo e il valore medio di illuminamento. Secondo la norma 12464-1:2021, nell'area immediatamente circostante l'area del compito visivo deve essere di  $U > 0.6$ , sull'area di fondo deve essere  $U > 0.1$ , mentre l'uniformità per pareti e soffitto deve essere  $U > 0.1$ .

#### Daylight autonomy / DA [%]

Determina la percentuale di tempo all'anno in cui l'illuminamento minimo richiesto per raggiungere il compito visivo, in un determinato punto dello spazio, viene soddisfatto alla sola luce del giorno, secondo Reinhart (2001). Questo parametro tiene conto sia della posizione geografica del sito che delle condizioni di cielo, oltre a come siano operate le tende e i sistemi di illuminazione, inclusi i sistemi di controllo.<sup>[20]</sup>

#### Spatial daylight autonomy / sDA [%]

Indica la percentuale dell'area che nelle ore di occupazione riceve una quantità di luce naturale che soddisfa il livello minimo richiesto di 300 lux per almeno 50% del tempo di occupazione nell'intero anno. Secondo il protocollo LEED, con un  $sDA_{300lux,50\%} > 40\%$  si ha una condizione di illuminamento sufficiente, con un  $sDA_{300lux,50\%} > 55\%$  si ha una condizione di illuminamento accettabile, e nel caso di un  $sDA_{300lux,50\%} > 75\%$  la condizione diventa ottimale.

#### Continuous Daylight Autonomy / $DA_{con}$ [%]

Il  $DA_{con}$  è una metrica che si basa sul valore DA e tiene conto di un contributo parziale della luce diurna, nel caso in cui la sola luce naturale non raggiunge il livello minimo di illuminamento richiesto per soddisfare il compito visivo.<sup>[20]</sup>

#### Maximum Daylight Autonomy / $DA_{max}$ [%]

Il  $DA_{max}$  indica un livello di illuminamento di luce solare diretta o una condizione di luce naturale estremamente elevate, e si esprime attraverso una percentuale di ore all'anno in cui l'illuminamento alla sola luce naturale è pari a dieci volte l'illuminamento richiesto per svolgere un determinato com-

posito visivo. In tal senso permette di valutare una possibile condizione di potenziale abbagliamento o surriscaldamento all'interno di uno spazio.<sup>[20]</sup>

#### Useful daylight illuminance / UDI [%]

L'UDI è una metrica che considera i livelli di illuminamento sul piano di lavoro necessari a svolgere il compito richiesto, e viene suddivisa in tre soglie di illuminamento:  $UDI_{fell-short} < 100lux$  che presenta una percentuale di tempo in cui l'illuminamento naturale è insufficiente,  $100lux < UDI_{achieved} < 3000lux$  in cui l'illuminamento naturale sufficiente e  $UDI_{exceeded} > 3000lux$  in cui si riscontra fenomeni di discomfort visivo e/o termico.<sup>[20]</sup>

#### Annual Light Exposure / ALE [lx\*h/anno]

L'esposizione annuale alla luce solare, quantifica quanta luce diretta e indiretta entra nell'ambiente e raggiunge un punto durante tutto l'anno.

### Metriche valutazione abbagliamento

#### Annual Sunlight Exposure / ASE [%]

L'ASE esprime il livello di discomfort legato all'abbagliamento. Indica in percentuale quanto spazio riceve un'eccessivo illuminamento di luce solare diretta maggiore di 1000 lx per più di 250 ore all'anno. Il protocollo LEED prescrive "per valori ASE > 10%, occorre definire un'adeguata strategia per il controllo dell'abbagliamento". Utilizzata in combinazione con la sDA, i due valori sono forniti nella guida LM-83-12 e usati nel protocollo LEED per valutare le prestazioni della luce diurna negli edifici.

#### Daylight Glare Probability / DGP [-]

Il DGP esprime la probabilità che il soggetto percepisca una sensazione di discomfort visivo causato dall'abbagliamento, legato alla luce naturale, nell'ambiente. La probabilità è associata all'illuminamento verticale che incide sull'occhio dell'osservatore. Questo valore, definito da Wienold and Christoffersen, viene classificato in quattro categorie: nel caso di un  $DGP < 0.35$  si parla di "imperceptible glare", per  $0.35 < DGP < 0.40$  si parla di "perceptible glare", per  $0.40 < DGP < 0.45$  si parla di "disturbing glare", e infine con un  $DGP > 0.45$  si parla di "intolerable glare".<sup>[21]</sup>

# 03

## Effetti non visivi della luce

## Effetti non visivi /

Sebbene gli aspetti visivi dell'illuminazione siano regolati da standard progettuali per assicurare un'adeguata progettazione illuminotecnica negli edifici, ci sono altre dimensioni della luce che possono influenzare la salute delle persone che trascorrono molto tempo in ambienti confinati: gli effetti non visivi. Questi effetti, conosciuti anche come risposte "non image forming" (NIF) o risposte circadiane, hanno impatti fisiologici e biologici significativi. Diversamente dagli effetti visivi che coinvolgono i bastoncelli e i coni della retina, le risposte non visive sono mediate principalmente da un terzo fotorecettore, le cellule gangliari retiniche ipersensibili alla luce (ipRGC). Queste cellule convertono i segnali luminosi in segnali neurochimici tramite la melanopsina, una proteina sensibile alla luce.<sup>[4]</sup>

Possiamo affermare che i coni e i bastoncelli della retina ci forniscono il senso dello spazio o della vista, mentre gli ipRGC rilevano la quantità complessiva di luce nell'ambiente, sincronizzando così il nostro orologio biologico e dandoci un senso di tempo.<sup>[22]</sup>

Le risposte fisiologiche e psicologiche del sistema circadiano alla luce sono effetti comuni a tutte le persone e possono avere conseguenze sia a breve che a lungo termine, indipendentemente dal fatto che l'esposizione sia a luce naturale o artificiale. Tuttavia, questi stati soggettivi non sono influenzati esclusivamente dallo stimolo luminoso, ma anche da fattori esterni e individuali all'habitat come, le abitudini alimentari, l'attività fisica e le interazioni sociali, che hanno un impatto diretto sullo stato mentale e sulla produttività dell'individuo. Pertanto, una progettazione illuminotecnica che tenga conto di queste variabili è essenziale per promuovere il benessere e la salute generale delle persone.

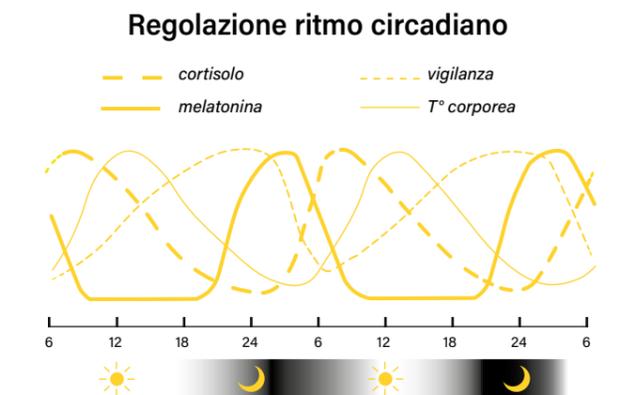
### 3.1 Luce come regolatore fisiologico e psicologico/

La luce naturale non solo è un elemento essenziale per la risposta visiva, ma è il fattore principale che garantisce la regolazione biologica del sistema circadiano. Questo "orologio biologico" risponde all'esposizione alla luce e regola i cosiddetti ritmi circadiani, che si ripetono approssimativamente ogni 24 ore (come il ciclo giorno-notte). Il sistema circadiano gestisce le risposte neuroendocrine, inclusa la produzione di ormoni come la melatonina, e le risposte neurocomportamentali, che collegano il sistema nervoso al comportamento. Questi meccanismi influenzano le risposte fisiologiche degli individui e, di conseguenza, impattano sul loro benessere visivo, fisico e psicologico.<sup>[4]</sup>

I ritmi circadiani si sviluppano come risposta ai cicli di luce e buio a cui siamo esposti quotidianamente, e vengono regolati dall'esposizione alla luce. Tuttavia, questi ritmi non sono costanti, poiché possono essere influenzati da vari fattori esterni, come dimostrano numerosi studi sugli effetti biologici della luce. Ad esempio, l'esposizione ad uno stimolo luminoso al mattino può anticipare il ciclo circadiano, mentre lo stesso tipo di stimolo alla sera può ritardarlo. Inoltre, la reazione del sistema circadiano varia in base all'età e ad altri fattori sogettivi, come la predisposizione a essere più attivi al mattino o alla sera.<sup>[23]</sup>

Negli anni, numerosi studi hanno evidenziato come diversi aspetti della fisiologia e della psicologia umana siano influenzati dall'illuminazione retinica. Queste risposte dell'occhio, tuttavia, non sono legate alla visione in senso stretto, ma fanno parte delle risposte alla luce classificate come non visive o immagini non formanti (NIF). Un'esposizione alla luce non regolata può provocare uno sfasamento del ritmo circadiano, causando disturbi del sonno, calo della produttività e altre potenziali conseguenze negative.

Gli effetti della luce sono mediati da un distinto fotorecettore nell'occhio noto come cellule gangliari retiniche intrinsecamente fotosensibili (ipRGC), oltre ai convenzionali coni e bastoncelli. Comprendere questi meccanismi neurofisiologici e psicologici e il modo in cui la luce influisce sul corpo

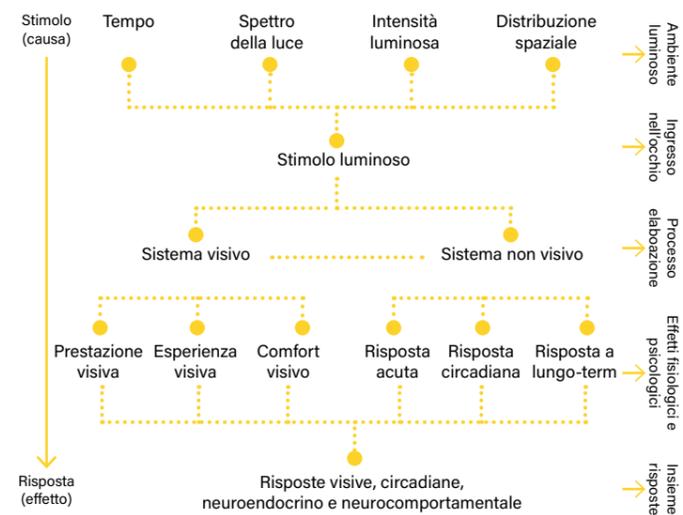


è fondamentale per utilizzare la luce in modo più efficace e consapevole.<sup>[24]</sup>

La luce naturale ha effetti significativi sul sistema biologico umano, come si vede nello schema (fonte: *Philips Lighting*): al mattino, la luce provoca una contrazione della pupilla, inibisce la produzione di melatonina e stimola il rilascio di cortisolo, giocando un ruolo chiave nella regolazione del ritmo circadiano. Man mano che l'illuminazione cambia durante la giornata, questi due ormoni si comportano in modo diverso: il cortisolo aumenta la frequenza cardiaca e la temperatura corporea interna. Questi cambiamenti sono accompagnati da un miglioramento delle misure sia soggettive che oggettive di vigilanza e rapidità di reazione psicomotoria, riducendo i tempi di osservazione e risposta.<sup>[25]</sup>

In sintesi, la luce non solo regola il nostro livello di allerta e la capacità di reazione, ma ha anche un impatto significativo sulla percezione del tempo e sulla sincronizzazione del ritmo circadiano, contribuendo al benessere complessivo e alla regolazione del ciclo sonno-veglia.

Gli studi di M. Rea e M. Figueiro inquadrano principalmente il tema degli effetti non visivi e il funzionamento del ritmo circadiano, illustrato nello schema che segue. La risposta non visiva, analogamente a quella visiva discussa nel precedente capitolo, è influenzata principalmente da quattro caratteristiche della radiazione luminosa: *intensità luminosa*, che determina la reazione dell'organismo in funzione del livello di illuminazione; *lo spettro della radiazione* che definisce come un organismo risponde a diverse lunghezze d'onda della radiazione elettromagnetica in relazione alla sensibilità spettrale



dei fotorecettori ipRGC; *il tempo di esposizione* che si riferisce al momento della giornata in cui si verifica l'esposizione alla luce; infine, *la distribuzione spaziale* che indica come in ambienti chiusi la disposizione degli spazi e delle aperture influenzano lo spettro della luce e, di conseguenza, le risposte circadiane dell'organismo. La ricerca indica che lo spettro e l'intensità della luce influiscono sull'orologio interno quotidiano. Mentre il tempo di esposizione alla luce, ma anche della sua durata, può anticipare o ritardare l'orologio biologico.

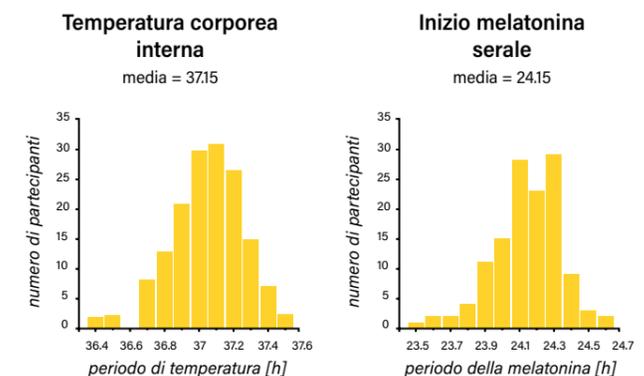
Le risposte non visive si adattano alle variazioni dell'intensità della luce e della composizione spettrale per un periodo di tempo più lungo rispetto al sistema visivo. Livelli di luce relativamente bassi possono essere sufficienti per il funzionamento del lavoro visivo ma non sono necessariamente sufficienti a sostenere il funzionamento dei sistemi circadiani o indurre altre risposte fisiologiche e comportamentali non visive.<sup>[26]</sup> Gli studi indicano che le risposte alla luce sono principalmente determinate dall'intensità luminosa. Sebbene non sia stato dimostrato un legame diretto tra variazioni della lunghezza d'onda della luce e lo stato psicologico individuale, altre ricerche suggeriscono che l'esposizione a luce intensa con lunghezze d'onda maggiori può favorire la vigilanza e l'attenzione senza necessariamente sopprimere la melatonina. Questi risultati sottolineano la complessità delle interazioni tra le diverse caratteristiche della luce e le risposte umane, evidenziando la necessità di ulteriori

studi per comprendere meglio questi processi<sup>[4]</sup>. Queste variabili possono essere regolate durante la fase progettuale di un sistema di illuminazione.

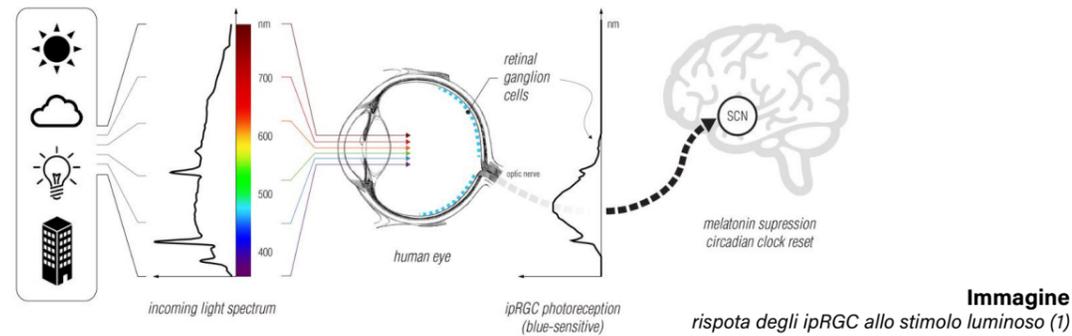
Oltre alle proprietà fisiche della radiazione elettromagnetica, esiste un altro insieme di fattori che influenzano le risposte non visive. Questi includono le caratteristiche del sistema visivo umano, come le componenti oculari e neurali, le risposte soggettive agli stimoli luminosi, i riflessi, la dilatazione pupillare, la sensibilità e la distribuzione dei fotorecettori e molti altri.

Tuttavia, le informazioni derivanti da studi in contesti reali sono limitate. La ricerca su casi esistenti è complicata dalla presenza di numerosi fattori esterni non controllabili. Ad esempio, la luce naturale è un fenomeno dinamico e complesso, con radiazioni elettromagnetiche che variano da un ambiente all'altro, da un giorno all'altro e persino da un anno all'altro; inoltre, è difficile misurare accuratamente l'esposizione alla luce a livello individuale sul campo. Questi elementi sono anche fortemente influenzati dall'ambiente esterno, che coinvolge altri sistemi sensoriali e percettivi.

Ogni persona è unica, e questa diversità si riflette nei vari ritmi circadiani individuali, come mostrato nei due diagrammi sottostanti. Questi diagrammi illustrano, attraverso due indicatori principali: la temperatura corporea interna e l'inizio del rilascio serale di melatonina, le differenze osservate in un campione di individui analizzati.



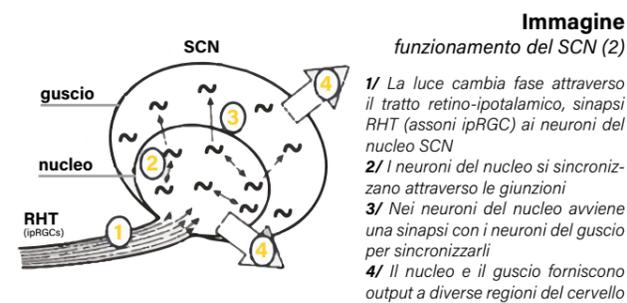
## 3.2 Risposta fotonica alla luce/



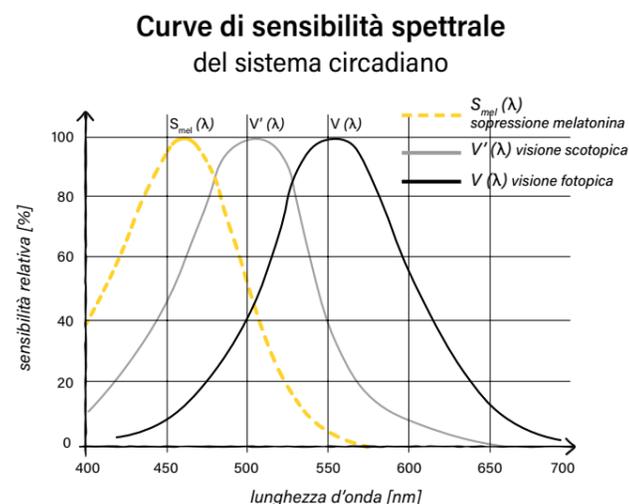
Abbiamo osservato che, a differenza delle risposte visive regolate da bastoncelli e coni, le risposte non visive sono gestite principalmente dalle cellule gangliari retiniche intrinsecamente fotosensibili (ipRGC).<sup>[27]</sup> Queste cellule, grazie alla melanopsina, un fotopigmento opsina, convertono i segnali luminosi in segnali neurochimici, che vengono poi inviati ai centri cerebrali non visivi. Questo processo è fondamentale per la regolazione dei ritmi circadiani e del ciclo luce-buio dell'organismo.<sup>[24]</sup>

Questi meccanismi di rilevamento della luce da parte dei fotorecettori si distinguono in una differente sensibilità spettrale, specifica ad ognuno. La sensibilità spettrale dei fotorecettori ipRGC, responsabili della riduzione della melatonina, ha un picco a 460 nm, in confronto a quella della visione basata su bastoncelli o coni, con una sensibilità di picco ipotizzata da 447 a 484 nm per la risposta scotopica e ad una sensibilità di picco a 555 nm per la visione fotonica, come nel grafico sottostante. Il sistema circadiano risulta più sensibile ad una radiazione luminosa con lunghezza d'onda più corta (regione blu dello spettro), mentre il sistema visivo si rivela più sensibile ad una lunghezza d'onda più lunga (regione verde dello spettro).<sup>[4]</sup>

La fotorecezione della melanopsina è molto meno sensibile a quella dei bastoncelli o dei coni. Tuttavia, una volta superata la soglia per l'attivazione della melanopsina, la risposta intrinseca alla luce varia con l'intensità dello stimolo su diversi ordini decimali. Questo significa che la risposta degli ipRGC alla fototrasduzione della melanopsina può avvenire anche a livelli di illuminazione molto bassi. Ad esempio, sebbene inizialmente si ritenesse che fossero necessari 2500 lux per sopprimere la melatonina notturna, ricerche successive hanno rivelato che, in particolari condizioni, anche solo 1 lux o meno può avere questo effetto. Gli ipRGC, grazie all'espressione della melanopsina, sono direttamente sensibili alla luce e possono rispondere agli stimoli luminosi anche in isolamento dal resto della retina, per poi inviare un segnale integrato ai centri cerebrali che non formano immagini.<sup>[24]</sup>



Quando la luce viene assorbita dai fotorecettori retinici, gli ipRGC segnalano l'ora biologica al nucleo soprachiasmatico (SCN) dell'ipotalamo per sopprimere la produzione di melatonina, modificando lo stato di sonnolenza, di veglia e di molte altre funzioni più fisiologiche. Essi interagiscono anche con altre cellule gangliari della retina per trasmettere la luce visiva e non visiva.<sup>[28]</sup> Questo chiarisce come lo stimolo luminoso sia strettamente correlato alla soppressione della melatonina, un ormone fondamentale per la regolazione del ritmo circadiano.<sup>[4]</sup>



## 3.3 Effetti della luce sul corpo/

È evidente la connessione intrinseca tra l'esposizione alla luce, la soppressione della melatonina e le relative risposte circadiane. Queste risposte biologiche sono legati a stati psicologici e fisici, comuni a tutti gli individui, e si suddividono in due categorie: gli effetti a breve termine che si manifestano durante il corso della giornata, e quelli a lungo termine che possono emergere anche dopo anni. Tuttavia, lo stimolo luminoso non genera sempre le stesse risposte. Ad esempio, la luce blu al mattino favorisce il benessere e il normale ritmo biologico, mentre l'esposizione notturna alla luce blu può disturbare il ritmo del sistema circadiano, influenzando gli stati soggettivi di vigilanza e sonnolenza.<sup>[25]</sup>

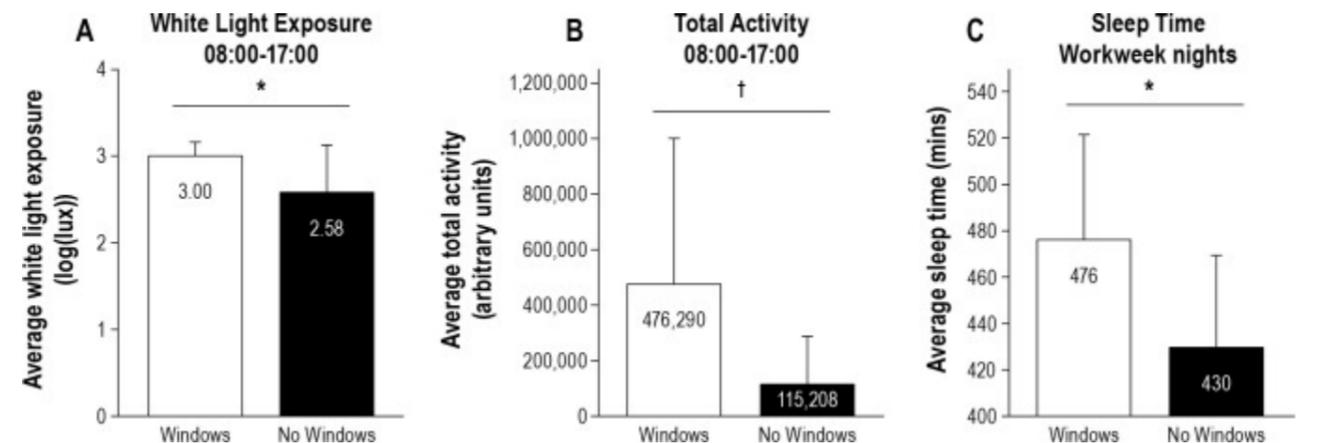
Inoltre, il sistema circadiano ha la capacità di memorizzare le esposizioni alla luce che si verificano durante la giornata. L'esposizione alla luce nelle prime ore del giorno influisce sull'efficacia biologica nelle ore successive. Analogamente, condizioni di scarsa illuminazione possono avere effetti negativi sulla qualità del sonno, con variazioni individuali. Una giusta esposizione alla luce naturale aiuta a mantenere il nostro orologio biologico, regolato dallo spettro della luce blu. In ambienti con poca luce, la mancanza di luce blu diurna favorisce l'accumulo di melatonina, che può causare sonnolenza e ridurre la produttività.

Nella progettazione del sistema di illuminazione artificiale è necessario integrarlo con l'illuminazione naturale, considerando le variazioni nello spettro cromatico, nell'intensità e nella direzionalità della luce durante il giorno, per supportare adeguatamente il sistema circadiano individuale.<sup>[4]</sup> Diversi studi condotti in vari contesti confermano che l'esposizione a livelli elevati di luce, come quella tipica degli ambienti illuminati da

abbondante luce diurna, può apportare benefici alla salute e al benessere, incidendo positivamente anche sul comportamento sociale e sulle prestazioni cognitive degli occupanti.<sup>[25]</sup> Questi effetti soggettivi non dipendono esclusivamente dallo stimolo luminoso, ma anche da altri elementi come le caratteristiche dello spazio fisico circostante.<sup>[4]</sup>

I neurotrasmettitori chiave che vengono diffusi nel cervello sono coinvolte nelle reti neurali. Ad esempio, la serotonina è un neurotrasmettitore cruciale legato all'umore e alla regolazione circadiana, mentre la dopamina regola i circuiti di ricompensa del cervello (motivazione, attenzione) e centri motori. Il legame tra disturbi psicologici e ritmi circadiani è noto da tempo, alterando i cicli sonno-veglia e l'umore periodico. Recenti studi hanno dimostrato che le interruzioni del ritmo circadiano, causate da lavoro a turni o esposizione alla luce notturna, possono promuovere sintomi psicologici nei soggetti vulnerabili.<sup>[28]</sup>

In quest'ottica, uno studio ha analizzato l'effetto dell'esposizione alla luce naturale negli ambienti di lavoro sul benessere percepito, confrontando la situazione di vicinanza a una finestra con quella di distanza o assenza di finestre. I risultati indicano che una maggiore esposizione alla luce naturale durante le ore lavorative, resa possibile dalla presenza di una finestra (A), favorisce un aumento della produttività dei lavoratori (B) e migliora la qualità del sonno (C). Pertanto, l'esposizione alla luce naturale influisce sia sulla produttività nell'ambiente di lavoro sia sulle condizioni fisiologiche del lavoratore, come nella figura sottostante.<sup>[29]</sup>

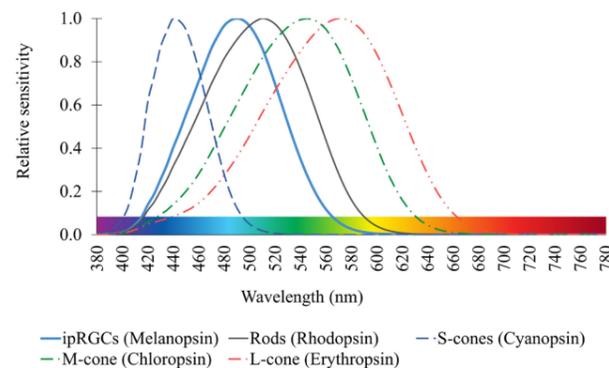


### 3.4 Quantificazione della luce circadiana/

Misurare la luce che interagisce con il sistema circadiano utilizzando una singola unità unidimensionale, come il lux fotopico, è una sfida complessa, poiché non riflette adeguatamente tutte le risposte circadiane in ogni situazione. La sensibilità spettrale di questo sistema fotorecettivo varia a seconda del contributo predominante degli ipRGC, combinato con quello degli altri fotorecettori. Poiché non esiste un metodo preciso per quantificare la luce in relazione alle risposte non visive, una possibile soluzione è quella di registrare le esposizioni alla luce nel modo più completo possibile, utilizzando la distribuzione della potenza spettrale (SPD). Le risposte non visive possono così essere determinate da una o più delle cinque distinte rappresentazioni biologiche dell'irradiazione: illuminamento rodopico, melanopico, cianopico, cloropico ed eritropico, come illustrato nella tabella sottostante. [24]

Photoreceptor	Photopigment	Spectral sensitivity function	Unit of measure*
Short-wavelength (S) cones	S-cone photopsin (cyanolabe)	Cyanolabe response function $N_{sc}(\lambda)$	Cyanopic illuminance (cyanopic-lux)
Medium-wavelength (M) cones	M-cone photopsin (chlorolabe)	Chlorolabe response function $N_{mc}(\lambda)$	Chloropic illuminance (chloropic-lux)
Long-wavelength (L) cones	L-cone photopsin (erythrolobe)	Erythrolobe response function $N_{lc}(\lambda)$	Erythropic illuminance (erythropic-lux)
ipRGCs (intrinsic photosensitivity)	Melanopsin	Melanopsin response function $N_m(\lambda)$	Melanopic illuminance (melanopic-lux)
Rods	Rod opsin	Rod opsin response function $N_r(\lambda)$	Rhodopic illuminance (rhodopic-lux)

Curve di sensibilità spettrale di cinque fotorecettori con i rispettivi fotopigmenti (3)



La luce, pur essendo parte dello spettro elettromagnetico compreso tra 380 e 780 nm, non può essere misurata in modo adeguato solo con misure radiometriche a causa delle variazioni notevoli negli effetti che le radiazioni hanno sulla vista e sui

sistemi non visivi in base alla lunghezza d'onda, come mostrato nel grafico. Questi effetti coinvolgono principalmente i fotorecettori ipRGC, insieme ai tre tipi di coni (Short, Medium e Long) e ai bastoncelli, che sono fondamentali per entrambi i percorsi visivi e non visivi.

In fotometria, la distribuzione spettrale della potenza luminosa viene valutata attraverso l'efficienza luminosa spettrale dell'occhio umano  $V(\lambda)$ . Per quanto riguarda le metriche circadiane, invece, la distribuzione della potenza luminosa è misurata attraverso una funzione di efficienza circadiana spettrale. Al momento, manca una curva circadiana standard universalmente riconosciuta, il che complica ulteriormente la valutazione.

Per quanto i meccanismi di risposta del sistema circadiano siano complessi e non ancora del tutto chiariti, recentemente sono stati proposti due modelli per la valutazione degli effetti non visivi della luce:

Il primo modello si basa sull'*Irradiance Toolbox* di Lucas et al., che quantifica lo stimolo luminoso basandosi sulla risposta spettrale dei fotopigmenti nei fotorecettori (bastoncelli, coni e ipRGC). Attraverso questo approccio, è possibile calcolare i valori equivalenti di illuminamento "α-opico" per ciascuno dei cinque fotopigmenti nell'occhio umano citati in precedenza. Ed è su questo modello che il WELL Building Standard v2 (WELL) introduce il Melanopic Ratio (R) che permette di calcolare l'illuminamento melanopico equivalente basato sulla distribuzione spettrale calcolata della luce percepita dall'occhio. Tuttavia, poiché questo metodo non è riconosciuto dal Sistema Internazionale di Unità (SI), il CIE ha introdotto il Melanopic Equivalent Daylight Illuminance (mel-EDI) che indica l'illuminamento verticale al livello dell'occhio dovuto alla radiazione D65 (6500K) necessaria per ottenere lo stesso stimolo ipRGCs della sorgente considerata. Il secondo modello, invece, si basa sul *Model of Human Circadian Phototransduction* di Rea et al. che introduce il circadian light (CL) noto anche come stimolo circadiano (CS). Questo modello consente di calcolare l'efficacia di uno stimolo lu-

minosio nel sopprimere la secrezione di melatonina, con un picco di sensibilità a 450 nm nello spettro elettromagnetico. Per quantificare lo stimolo circadiano, vengono presi in considerazione i principali parametri relativi alla luce, misurati con il CS, che influenzano la regolazione del ritmo circadiano: il tempo di esposizione e la sua durata, l'intensità luminosa e lo spettro della luce. [30]

Entrambi i metodi richiedono due input, la distribuzione della potenza spettrale di una sorgente luminosa (SPD) e l'irradianza sul piano verticale in corrispondenza dell'occhio.

Pertanto, è essenziale prestare maggiore attenzione alla progettazione dell'illuminazione negli ambienti interni per rispondere adeguatamente alle esigenze non visive degli utenti. Un'illuminazione ben studiata può migliorare le loro risposte biologiche durante la giornata, favorendo il benessere. Questo non solo contribuisce ad una migliore salute mentale e fisica, ma può anche incrementare la produttività e il comfort lavorativo, riducendo al contempo il rischio di affaticamento visivo e di altri disturbi correlati ad un'illuminazione inadeguata. [26]

#### Metriche di illuminazione circadiana

##### Circadian Stimulus / CS

Lo stimolo circadiano (CS) caratterizza la risposta umana alla luce in termini di melatonina. È una misura che determina l'irradianza spettrale della luce incidente sulla cornea, tramite la soppressione acuta della melatonina dopo un'ora di esposizione ad una fonte luminosa durante il giorno, influenzando così il livello melatonina di notte. [31] Considerando l'esposizione ad un'ora, il CS quantifica l'efficacia dell'irradianza ponderata spettralmente sulla cornea mediante delle soglie che

vanno da CS = 0.1 (nessuna soppressione di melatonina) a CS = 0.7 (la massima soppressione di melatonina teoricamente ottenibile). La linea guida UL 24480 stabilisce invece un valore ottimale dello stimolo circadiano pari a CS ≥ 3 per l'inizio mattina (raccomandato per i day-active people), e che si riduce a CS < 0.1 la sera.

##### Equivalent melanopic lux / EML

È la metrica adottata dal *WELL standard v2*, che ha lo scopo di misurare lo stimolo dei fotorecettori coinvolti negli effetti non visivi della luce del sistema circadiano (gli ipRGC, con un massimo a 490nm) rispetto a quelli da visione tradizionali del sistema visivo (i coni, massimo a 555nm). Questo concetto tiene conto della risposta visiva fotopica e melanopica.

Il rapporto tra visual lux e Equivalent Melanopic Lux (EML) può essere calcolato attraverso un fattore di conversione, il Melanopic Ratio (R):

$$EML = R * Ev [-]$$

(Ev, illuminamento verticale a livello dell'occhio).

##### Melanopic equivalent daylight illuminance / mel-EDI

Il mel-EDI è la metrica ufficiale adottata nella normativa *CIE S026/E:2018*, e indica l'effetto di una sorgente luminosa su ciascun fotorecettore, come gli ipRGC, rispetto a quello prodotto dall'illuminante D65, α-EDI (D65). Definisce quanti lux di luce naturale sono necessari per ottenere l'effetto melanopico di risposta con una data fonte, il rapporto adimensionale è uguale a 1 quando lo spettro della luce è conforme a D65.

Esiste una relazione con l'Equivalent Melanopic Lux pari a: **mel-EDI (D65) = EML \* 0.9058** (Ev) [-] Ci sono tre livelli di raccomandazione del mel-EDI con lo scopo di fornire obiettivi pratici che minimizzino le risposte non visive inappropriate nell'ambiente del sonno (mel-EDI < 1 lux), e le riducano per quanto possibile tre ore prima del sonno (m-EDI < 10 lux) e massimizzando al tempo stesso gli effetti rilevanti nel periodo intermedio di ore diurne (m-EDI > 250 lux). [32]

# 04

## Requisiti per la luce diurna

### Quadro generale/

Per quanto riguarda gli aspetti visivi e non visivi della luce naturale trattati finora, esiste un quadro normativo che mira a promuovere il benessere delle persone negli ambienti interni e a creare un contesto favorevole alla salute e alla produttività. Inoltre, è evidente che i requisiti specifici per diversi ambienti, come quelli industriali e scolastici, variano. Questo implica la necessità di soluzioni di illuminazione adattate alle esigenze particolari di questi spazi, con requisiti che si aggiornano frequentemente. Gli spazi devono essere flessibili per rispondere a scenari d'uso ed esigenze visive in costante evoluzione.

Si possono evidenziare diversi livelli di in cui vengono applicate queste normative tecniche, come indicato nella Direttiva 98/34/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 22 giugno 1998, che distingue tre categorie:

- **ISO:** norme internazionali emesse dall'Organizzazione Internazionale per la Normazione.
- **EN:** norme europee sviluppate dal Comitato Europeo di Normazione (CEN) con l'obiettivo di uniformare le norme tecniche in Europa e adattare ai paesi membri (come l'UNI in Italia).
- **UNI:** norme nazionali emesse dall'Ente Na-

zionale Italiano di Unificazione, un organismo senza fini di lucro.

Altre normative rilevanti per i requisiti di illuminazione includono gli standard elaborati dalla Commissione Internazionale dell'Illuminazione (**CIE**), riconosciuti a livello globale, che forniscono linee guida fondamentali per affrontare le problematiche legate alla luce in vari contesti.

Oltre alle normative tecniche, è importante considerare anche i protocolli, come **LEED** e **WELL**, che aggiungono una dimensione ulteriore alla valutazione dei progetti edilizi, integrando aspetti di sostenibilità ambientale, efficienza energetica e attenzione alla salute e al benessere degli occupanti.

Nel presente capitolo verranno esaminate le normative e i requisiti più pertinenti, fornendo una panoramica che servirà come base per la sezione successiva dedicata alle simulazioni. In particolare, verranno definiti i requisiti per l'illuminazione naturale e per l'illuminazione melanopica, offrendo valori di riferimento essenziali per la corretta valutazione delle prestazioni luminose degli spazi interni.

## 4.1 Quadro normativo e legislativo /

### Normative UNI, UNI EN

La norma **UNI EN 12464-1:2021** "Illuminazione dei Luoghi di Lavoro - Parte 1: Posti di lavoro in interni" <sup>[33]</sup> specifica i requisiti di illuminazione per persone in posti di lavoro in interni. Per ottenere una corretta illuminazione è necessario soddisfare tre esigenze fondamentali, quali il comfort visivo (sensazione di benessere), la prestazione visiva (svolgimento del compito anche in situazioni difficili e protratte) e la sicurezza. I criteri principali determinati dalla norma sono: gli effetti di abbagliamento, di resa cromatica, i livelli di illuminamento, la distribuzione delle luminanze e la presenza di ombre. Questa norma non fornisce requisiti illuminotecnici per luoghi di lavoro all'aperto o per l'illuminazione di emergenza (EN 1838 e 13032), ma solamente sugli effetti visivi e non visivi della luce sulla performance e sul benessere delle persone.

#### Estratto della UNI EN 12464-1:2021 - Illuminamento

Illuminamento dell'area del campo visivo (lx)	Illuminamenti minimi dell'area circostante (lx)	Illuminamento della zona di sfondo (lx)
≥ 750	500	> 500/3
500	300	> 300/3
300	200	> 200/3
200	150	> 150/3
≤ 150	≤ 150	≤ 150/3

#### Estratto UNI EN 12464-1:2021 - Illuminazione:

$E_m, U_0, R_a, R_{UGL}, E_{m,z}, E_{m,wall}, E_{m,ceiling}$

Tabella 13 - logistica e magazzini

N. rif.	Tipo di zone, compito o attività	Progettazione dell'area del compito o dell'attività			Requisiti di progettazione della stanza o dello spazio				Requisiti specifici
		$E_m$ [lx]	$U_0$ [-]	$R_a$ [-]	$R_{UGL}$ [-]	$E_{m,z}$ [lx]	$E_{m,wall}$ [lx]	$E_{m,ceiling}$ [lx]	
13.1	Area di carico e scarico	200	0,40	80	25	50	30	30	
13.2	Area di imballaggio	300	0,50	80	25	100	100	30	
13.3	Configurazione e rimovimentazione	750	0,60	80	22	150	150	30	
13.4	Deposito merci aperto	200	0,40	80	25	50	50	30	
13.5	Magazzino stoccaggio - pavimento	150	0,50	80	25	-	-	30	Illuminamento a livello del pavimento
13.6	Magazzino stoccaggio - fronte scaffalatura	75	0,40	80	-	-	-	-	Sul frontale dello scaffale del corridoio
13.7	Corridoio logistico centrale (traffico pesante)	300	0,60	80	25	100	100	30	Illuminamento a livello del pavimento
13.8	Zone automatizzate (senza personale)	75	0,40	80	25	-	-	-	Illuminamento a livello del pavimento

Il nuovo standard europeo **EN 17037:2018** "Luce diurna negli edifici" <sup>[34]</sup> si interessa alla luce diurna negli edifici. A livello europeo è la prima normativa che tratta soprattutto sulla progettazione e sull'apporto di luce diurna, laddove non è presente alcuna norma esistente nei paesi europei che affronta questo tema.

La norma introduce la rilevanza della luce per la salute e il benessere degli occupanti, in modo da fornire un'illuminazione sufficiente per svolgere le attività e garantire un contatto con l'esterno. Fornire livelli adeguati di luce naturale cambia l'obiettivo della progettazione dell'edificio e il ruolo dei vetri nei progetti, ai fini di migliorare il comfort degli occupanti e l'efficienza energetica complessiva dell'edificio.

Il posizionamento ragionato degli elementi vetrati, compresi sistemi zenitali e verticali, nell'ambito della progettazione dell'edificio fornisce la migliore qualità e quantità di luce naturale. Con la necessità quindi di avere aperture ben distribuite negli spazi interni, bisogna prendere in considerazione anche la riduzione dell'illuminazione artificiale per avere un certo equilibrio tra perdita di calore e guadagni solari, insieme a raccomandazioni per la durata preferibile dell'esposizione alla luce solare ed un metodo di calcolo utile per verificare l'eventuale presenza di discomfort visivo. Vengono inoltre forniti i livelli di raccomandazione minimi, medi ed elevati.

La valutazione della luce diurna viene affrontata secondo quattro aspetti: la disponibilità di luce naturale, la vista verso l'esterno, l'accesso alla luce solare e la protezione da rischi di abbagliamento. Sebbene scritte per edifici ex-novo, queste direttive possono essere applicate anche per interventi su edifici esistenti.

#### Disponibilità della luce diurna

L'apporto di luce diurna, o di livelli di illuminamento, consente agli utenti di svolgere le loro

attività e assume un ruolo nel determinare la probabilità dell'illuminazione artificiale accesa. Essa dipende dalle possibili ostruzioni esterne, dalle proprietà di trasmittanza del vetro, dallo spessore e distribuzione delle pareti interne. La valutazione può avvenire tramite modelli basati sul clima o tramite calcolo del Fattore di Luce Diurna (DF) su un piano di riferimento definito ad un'altezza di 0,85 m dal suolo, in questo caso la norma fornisce dei valori di illuminamento che variano in base alla località di progetto, come riportato nella tabella A.1 che segue.

#### Vista verso l'esterno

Gli utenti dell'edificio dovrebbero avere una visione ampia e chiara dell'esterno. Secondo la norma EN 17037, la qualità della vista considera la larghezza e la distanza esterna della vista, così come per gli "strati" della vista (cielo, paesaggio che include gli edifici fronteggianti, e terreno). Per garantire quindi qualità della vista, devono essere soddisfatti quattro criteri: la vista dovrebbe essere percepita in modo chiaro in base al tipo di vetro utilizzato, la larghezza della vista dovrebbe garantire un angolo di visione orizzontale maggiore di un livello minimo definito, mentre la distanza dalla vista dall'esterno e il numero di strati di vista sono ciascuno misurati in un unico metodo e dovrebbero rispettare un certo livello minimo, come riportato nella tabella A.5 che segue.

#### Accesso alla luce solare

Calcolare l'esposizione alle radiazioni solari è un fattore di comfort per gli utenti. La norma EN 17037 fornisce il requisito di un numero minimo di ore al giorno nel periodo di febbraio-marzo in cui si incoraggia l'ingresso di luce solare diretta nell'ambiente interno, in quanto negli altri mesi causa discomfort, come viene indicato nella tabella A.6 successivamente. È possibile stabilire l'esposizione giornaliera alla luce solare nell'am-

biente attraverso un metodo di calcolo manuale o l'utilizzo di software adeguati, altrimenti direttamente sul sito dell'edificio mediante rilievi geometrici e fotografici.

#### Protezione dall'abbagliamento

La prevenzione all'abbagliamento, fenomeno che crea una sensazione di discomfort visivo dato dall'esposizione eccessiva alla luce solare diretta oppure ad alti livelli di luminanza in contrasto tra aree in ombra ed aree in luce, è essenziale per eliminare qualunque rischio di abbagliamento all'interno degli ambienti. In tal senso è necessario tener in considerazione l'uso di sistemi di ombreggiamento per ridurre il rischio di disturbo visivo con la trasmissione o la riflessione delle radiazioni solari dirette. In questo caso si utilizza un metodo di calcolo preciso sulla probabilità di abbagliamento della luce diurna (DGP) che definisce delle soglie standard di valori da non superare, come riportato nella tabella A.7, ed in conseguenza scegliere il materiale del dispositivo di schermatura solare adeguato alle necessità.

La norma **UNI EN 15193-1:2018** dal titolo "Prestazione energetica degli edifici - Requisiti energetici per illuminazione - Parte 1: Specificazioni, Modulo M9" <sup>[35]</sup> vigente alla valutazione delle prestazioni energetiche degli impianti di illuminazione in edifici residenziali e non, propone una metodologia di calcolo LENI (Lighting Energy Numeric Indicator) per definire il fabbisogno energetico tenendo conto della disponibilità di luce naturale. Quello che interessa è anche la conseguenza della condizione di illuminazione naturale che può avere sul fabbisogno energetico dell'edificio.

Il processo di elaborazione per il progetto illuminotecnico è definita dalla norma **UNI 11630:2016** "Luce e illuminazione – Criteri per la stesura del progetto illuminotecnico" [36] individua dei parametri qualitativi per il corretto funzionamento in base alle esigenze degli occupanti, e offrire una costante condizione di comfort visivo relazionandosi con il contesto.

**CAM - decreto 23 giugno 2022**

I Criteri Ambientali Minimi (CAM) sono requisiti ambientali minimi negli edifici pubblici di nuova costruzione, che riprendono i requisiti previsti all'interno della norma EN 17037 in particolare quello che riguarda i valori dell'sDA. Nella sezione 2.4.7 è affrontato il tema di "Illuminazione naturale" dove viene regolato che: "Per garantire una distribuzione minima dell'illuminazione naturale all'interno dei locali regolarmente occupati, per qualsiasi destinazione d'uso, deve essere garantito per almeno 50% dello dello spazio un illuminamento di luce naturale di almeno 300 lx (prestazione sufficiente), un illuminamento di almeno 500 lx (prestazione buona), o un illuminamento di almeno 750 lx (prestazione ottima). Tali valori devono essere garantiti per almeno la metà delle ore di luce diurna." [37]

**Tabella A.1 - Raccomandazioni per la fornitura di luce diurna dalle aperture nelle superfici verticali e inclinati**

Livello di raccomandazione per le aperture verticali e inclinati	Illuminamento target $E_T$ [lx]	Frazione di spazio per il livello target $F_{plane}$ [%]	Illuminamento minimo target $E_{TM}$ [lx]	Frazione di spazio per il minimo target $F_{plane}$ [%]	Frazione del fattore di luce diurna $F_{time}$ [%]
Minimo	300	50 %	100	95 %	50 %
Medio	500	50 %	300	95 %	50 %
Elevato	750	50 %	500	95 %	50 %

*Nota: nella Tabella A.3 fornisce il fattore di luce diurna target (DT) e il fattore di luce diurna minimo target (DTM) che corrispondono rispettivamente al livello di illuminamento target e all'illuminamento minimo target, per le capitali CEN.*

**Tabella A.5 - Valutazione della vista esterna da una determinata posizione**

Livello di raccomandazione per una vista esterna	Parametro <sup>a</sup>		
	Angolo di vista orizzontale	Distanza esterna della vista	Numero di strati che devono essere visibile per almeno 75% dell'area utilizzata: cielo - paesaggio (urbano e/o naturale) - terreno
Minimo	≥ 14°	≥ 6,0 m	Almeno lo strato paesaggio è incluso
Medio	≥ 28°	≥ 20,0 m	Lo strato paesaggio e un'altro in aggiunta devono essere presenti nella stessa apertura
Elevato	≥ 54°	≥ 50,0 m	Tutti gli strati devono essere inclusi nella stessa apertura

<sup>a</sup> Per uno spazio con una stanza di profondità maggiore di 4 m, è raccomandato che la rispettiva somma delle dimensioni della/e apertura/e sia almeno di 1,0 m \* 1,25 m (larghezza \* altezza).

**Tabella A.6 - Raccomandazione per l'esposizione giornaliera alla luce solare**

La raccomandazione è che uno spazio riceva la luce solare per una durata stabilita nella Tabella A.6 (si suppone l'assenza di nuvole) in un giorno scelto tra il 1° Febbraio e il 21 Marzo. La Tabella A.6 propone tre livelli di esposizione alla luce solare. Per ulteriori dettagli vedere l'allegato D.

Nell'applicazione della raccomandazione ad un intero edificio residenziale, la proposta è che almeno una stanza debba avere almeno un'esposizione alla luce solare in accordo secondo la Tabella A.6.

Livello di raccomandazione per l'esposizione solare	Esposizione alla luce solare
Minimo	1,5 h
Medio	3,0 h
Elevato	4,0 h

**Tabella A.7 - Raccomandazione per la protezione dall'abbagliamento: proposta di diversi livelli di soglia  $DGP_{e < 5\%}$**

La probabilità di abbagliamento da luce naturale (DGP) non deve superare un valore massimo superiore alla frazione  $F_{DGP,exceed} = 5\%$  del tempo di utilizzo dello spazio.

Nella Tabella A.7, vengono proposti diversi valori di  $DGP_{e < 5\%}$  per diversi livelli di protezione dall'abbagliamento. Il livello minimo raccomandato è che il DGP non deve avere un valore superiore a 0,45 in più del 5% del tempo di occupazione nello spazio interessato.

Livello di raccomandazione per la protezione dall'abbagliamento	$DGP_{e < 5\%}$
Minimo	0,45
Medio	0,40
Elevato	0,35

## 4.2 Protocolli nazionali e internazionali /

### Protocollo ITACA - UNI/PdR 13.2:2019

Il documento specifica i criteri sui quali si fonda il sistema di analisi multicriterio per la valutazione della sostenibilità ambientale degli edifici non residenziali sul suolo italiano, oggetto di nuova costruzione o di ristrutturazioni, ai fini della loro classificazione attraverso l'attribuzione di un punteggio di prestazione. Per questo criterio l'indicatore di prestazione individuato è il fattore di luce diurna (calcolato secondo l'appendice A della norma UNI 10840).

Nella passata versione dell'anno 2015, era presente un diverso procedimento di calcolo per il Fattore medio della luce diurna nelle aperture verticali ed orizzontali.

Questa norma, dal 2015, ha subito un aggiornamento che rivede la suddivisione degli argomenti, in particolare all'interno della categoria D.4 "Benessere visivo" nell'area di valutazione del punto D "Qualità ambientale indoor" che

coinvolge non solo la singola unità immobiliare, ma l'intero edificio. Non si parla più di "Illuminazione naturale" ma di "Sufficienza della luce naturale", per quanto riguarda gli edifici non residenziali il punteggio viene attribuito attraverso un altro indicatore di prestazione corrispondente al rapporto tra il Fattore medio di luce diurna dell'edificio da valutare ed il Fattore medio di luce diurna dell'edificio limite (che rispetta il valore limite di riferimento del fattore di luce diurna secondo la destinazione d'uso dell'ambiente dato dalla normativa). Viene fornita una scala di prestazione con rispettivi valori e punteggi corrispondenti: è negativo con un punteggio di -1 nel caso in cui  $FLD_m < -1$ , sufficiente con 0 punti nel caso in cui  $FLD_m \geq 0$ , 3 punti con  $FLD_m \geq 3$  con un giudizio buono, ed infine 5 punti se  $FLD_m \geq 5$  con una prestazione ottima, come riportato nella tabella D.3.2 che segue. <sup>[38]</sup>

SCHEDA CRITERIO D.3.2 - SUFFICIENZA DELLA LUCE NATURALE (2019)  
EDIFICI NON RESIDENZIALI

QUALITÀ AMBIENTALE INDOOR		NUOVA COSTRUZIONE RISTRUTTURAZIONE	D.3.2
D.3 Comfort visivo			
Sufficienza della luce naturale			
Edifici per uffici	Edifici scolastici		Edifici ricettivi
AREA DI VALUTAZIONE		CATEGORIA	
D. Qualità ambientale indoor		D.3 Comfort visivo	
ESIGENZA		PESO DEL CRITERIO	
Ottimizzare la disponibilità di luce naturale nel corso dell'anno solare garantendo un adeguato livello di comfort visivo e riducendo l'impiego della luce artificiale		nella categoria completo nel sistema	
INDICATORE DI PRESTAZIONE		UNITÀ DI MISURA	
Indice di categoria relativo al livello di sufficienza della luce naturale ( $Z_m$ )		-	
SCALA DI PRESTAZIONE			
	Valore indice	PUNTI	
NEGATIVO	-1	-1	
SUFFICIENTE	0	0	
BUONO	3	3	
OTTIMO	5	5	

### Protocollo LEED

Il LEED (*the Leadership in Energy and Environmental Design*) è un protocollo accertato a livello mondiale. Definisce un sistema di classificazione, sviluppato dall'organizzazione U. S. Green Building Council (USGBC) nel 1998, che prevede l'assegnazione di un punteggio nella progettazione integrata sostenibile sull'intero edificio considerato, dalla sua progettazione alla sua costruzione.

Nella versione **LEED v4.1 "Building design and Construction"** <sup>[39]</sup> vi è introdotto un capitolo incentrato sulla presenza e l'efficacia della luce naturale come credito per la qualità dell'ambiente interno (*EQ Credit: Daylight*), con lo scopo di "connettere gli occupanti dell'edificio con l'esterno, rafforzare i ritmi circadiani e ridurre

l'uso dell'illuminazione elettrica introducendo la luce diurna nello spazio".

Sono definiti tre diversi parametri per la verifica dell'apporto di luce naturale: il valore medio dell'**sDA**, **ASE** e **E<sub>m</sub>**. Le tabelle sottostanti indicano i valori necessari ad ottenere un punteggio da 1pt o 3pt, dai valori meno ai più efficaci, utilizzando quei tre parametri. Nella versione del 2023, la soglia dell'ASE > 10% non è più obbligatoria, ma per gli ambienti che sono al di sopra di questo valore è necessario specificare in che modo sono progettati per trattare l'abbagliamento presente. Inoltre, il protocollo prevede un credito sulla qualità della vista che garantisce una linea di visione diretta verso l'esterno mediante un vetro trasparente per almeno 75% di tutta la superficie regolarmente occupata.

Tabella - Valori limite di sDA, ASE, E<sub>m</sub> nel protocollo LEED

Opzione 1: Spatial Daylight Autonomy (sDA 300/50%) e Annual Sunlight Exposure (ASE 1000/250)

Nuove costruzioni, Core & Shell, scuole, locali commerciali, data center, magazzini e centri di distribuzione, attività ricettive		Strutture sanitarie	
sDA (area del piano regolarmente occupata)		sDA (area perimetrale del piano)	
55 %	1 punto	75 %	1 punto
75 %	2 punti	90 %	2 punti

Opzione 2: Simulazione per verificare 300 lux < E<sub>m</sub> < 3000 lux

Nuove costruzioni, Core & Shell, scuole, locali commerciali, data center, magazzini e centri di distribuzione, attività ricettive		Strutture sanitarie	
Percentuale di area regolarmente occupata		Percentuale dell'area perimetrale del piano	
75 %	1 punto	75 %	1 punto
90 %	2 punti	90 %	2 punti

Opzione 3: Misurazione per verificare 300 lux < E<sub>m</sub> < 3000 lux

Nuove costruzioni, Core & Shell, scuole, locali commerciali, data center, magazzini e centri di distribuzione, attività ricettive		Strutture sanitarie	
Percentuale di area regolarmente occupata		Percentuale dell'area perimetrale del piano	
75 %	1 punto	75 %	1 punto
90 %	2 punti	90 %	2 punti

## Protocollo WELL



Dagli standard alle norme presentate che definiscono requisiti necessari per una buona illuminazione degli ambienti interni, esistono anche protocolli che procurano linee guida specifiche per i progettisti. Lo scopo principale è quello di creare ambienti più consapevoli dell'ambiente circostante e migliorare le condizioni di benessere e comfort delle persone. Rispetto al protocollo LEED (Green Building Rating System), visto prima che offre pochi criteri sul tema della luce, il protocollo WELL invece introduce un capitolo intero sul "Light" trattando diversi aspetti della luce naturale mediante il sistema visivo e il

### Feature L03 - Circadian Lighting Design

Questa parte richiede che i progetti forniscano agli utenti un'esposizione adeguata alla luce per mantenere la salute circadiana e allineare il ritmo circadiano con il ciclo giorno-notte. Per le postazioni di lavoro regolarmente occupate durante il giorno, l'illuminazione elettrica viene utilizzata per raggiungere le seguenti soglie:

**1.** I seguenti livelli di illuminamento melanopico sono raggiunti per almeno quattro ore (a partire da mezzogiorno al più tardi) ad un'altezza di

sistema circadiano.

Il WELL stabilisce istruzioni sull'illuminazione per garantire livelli di luce fotopica e melanopica al fine di controllare meglio la regolazione del sistema circadiano e offrire migliori condizioni di sonno, incentivando l'esposizione alla luce naturale e favorire la salute visiva, mentale e biologica delle persone. Si è preso come riferimento il **Protocollo WELL Light v2 12, Q1-Q2 2023** considerando soprattutto: <sup>[40]</sup>

/ **Feature L03 - Circadian Lighting Design**

/ **Feature L06 - Daylight Simulation**

45cm sopra il piano di lavoro per tutte le postazioni di lavoro in spazi regolarmente occupati.

**2.** I livelli di luce vengono raggiunti sul piano verticale all'altezza degli occhi per simulare la luce che entra nell'occhio dell'occupante.

Verificato dal test delle prestazioni. (Fa riferimento alla Guida alla verifica delle prestazioni per informazioni sui requisiti dei sensori/test, sulla durata dei test richiesti e sui calcoli di conformità). <sup>[40]</sup>

Livello	Soglia		Soglia per progetti con luce diurna potenziata	Punti
1	Almeno 150 EML [136 M-EDI (D65)]	O	Il progetto raggiunge almeno 120 EML [109 M-EDI (D65)] e L05 Parte 1 o L06 Parte 1	1
2	Almeno 275 EML [250 lux M-EDI (D65)]	O	Il progetto raggiunge almeno 180 EML [163 M-EDI (D65)] e L05 Parte 1 o L06 Parte 1	3

La soglia del mel-EDI si abbassa se si dimostra una buona presenza di luce naturale nello spazio occupato.

### Feature L06 - Daylight Simulation

Questa parte richiede che ai progetti di eseguire calcoli di simulazione della luce diurna per prendere decisioni informate su finestre e ombreggiature, in modo da fornire un'adeguata esposizione alla luce diurna per gli occupanti. Il progetto dimostra, attraverso simulazioni al

computer, che vengono raggiunte le seguenti condizioni:

**1.** La superficie totale degli spazi regolarmente occupati raggiungono uno dei seguenti obiettivi: <sup>[40]</sup>

Livello	Calcoli secondo IES LM-83-12		Calcoli secondo l'allegato A di CEN 17037:2018	Punti
1	Media $sDA_{300,50\%}$ viene raggiunta per > 55% della superficie calpestabile regolarmente occupata	O	L'illuminamento target di 28 fc viene raggiunto per > 50% delle aree regolarmente occupate durante il 50% delle ore diurne dell'anno	1
2	Media $sDA_{300,50\%}$ viene raggiunta per > 75% della superficie calpestabile regolarmente occupata	O	L'illuminamento target di 28 fc viene raggiunto per > 50% dell'area totale e l'illuminamento medio di 9 fc viene raggiunto per > 95% dell'area totale durante il 50% delle ore diurne dell'anno	2

# 05

**Luce naturale  
e architettura**

# Luce naturale / e architettura

Definiamo "sistema di illuminazione naturale" l'insieme dei componenti architettonici di un edificio destinati a garantire l'illuminazione mediante luce diurna. La quantità, la qualità e la distribuzione della luce interna dipendono dall'interazione sinergica dei sistemi di illuminazione, dalla posizione delle aperture e dalla superficie degli involucri edilizi. I principali sistemi di illuminazione naturale impiegati sono: illuminazione laterale, illuminazione zenitale e illuminazione combinata. (fig)

I sistemi comunemente messi in opera nei progetti sono i sistemi di illuminazione laterale rispetto ai sistemi di illuminazione zenitale, sia per ragioni di facilità costruttiva che di costo. Essi permettono alla luce di passare attraverso un'apertura collocata su una parete laterale, e così l'illuminazione naturale in prossimità dell'apertura è significativa; se ci allontaniamo però dall'apertura, il valore dell'illuminazione diretta diminuisce rapidamente in profondità con una distribuzione meno uniforme nello spazio interno. La quantità di luce naturale fornita varia inoltre in base all'orientamento dell'apertura. Un altro aspetto fondamentale è la vista verso l'esterno sul paesaggio che offre il "lateral lighting", ma anche un rischio maggiore di abbagliamento. Il sistema di illuminazione zenitale in confronto è frequentemente usato negli edifici ad un piano (ad esempio un capannone industriale, una galleria ecc) o spazi in cui non è possibile avere un'apertu-

ra che riceva luce dall'esterno (magazzini, corridoi ecc). Questo sistema è definito da un'apertura collocata sulla copertura dell'edificio, offrendo in questo modo un maggiore accesso al cielo e alla luce solare senza ostacoli. Inoltre, quest'apertura zenitale, priva di ostruzioni, riceve luce dall'intera volta celeste, mentre le aperture verticali da metà della volta celeste. Il sistema zenitale fornisce quindi il doppio della quantità di luce naturale rispetto al sistema laterale nelle medesime condizioni di cielo, garantendo una distribuzione più uniforme della luce nelle aree dello spazio che sono solitamente meno illuminate.

Un terzo sistema utilizzato è l'illuminazione combinata che mette insieme l'uso dei due sistemi visti in precedenza, l'illuminazione laterale e zenitale, per un maggior apporto di luce naturale e migliore distribuzione della luce nello spazio interno. [41]

In questa tesi verrà approfondita solo l'illuminazione zenitale, analizzando le varie tipologie di sistemi impiegati in diversi ambienti di applicazione.

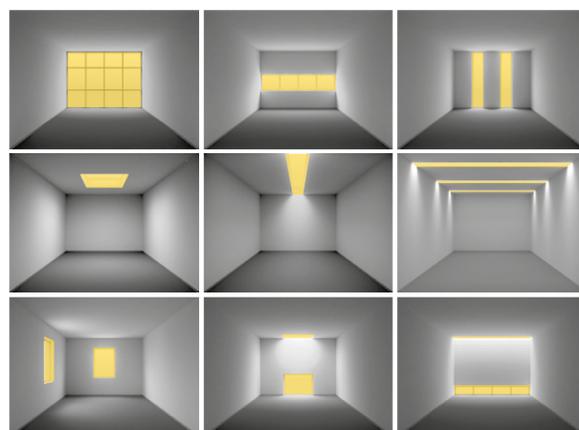


Figura: Rappresentazione di diversi sistemi di illuminazione, tra laterale e zenitale, estratto da "Daylight Design Variations Book". (4)

# Illuminazione / zenitale

L'illuminazione zenitale ha una lunga storia che risale all'antichità per enfatizzare gli spazi centrali e sacri degli edifici, ad una età moderna per creare spazi di lavoro più dinamici e ben illuminati, e che si evolve nell'era contemporanea con progressi tecnologici, sostenibili e materiali innovativi per una maggiore consapevolezza e attenzione verso l'efficienza energetica e il benessere degli occupanti.

Le coperture sono come "pozzi di luce" per illuminare gli ambienti interni con una luce zenitale, che proviene da una sorgente di luce solare diretta o dalla luce diffusa del cielo, e questa illuminazione produce nello spazio un'atmosfera distintiva e stimolante, anche se limitata in certi contesti applicativi. [42]

Da una parte, le aperture per garantire l'illuminazione zenitale mantengono le stesse caratteristiche generiche di qualsiasi apertura per l'illuminazione naturale, come l'ingresso della luce, la possibilità di ventilazione naturale e la vista verso l'esterno. Dall'altra parte, possono consentire una migliore distribuzione del livello di illuminazione e ridurre i rischi di abbagliamento nel campo visivo degli occupanti. Considerando quindi le esigenze richieste nei luoghi in cui si svolgono attività di concentrazione, come aule, biblioteche, ambien-

ti di lavoro e uffici, grazie all'abbondante apporto di luce naturale fornito, i sistemi di illuminazione zenitale possono ridurre la necessità di illuminazione artificiale durante il giorno, contribuendo al risparmio energetico e ottimizzando le prestazioni energetiche dell'edificio. Questo maggiore apporto di luce naturale contribuisce sull'aspetto fisiologico e psicologico degli occupanti, promuovendo un ambiente più sano e produttivo. [43]

Oltre alla serie di vantaggi che possono offrire i sistemi zenitali, è importante considerare con attenzione anche i potenziali svantaggi che questi sistemi presentano, come il rischio di abbagliamento o surriscaldamento e la necessità di una corretta manutenzione. Ad esempio, nelle stagioni calde o quando il sole è allo zenit, si possono trovare fenomeni di eccessivo illuminamento che creano un certo disagio visivo o di rischi di accumulo di calore negli ambienti interni se non vengono adottate soluzioni che diffondano la luce o utilizzino schermature adeguate. Al contrario, se non correttamente isolati, i sistemi zenitali possono causare dispersione di calore durante l'inverno, riducendo l'efficienza energetica dell'edificio. Un'altro aspetto importante è la pulizia e la manutenzione dei sistemi zenitali, che possono risultare più difficili e costose rispetto a quelle dei sistemi verticali tradizionali, soprattutto se posizionati in punti elevati o difficilmente accessibili.

La continua ricerca e innovazione in questo settore permette di ampliare ulteriormente le applicazioni e l'efficacia dell'illuminazione zenitale, integrandola sempre più armoniosamente nel panorama architettonico contemporaneo.

## 5.1 Classificazione dei sistemi zenitali/

Dopo aver illustrato il funzionamento del sistema di illuminazione zenitale precedentemente menzionato, si è osservato che tali sistemi possono variare sia in termini di materiali e tecnologie impiegate, sia in base a specifiche caratteristiche progettuali che determinano le condizioni dell'ambiente e influenzano la qualità dell'illuminazione interna e il comfort degli utenti.

Partendo da questa riflessione, attraverso un'ana-

lisi propria, è stata effettuata una classificazione di diverse configurazioni dei sistemi di illuminazione zenitale, considerando principalmente cinque criteri di valutazione delle condizioni di illuminazione interna: la categoria del sistema zenitale, la distribuzione della luce naturale all'interno dello spazio, la forma, il tipo di applicazione e la posizione del sistema zenitale sull'edificio; che verranno sviluppati in questo capitolo.



### 5.1.1 Categoria

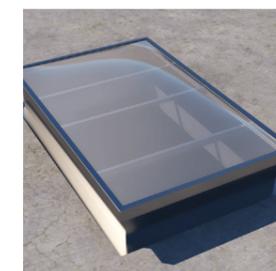
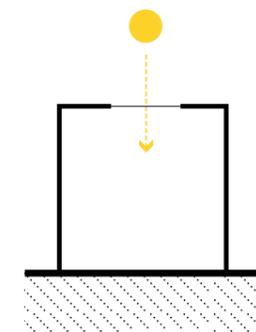
I sistemi di illuminazione zenitale sono aperture trasparenti o traslucide installate direttamente sulla copertura dell'edificio, con un'implicazione sia a livello di illuminazione che di calore.

Questi sistemi possono essere suddivisi in quattro categorie principali, in base alle loro caratteristi-

che funzionali: fissi, apribili, tubolari e con schermi. Ogni categoria offre determinati vantaggi e svantaggi, e la scelta del sistema più adatto dipende dalle specifiche esigenze progettuali, dalle condizioni climatiche locali e dagli obiettivi di efficienza energetica e comfort dell'edificio. <sup>[44]</sup>

#### sistema fisso

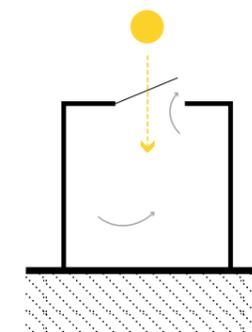
Sono aperture permanenti che non prevedono meccanismi di apertura o chiusura. Questi sistemi, generalmente costituiti da vetro stratificato o materiali polimerici avanzati come policarbonato o PMMA, garantiscono un apporto continuo di luce naturale all'interno degli spazi, e forniscono una visuale costante del cielo.



sistema fisso (5)

#### sistema apribile

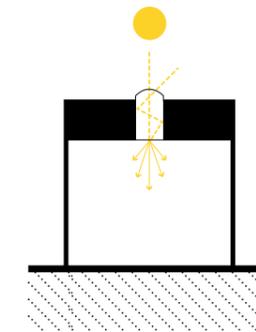
Sono aperture che possono essere aperte in modo manuale o automatizzato. Questi sistemi sono progettati per facilitare la ventilazione naturale e contribuire al controllo termico degli ambienti interni. Grazie alla possibilità di modulare l'apertura, consentono di regolare il flusso d'aria, riducendo l'accumulo di calore e migliorando la qualità dell'aria interna, il che è particolarmente utile per mantenere un comfort ambientale ottimale.



sistema ventilato (6)

#### sistema tubolare

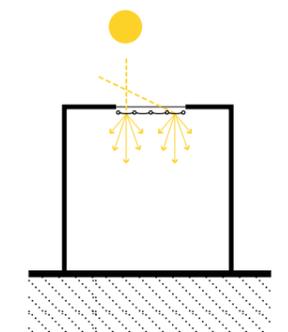
Noti anche come camini di luce, utilizzano condotti riflettenti per trasportare la luce solare dall'esterno all'interno dell'edificio. Questi sistemi sono particolarmente efficaci per illuminare aree interne prive di accesso diretto alla luce naturale, senza fornire però una vista verso l'esterno.



camino di luce (7)

#### sistema con schermi

Le aperture zenitali possono essere dotate di sistemi schermanti o filtranti che modulano l'intensità e la qualità della luce entrante. Questi schermi possono essere fissi o regolabili, permettendo di controllare l'abbagliamento e il guadagno termico, migliorando così il comfort visivo e termico degli occupanti.



sistema di schermatura (8)

## 5.1.2 Distribuzione luce naturale

Le aperture per l'illuminazione dall'alto possono essere orientate indipendentemente dall'orientamento dell'edificio e possono distribuire la luce in profondità nello spazio di un singolo piano. Ciò rende l'illuminazione dall'alto molto efficiente. Le aperture orizzontali, in particolare, ricevono la massima quantità di luce e calore quando l'angolo

di incidenza del sole è elevato, e la quantità minima quando l'angolo solare è basso. A seconda della dimensione e posizione del sistema zenitale o della forma della superficie su cui sono collocate le aperture, la direzione della luce viene controllata e il gradiente di illuminazione percepito all'interno dello spazio cambia.<sup>[41]</sup>

### luce diretta

La luce che penetra nello spazio senza ostacoli presenta un'intensità luminosa elevata, che può comportare un significativo rischio di abbagliamento e creare aree con ombre ben definite. Questo fenomeno è principalmente dovuto alla prevalenza della componente diretta della radiazione luminosa, che, non essendo diffusa o filtrata, tende a generare contrasti elevati tra le zone illuminate e quelle in ombra. La presenza di tale componente diretta, se non adeguatamente controllata, può compromettere il comfort visivo.

### luce indiretta

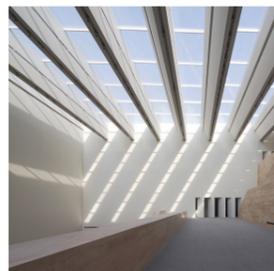
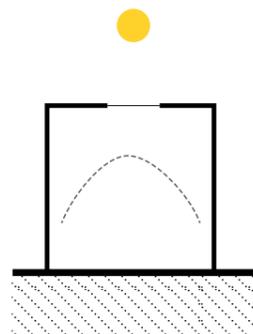
La luce che raggiunge lo spazio interno, dopo essere stata riflessa da una superficie o diffusa dal cielo, è indiretta grazie al sistema zenitale, progettato per impedire l'ingresso diretto della radiazione luminosa, sia essa diretta che diffusa, ad esempio con l'uso di un sistema a shed. La luce viene in questo modo distribuita in maniera controllata, creando un ambiente visivamente più confortevole e adatto a diverse attività che richiedono una qualità luminosa costante e piacevole.

### luce concentrata

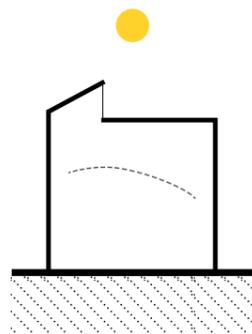
La luce è focalizzata su specifiche aree o oggetti all'interno dello spazio, ottenuta mediante l'uso di dispositivi come lenti, schermi riflettenti o attraverso aperture progettate in modo strategico per dirigere il flusso luminoso di una radiazione diretta, spesso utilizzata dove è importante evidenziare dettagli specifici o in situazioni in cui è necessario una luminanza più alta per compiti visivi specifici. Questo tipo di luce crea un contrasto marcato tra le zone illuminate e quelle in ombra.

### luce uniforme

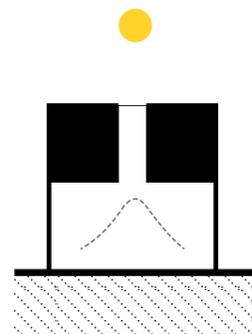
La luce è distribuita in modo omogeneo in tutto l'ambiente, evitando forti contrasti luminosi. Esistono varie soluzioni per ottenere una luce uniforme come disporre il sistema zenitale in modo regolare sulla copertura; integrare componenti trasparenti o traslucidi che diffondano la luce; oppure regolare la dimensione e forma dei sistemi zenitali, aperture più ampie permettono una maggiore quantità di luce diffusa di entrare, mentre forme allungate contribuiscono a distribuire la luce su un'area più estesa.



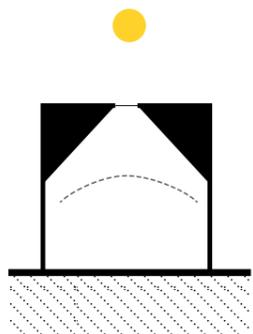
Museo d'arte di Tianjin, Cina  
KSP Jürgen Engel Architekten (9)



Chiesa Bagsværd, Danimarca  
Jørn Utzon (10)



Brione House, Svizzera  
Wespi de Meuron Romeo architects (11)



Il Yale Center for British Art, Stati Uniti  
Louis Kahn (12)

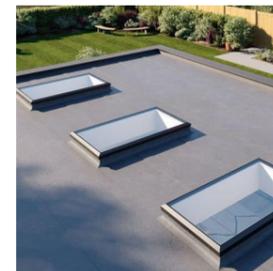
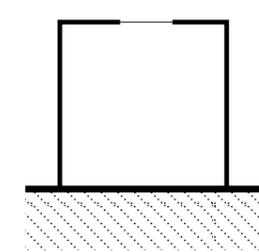
## 5.1.3 Forma

I sistemi zenitali sono disponibili sul mercato in una vasta gamma di forme e dimensioni, ciascuna con caratteristiche specifiche che ne determinano l'efficacia e l'idoneità per diverse applicazioni architettoniche. Le forme più comuni includono configurazioni rettangolari, circolari, ad arco e piramidali, con appropriate caratteristiche delle vetrate in base alle esigenze specifiche del progetto. Oltre ai prodotti disponibili in commercio, esistono

anche soluzioni di sistemi zenitali personalizzabili, progettati su misura per soddisfare le specifiche esigenze di un progetto. Questi sistemi su misura permettono una maggiore flessibilità nella scelta dei materiali, delle dimensioni e delle forme, consentendo di ottimizzare l'illuminazione naturale in base alle caratteristiche uniche dell'edificio e degli obiettivi progettuali.<sup>[45]</sup>

### rettangolare

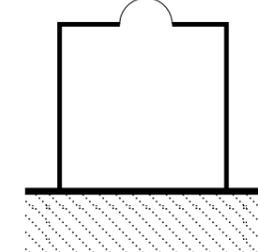
I sistemi rettangolari sono tra i più diffusi grazie alla loro versatilità. Possono essere utilizzati singolarmente o in serie per creare fasci di luce continua. La loro forma lineare facilita anche l'integrazione con pannelli fotovoltaici e sistemi di ombreggiatura.



sistema zenitale rettangolare (13)

### circolare

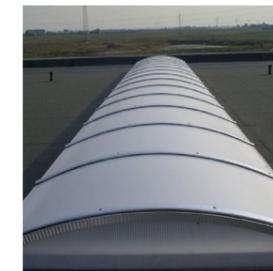
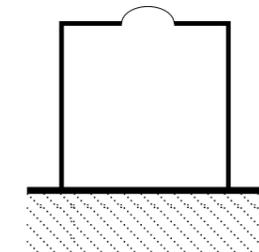
I sistemi circolari offrono caratteristiche simili a quelli rettangolari. La forma curva del vetro consente all'acqua piovana di disperdersi quando vengono installati su tetti piani. Esistono due tipi principali di aperture a cupola: da tubi solari a cupole di vetro.



sistema zenitale circolare (14)

### ad arco

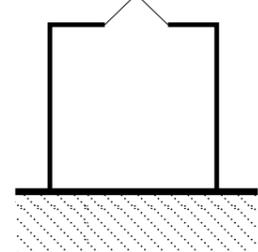
Sono aperture modulari e continui ideali per tetti industriali e campate più lunghe, per fornire un'illuminazione diurna diffusa. Vengono spesso realizzati in vetro acrilico o polycarbonato. A seconda del materiale utilizzato il lucernaio cambia estetica: da cupside bassa ad arco pieno.



sistema zenitale ad arco (15)

### piramidale

I sistemi piramidali possono essere utilizzati come elemento architettonico centrale in spazi pubblici, hall di ingresso e edifici commerciali. Con la loro struttura piramidale, questi lucernari incanalano la luce solare da più angolazioni, generando un effetto di luce dinamica nell'ambiente interno.



sistema zenitale piramidale (16)

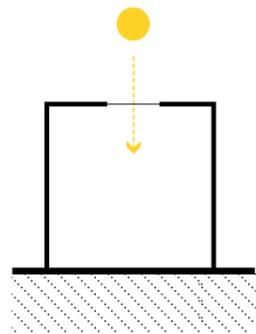
## 5.1.4 Tipo di applicazione

I sistemi zenitali offrono diverse strategie di applicazione all'interno di uno spazio tra cui l'ottimizzazione dell'illuminazione naturale, il miglioramento della ventilazione e la creazione di aperture visive verso l'esterno.

Queste strategie possono essere integrate per massimizzare il comfort degli occupanti e l'efficienza energetica degli spazi interni, garantendo così ambienti più confortevoli, efficienti e in armonia con il contesto esterno.<sup>[34]</sup>

### illuminazione naturale

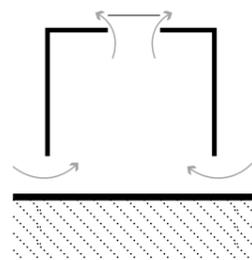
È la principale funzione di un sistema zenitale e che consente l'ingresso di luce negli spazi interni. Sfrutta l'orientamento, la configurazione delle aperture zenitali e le proprietà delle superfici, al fine di massimizzare l'apporto della luce diurna, riducendo così la dipendenza dall'illuminazione artificiale.



illuminazione naturale nell'ambiente (17)

### ventilazione naturale

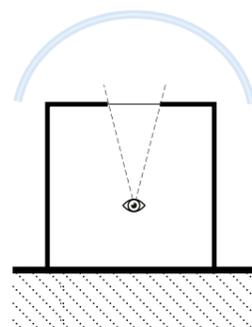
I sistemi zenitali possono fornire ventilazione oltre che luce naturale. I sistemi apribili, dotati di meccanismi di apertura, possono creare un flusso d'aria ascendente, sfruttando il principio dell'effetto camino. Questo flusso facilita il raffrescamento degli spazi interni, migliora la qualità dell'aria e contribuisce a ridurre i costi energetici. Inoltre, questi sistemi possono essere integrati con soluzioni per l'evacuazione naturale di fumi e calore, aumentando la sicurezza e l'efficienza dell'edificio.



ventilazione ed evacuazione dei fumi (18)

### vista verso l'esterno

La possibilità di vedere il cielo sia di giorno che di notte crea una connessione visiva con l'ambiente esterno. Contribuendo a migliorare il benessere psicologico degli occupanti negli ambienti di lavoro e che può influenzare positivamente sull'umore e la produttività.



vista verso l'esterno (19)

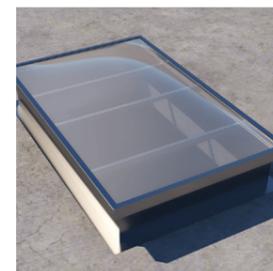
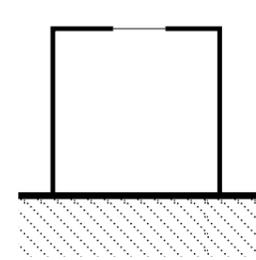
## 5.1.5 Posizione

I sistemi zenitali possono essere posizionati secondo tre configurazioni principali: orizzontale, verticale e inclinata. La scelta della posizione del sistema di illuminazione zenitale richiede una valutazione attenta delle condizioni climatiche del sito, delle

esigenze funzionali dell'edificio e delle strategie di sostenibilità energetica che possono influenzare la distribuzione della luce naturale all'interno dell'ambiente e al comfort degli utenti.<sup>[46]</sup>

### orizzontale

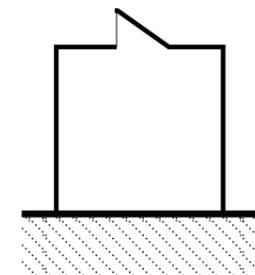
Posizionato in modo parallelo alla superficie, permette di massimizzare l'ingresso della luce durante le ore diurne, soprattutto quando il sole è alto nel cielo. Tuttavia, richiede soluzioni di gestione del guadagno termico, come il vetro basso emissivo che riduce le dispersioni di calore verso l'esterno; il vetro a controllo solare che riduce l'eccessivo apporto di calore solare; o il sistema di schermatura (ombreggiante o filtrante) che controlla l'ingresso della radiazione solare per evitare rischi di riscaldamento o abbagliamento. In posizione orizzontale viene favorito l'uso di schermature, mentre il vetro bassoemissivo o a controllo solare sono utili per qualunque posizione del sistema zenitale, in base alle condizioni climatiche del sito.



sistema zenitale orizzontale (5)

### verticale

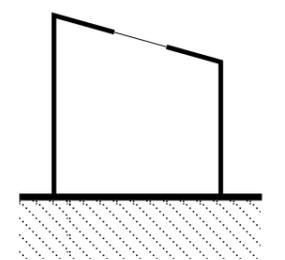
Viene integrato nelle superfici verticali della copertura. Sfrutta l'illuminazione solare diretta quando il sole è più basso sull'orizzonte, oltre a ridurre il carico termico e migliorare il comfort interno, ma può necessitare di sistemi di riflessione per aumentare la diffusione della luce nell'ambiente interno. Un aspetto importante è l'orientamento delle superfici verticali, un orientamento a nord per esempio consente di evitare la radiazione solare diretta e di ridurre il carico termico estivo oltre a limitare i rischi di abbagliamento, e di beneficiare della luce diffusa della volta celeste, ma con un apporto di luce durante l'anno inferiore ad altri orientamenti.



sistema zenitale verticale (20)

### inclinata

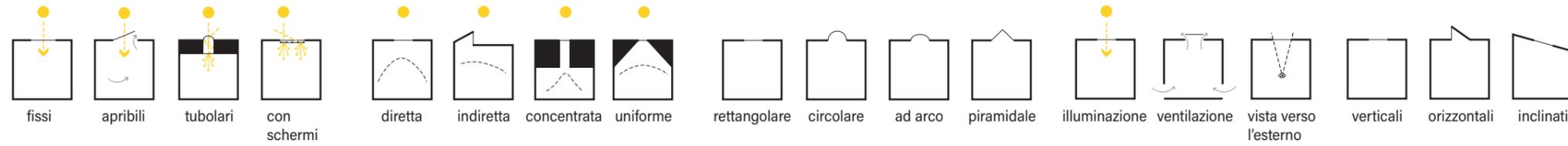
Segue in generale l'inclinazione della superficie della copertura. È particolarmente efficace per catturare la luce solare in diverse ore della giornata garantendo un'illuminazione più costante, rispetto a quella orizzontale che cattura per lo più luce diretta dall'alto e quella verticale che dipende dalla posizione del sole rispetto all'orizzonte, e adattandosi meglio alle variazioni stagionali dell'angolo solare che limita l'ingresso di luce diretta in estate e sfrutta al meglio l'angolo più basso del sole in inverno. In tal modo, a seconda del grado di inclinazione e di orientamento del sistema zenitale si ottengono condizioni intermedie rispetto alla posizione orizzontale e quella verticale.



sistema zenitale inclinato (21)

## 5.2 Matrice strategie zenitali /

Da questo studio sulla classificazione dei sistemi di illuminazione zenitale emerge una mappatura di un certo numero di architetture che adottano tali strategie progettuali, la quale potrebbe in futuro estendersi ad una gamma più ampia di soluzioni zenitali. Questa matrice, suddivisa secondo criteri di categoria, distribuzione della luce, forma, tipo di applicazione e posizione, consente di contestualizzare e confrontare l'impatto percepito della luce diurna all'interno degli spazi mediante strategie zenitali.



	#01 Fabbrica/Uffici Lao Ding Feng, Cina Neri&Hu	#02 Uffici ARPAE, Italia Mario Cucinella Architects	#03 Libreria Viipuri, Russia Alvar Aalto	#04 Centro sportivo EsPuig d'en Valls, Spagna MCEA	#05 Museo Menil Collection, Texas Renzo Piano	#06 Chiesa Holy Redeemer Church, Spagna Fernando Menis	#07 Scuola Trumpington Community College, Inghilterra Avanti Architects	#08 Stabilimento produttivo Vitra Campus, Germania SANAA	#09 Libreria State Library Passau, Germania AWWSCZ	#10 Centro culturale Chongqing Taoyuanju, Cina Vector Architects	#11 Casa Pringiers House, Sri Lanka Tadao Ando	#12 Stazione King's Cross, Inghilterra John McAslan + Partners	#13 Galleria Nancy and Rich Kinder Museum, Texas Steven Holl	#14 Casa Daylight House, Giappone Takeshi Hosaka
<b>Categoria</b>	fissi													
	apribili													
	tubolari													
	con schermi													
<b>Distribuzione luce naturale</b>	diretta													
	indiretta													
	concentrata													
	uniforme													
<b>Forma</b>	rettangolare													
	circolare													
	ad arco													
	piramidale													
<b>Tipo di applicazione</b>	illuminazione													
	ventilazione													
	vista verso l'esterno													
<b>Posizione</b>	verticali													
	orizzontali													
	inclinati													

# 06

## Interazione luce e materia

## Luce e materia /

*"L'architettura appare per la prima volta nel momento in cui la luce del sole colpisce un muro. La luce del sole non sapeva cosa fosse, prima di colpire un muro."*

*Louis Kahn*

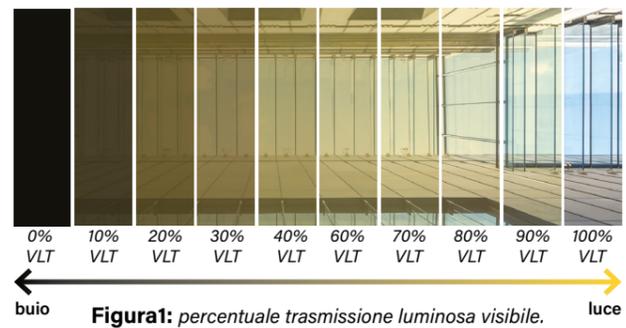
Luce e materia sono inscindibilmente connessi e reciprocamente dipendenti l'uno dall'altro.<sup>[47]</sup> Con il capitolo 2 e 3 abbiamo visto che la quantità e la qualità della luce naturale è importante per il benessere fisiologico degli occupanti nell'ambiente interno.

La scelta del sistema di illuminazione zenitale è un passaggio cruciale che va oltre la considerazione di fattori come posizione, forma e funzionalità, precedentemente analizzati, ma è essenziale valutare anche le proprietà di trasmissione delle superfici vetrate e le caratteristiche riflettenti dei materiali esposti alla luce che caratterizzano questi sistemi. Riflettendo sulla concezione di Louis Kahn che considera la luce diurna come un vero e proprio materiale da costruzione, emerge un cambiamento nella mentalità e nell'approccio progettuale. La luce naturale non si limita ad essere una fonte di illuminazione, ma rappresenta un elemento dinamico che modella l'esperienza spaziale man mano che entra nell'edificio e viene distribuita nell'ambiente, oltre al suo impatto sugli occupanti, sull'ambiente e sulla sostenibilità dell'edificio. Dando priorità alla luce diurna nella progettazione architettonica, possiamo creare spazi che non sono solo visivamente accattivanti ed efficienti dal punto di vista energetico, ma contribuire anche al benessere e alla produttività di coloro che li abitano.<sup>[48]</sup>

In questo capitolo ci si focalizza quindi sull'effetto che hanno le componenti trasparenti in entrambi quantità e qualità della luce che raggiunge l'occhio, e capire in che misura hanno un impatto positivo o negativo sul supporto dei sistemi visivi e non visivi.

Le prestazioni dell'illuminazione naturale all'interno degli edifici sono influenzate da una serie di parametri che determinano la quantità di luce diurna e la percezione visiva all'interno dello spazio (fig1). Alcuni di essi sono direttamente correlati al comfort visivo e non visivo all'interno dell'edificio, mentre altri sono più estetici. [49]

Questi parametri includono la riflessione, la trasmissione luminosa e il colore del vetro, insieme alle caratteristiche delle finiture interne e alle strategie di controllo della luce solare che devono essere considerati per bilanciare la distribuzione della luce, ridurre l'abbagliamento e minimizzare i contrasti netti per ottimizzare l'uso della luce diurna. [48]



La trasmissione e la riflessione luminosa rappresentano due parametri ottici fondamentali che influenzano l'efficacia della luce naturale negli spazi interni e la percezione visiva degli occupanti (fig2). La capacità di un componente trasparente a trasmettere la luce determina la quantità di luce naturale che entra in un edificio, mentre la capacità di riflettere la luce influisce sull'intensità e sulla distribuzione della luce all'interno di un ambiente. È quindi essenziale la scelta dei parametri ottimali in base alle specifiche esigenze funzionali dell'edificio.

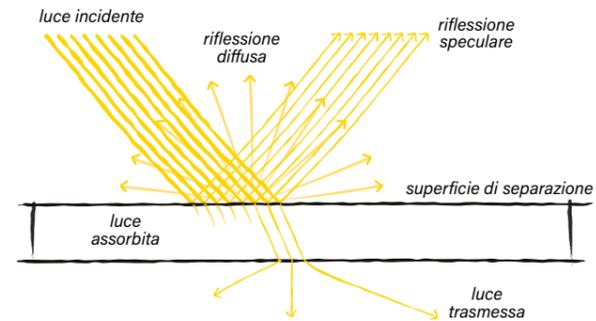
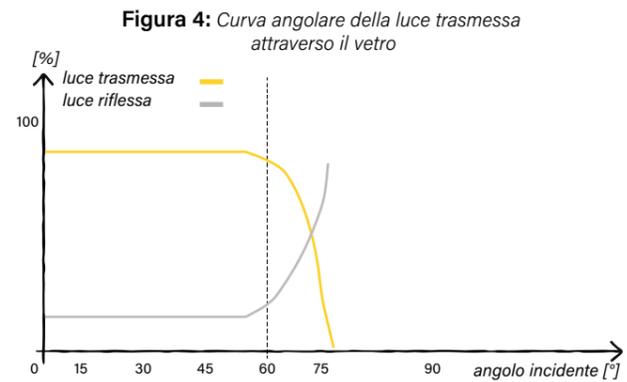
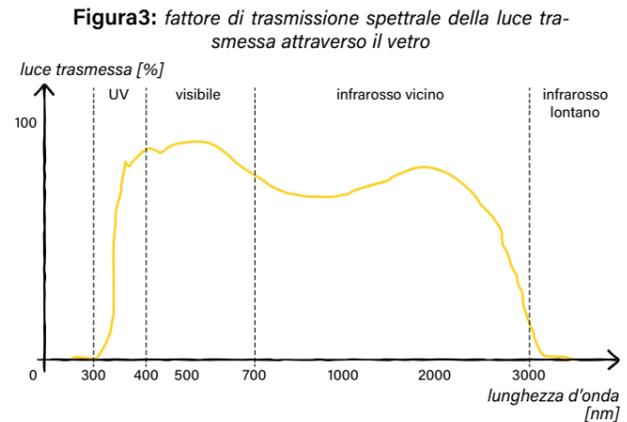


Figura2: effetti dell'interazione della luce con una superficie [49]

Questa interazione tra luce e materia dipende principalmente dalle caratteristiche fisiche della luce, quali lo spettro della radiazione incidente e la sua direzione (fig3 e 4), nonché dalle proprietà del materiale che verranno approfondite in seguito. [49]



Un' altro parametro che influenza la qualità percettiva della luce diurna e ha un impatto diretto sul ritmo circadiano umano è la Temperatura di Colore Correlata (CCT) (fig5). [50] La luce con una CCT alta tipica delle ore diurne promuove maggiore attenzione e produttività, e al contrario, una CCT bassa tipica delle ore serali favorisce il sonno e il riposo.



Figura5: impatto luce diurna sul sistema circadiano (22)

## 6.1 Componente trasparente

Come evidenziato nei capitoli precedenti, i primi risultati della ricerca suggeriscono che determinate lunghezze d'onda sono importanti per i processi biologici nel corpo umano come il sistema circadiano. Pertanto l'influenza delle vetrate sulla distribuzione spettrale della luce che penetra nello spazio interno rappresenta un fattore chiave nel supportare questi processi di trasmissione, assorbimento e riflessione della luce. Il componente trasparente costituisce la principale fonte di illuminazione all'interno di un edificio e svolge un ruolo fondamentale sia in termini di illuminazione naturale che di carico termico complessivo dell'edificio. L'ingresso della radiazione solare diretta o riflessa dal cielo e da altre superfici contribuisce all'illuminazione degli ambienti interni e al loro riscaldamento. Pertanto, è essenziale ottimizzare la quantità e la posizione delle aperture nell'involucro edilizio per controllare l'intensità e la distribuzione della radiazione solare entrante. [51]

La trasmissione della radiazione attraverso le componenti trasparenti dipende principalmente da fattori come l'angolo e le lunghezze d'onda delle radiazioni incidenti, dello spessore, della composizione chimica e delle caratteristiche superficiali della vetratura, come eventuali pellicole o trattamenti applicati che permettono di modulare la trasmissione, controllando il livello di luce entrante e il guadagno di calore solare. (fig1)

La trasmissione della luce all'interno di un ambiente può avvenire non solo attraverso superfici con trasmissione speculare, ma anche attraverso superfici traslucide (fig2). Nel caso di superfici trasparenti, la luce viene trasmessa in modo speculare, con i raggi luminosi che attraversano il materiale mantenendo un angolo di incidenza uguale all'angolo di uscita, risultando in un fascio di luce diretto. Al contrario, per le superfici traslucide, la trasmissione avviene in maniera diffusa: i raggi di luce che attraversano il materiale vengono dispersi in diverse direzioni. Questa riflessione multipla genera una luce diffusa, che distribuisce la luminosità in modo uniforme all'interno dell'ambiente. [52]

Figura1: schema di trasmissione di un sistema vetro trasparente

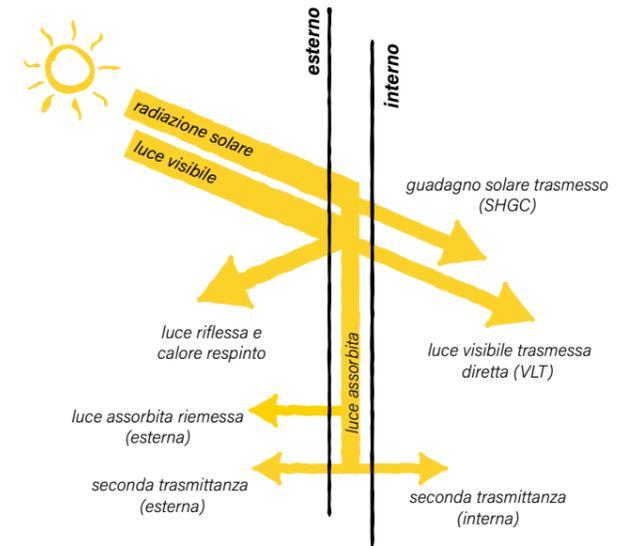


Figura2: schema di trasmissione di un sistema vetro traslucido

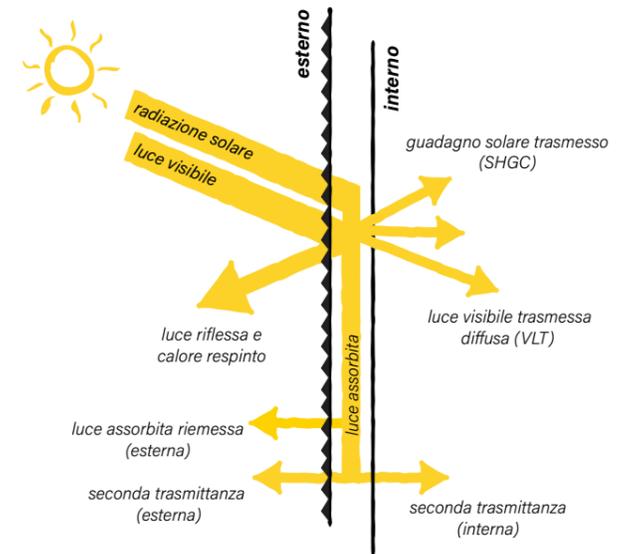
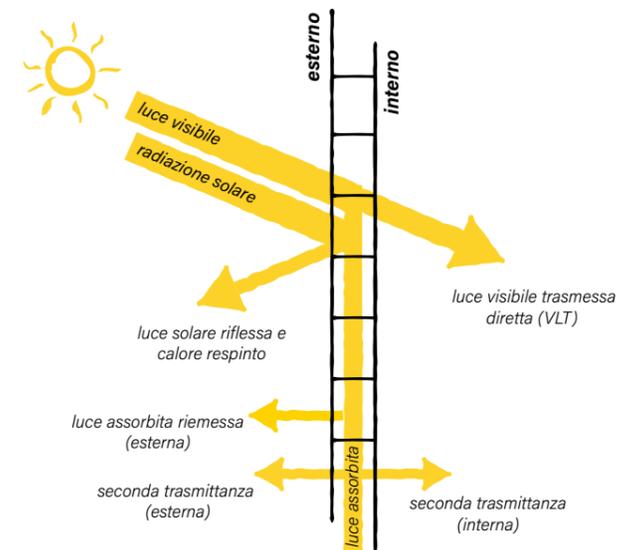
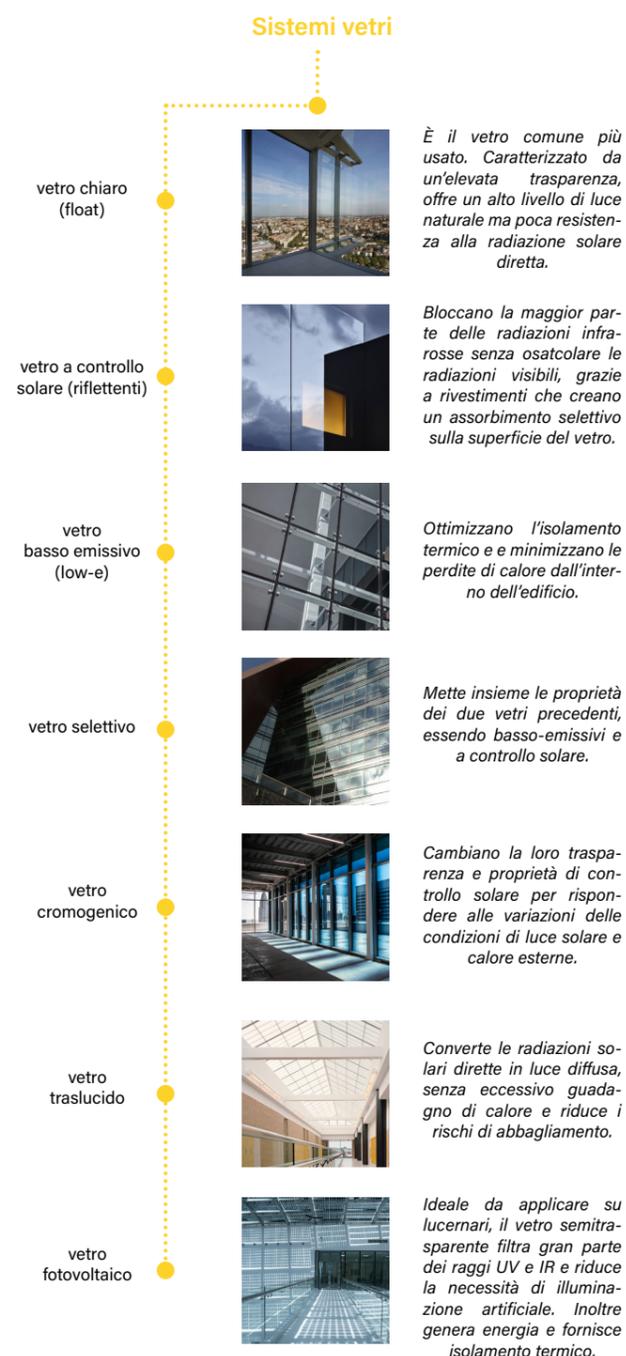


Figura3: schema di trasmissione di un policarbonato (PC)

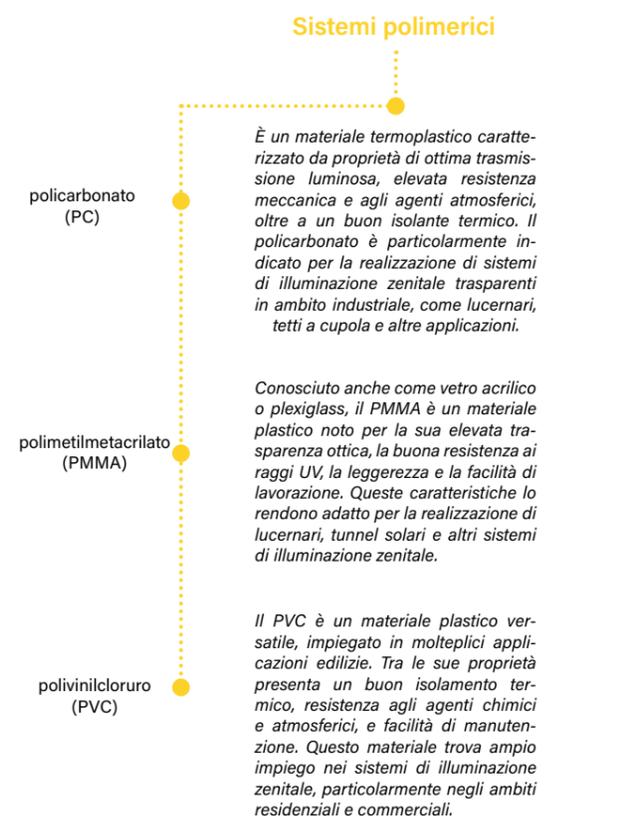


## Classificazione componenti trasparenti

In una panoramica delle principali componenti trasparenti disponibili oggi, che si possono più o meno utilizzare nei sistemi zenitali, si possono suddividere in due tipologie di sistemi: sistemi vetri e sistemi polimerici. [53]



Oltre ai vari componenti elencati, come il vetro, un altro materiale spesso utilizzato nella costruzione e, in particolare, nei sistemi di illuminazione zenitale, sono i materiali polimerici (fig3). Questi materiali offrono una serie di vantaggi specifici che li rendono particolarmente adatti e versatili per migliorare l'illuminazione naturale negli edifici, rispetto alle tradizionali soluzioni in vetro, contribuendo a creare spazi interni luminosi, efficienti dal punto di vista energetico e del comfort per gli occupanti. Le tipologie di materie polimeriche maggiormente adottate sono: [54]



È possibile trovare sul mercato sistemi più complessi, sviluppati da produttori specifici, che combinano i componenti trasparenti con materiali di rivestimento al fine di migliorare significativamente le prestazioni del vetro con caratteristiche specifiche. Inoltre, è comune osservare sistemi di vetratura combinati come parte di unità di vetro triplo o quadruplo, installate in edifici di nuova costruzione, soprattutto laddove vi sia una forte spinta verso l'efficienza energetica. [55]

## Parametri prestazionali

La destinazione d'uso e la posizione geografica di un edificio influiscono in modo rilevante sui requisiti specifici per le prestazioni di un sistema di vetratura. Può esserci un'ampia varietà di parametri che influenzano le prestazioni di un sistema di vetratura, e può occorrere che non vi sia uno ma molteplici requisiti imposti alle prestazioni di questi sistemi. [49]

Ad esempio, la resistenza termica del vetro può essere migliorata aggiungendo più strati di vetro creando un'unità di vetratura separata da un'intercapedine sigillata. La struttura di questa unità ha un impatto sulla riflettanza, sull'assorbimento e sulla trasmittanza della radiazione solare incidente. Ad esempio, la Lighting Guide LG10 del Chartered Institute of Building Services Engineers (CIBSE, 1999) evidenzia che la stratificazione del vetro può migliorare l'efficienza termica di circa il 15%. [55]

### Fattore di trasmissione visibile / $\tau_v$ [%]

La trasmissione della luce visibile è la percentuale di luce visibile (gamma dello spettro 380-780 nm) che passa attraverso la vetratura, invece di essere riflesso o assorbito. Esso è il "filtro" primario per ridurre l'elevata dinamica e intensa condizione di luce diurna esterna ad una migliore condizione interna e confortevole.

### Fattore solare / SHGC o g [%]

Il coefficiente di guadagno solare globale agisce nella gamma dello spettro 200-2000 nm, e considera sia l'energia direttamente trasmessa che quella assorbita e scambiata per radiazione e convezione con l'interno. In generale il valore viene compreso tra 0 e 1.

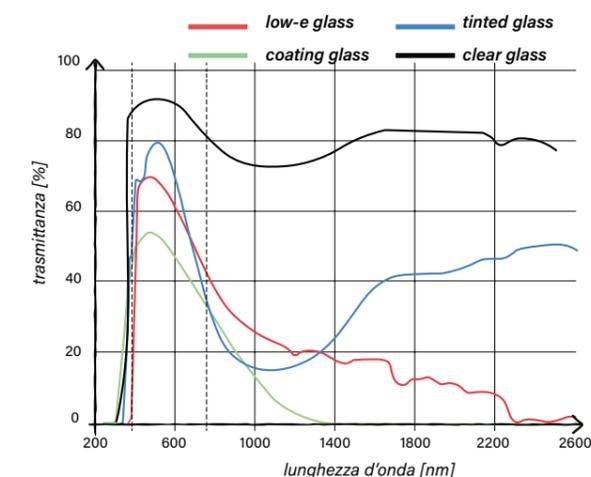
### Trasmittanza termica / U [W/m<sup>2</sup> K]

Il valore U indica la quantità di energia termica per unità di tempo e unità di superficie viene trasmessa attraverso un oggetto solido con una differenza di temperatura dei fluidi di 1 Kelvin (o 1 °C). Un valore basso della trasmittanza termica significa un

maggiore isolamento termico.

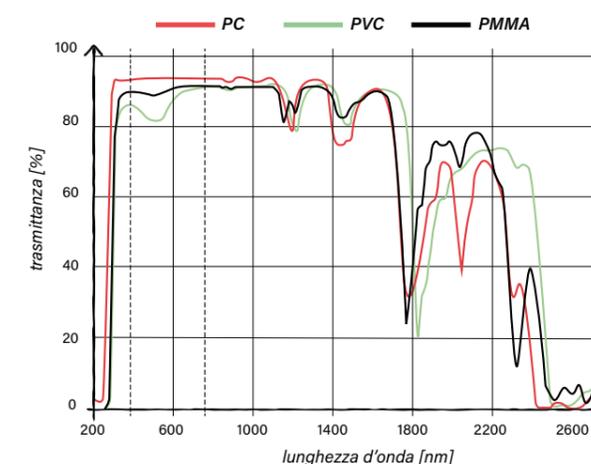
## Spettri di trasmittanza di vari tipi di vetro

Il vetro si comporta in modo diverso in base alla lunghezza d'onda del raggio incidente, come nello schema seguente. [56]



## Spettri di trasmittanza di vari tipi di sistemi polimerici

Il diagramma sottostante fa riferimento ad un esperimento condotto su vari tipi di polimeri tra cui PC, PMMA e PVC con spessore di 2mm, che illustra la loro variazione di trasmittanza in base alla lunghezza d'onda del raggio incidente. [57]



## 6.2 Componente schermante

Gli spazi situati in prossimità di componenti trasparenti o vicino a fonti di luce diurna possono frequentemente determinare fenomeni di abbagliamento diretto e surriscaldamento dell'ambiente dato gli apporti solari diretti. Questi fenomeni possono contribuire significativamente al discomfort visivo degli occupanti, influenzando negativamente la qualità dell'ambiente interno.

Inoltre, il controllo della radiazione solare all'interno dell'ambiente è un aspetto essenziale per ridurre i fabbisogni energetici durante il periodo estivo, e può essere ottenuto mediante l'adozione di diverse strategie, fra queste l'impiego di vetri caratterizzati da bassi valori di fattore solare e di efficaci sistemi schermanti.

I dispositivi di ombreggiatura sono una soluzione efficace per mitigare tali problemi, offrono una regolazione dinamica della luce solare incidente e rispondono alle variabili condizioni del cielo.<sup>[58]</sup> Diversi fattori rientrano in gioco per migliorare la gestione dell'illuminazione diurna e migliorare il benessere psicofisico degli occupanti, favorendo la loro produttività e il loro comfort, al fine di otti-

mizzare le prestazioni complessive dell'edificio:<sup>[49]</sup>

### ■ Posizione

La posizione della schermatura può essere interna, esterna o situata nella cavità del componente trasparente, e tale posizionamento, in relazione all'orientamento dell'edificio, è necessario per massimizzare l'efficacia del controllo solare (dal punto di vista termico).

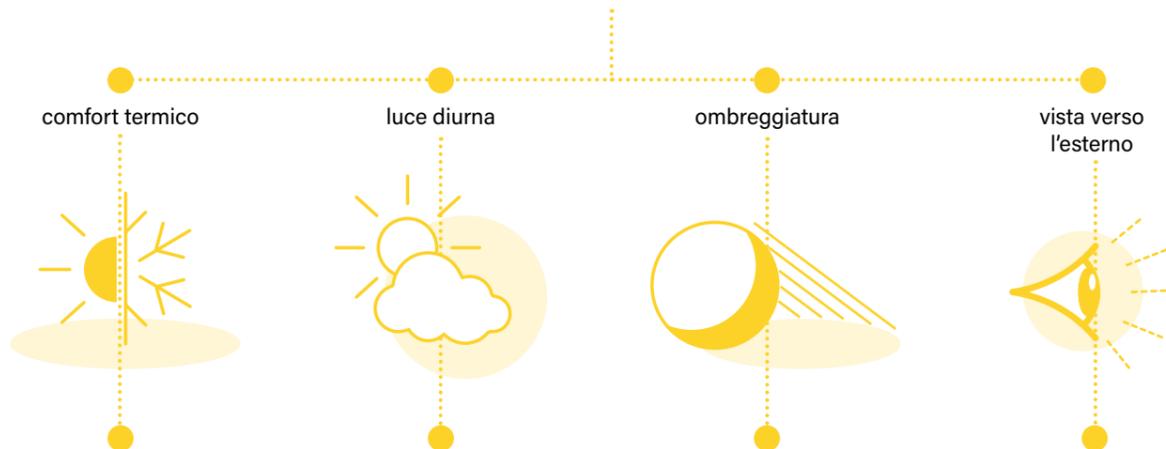
### ■ Trasparenza

La scelta del materiale del componente schermante incide principalmente sulla trasmissione della luce. Le due tipologie di schermature presenti sono quelle oscuranti, che bloccano completamente il passaggio della luce, e quelle filtranti, che consentono di mitigare l'ingresso della radiazione solare sia per il controllo dell'abbagliamento che del guadagno solare.

### ■ Mobilità

Gli schermi possono essere sia fissi che mobili. Il movimento delle schermature può essere effettuato in diversi modi: manualmente, regolabili in base alle esigenze, o tramite sistemi motorizzati integrati con sensori, che consentono di regolare automaticamente le schermature in risposta alle variazioni della luce solare e alle condizioni climatiche.

### FUNZIONI SCHERMATURE



Per il comfort termico, il fattore più importante che influenza l'assenza di malessere in uno spazio chiuso è la corretta combinazione della temperatura dell'aria, umidità, radiazioni dalle superfici circostanti e movimento dell'aria e della sua freschezza o calore.

Controllo della quantità di luce entrante e dell'abbagliamento nell'ambiente interno.

L'ombreggiamento sulle facciate esposte maggiormente impedisce alla radiazione solare diretta di penetrare nell'involucro dell'edificio durante i momenti critici della giornata.

Per garantire il comfort visivo il sistema schermante consente di mitigare le radiazioni solari dirette; tuttavia, può limitare l'accesso alla vista esterna, influenzando così la percezione della qualità dell'illuminazione nell'ambiente interno.

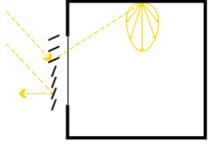
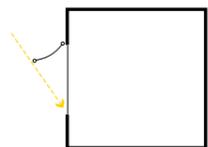
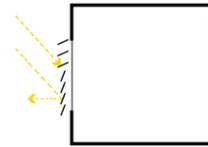
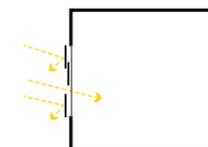
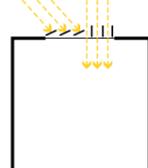
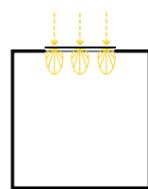
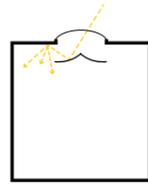
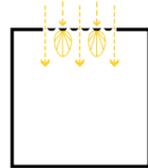
## Tipi di schermature

Le schermature che si trovano in commercio sono suddivise tra sistemi passivi e sistemi attivi, che offre alla possibilità di variare l'inclinazione in base alla radiazione solare incidente, per sfruttare al meglio l'apporto solare. Quelli passivi sono sistemi statici che non richiedono alimentazione elettrica, perciò sfruttano le caratteristiche fisiche e geometriche per regolare la quantità di energia solare che viene trasmessa all'interno dell'ambiente al variare dell'inclinazione delle radiazioni solari, senza la necessità di regolazioni dinamiche. Quelli attivi invece, sono dotati di dispositivi meccanici che posso-

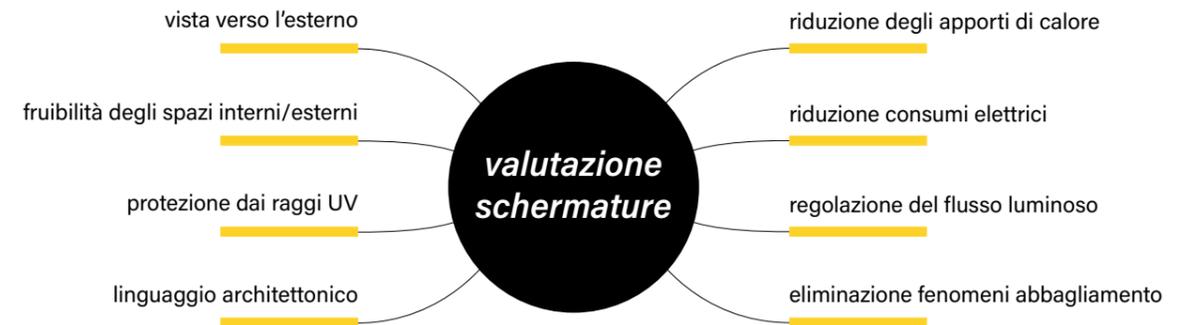
no modulare la rifrazione e la riflessione dei raggi solari all'interno dell'edificio e regolare dinamicamente l'apporto di luce solare e il controllo termico, essi reagiscono in tempo reale alle variazioni di luminosità, temperatura e altre condizioni climatiche. Un altro criterio di classificazione delle schermature è basato sulla loro geometria, che può essere orizzontale o verticale, e viene scelta in funzione del tipo di radiazione solare diretta, diffusa o riflessa e alla radiazione solare globale da schermare. E dipenderà dall'orientamento dell'edificio, dalla posizione del sole durante le varie ore del giorno e dalle esigenze specifiche di controllo della luce e del calore.<sup>[59]</sup>

### DISPOSITIVI SCHERMANTI<sup>[60]</sup>

sistemi fissi				reference
orizzontale	sezione	prestazione	facciata di esposizione	
oggetto orizzontale		Gli oggetti esterni fissi intercettano la radiazione incidente prima che colpisca la superficie di apertura dell'edificio, e disperdono l'energia assorbita dalle schermature nell'aria esterna. Permettono in questo modo di schermare in modo selettivo impedendo il passaggio dei raggi solari diretti.	Generalmente gli elementi schermanti orizzontali sono applicati a facciate esposte a sud. È spesso la migliore scelta anche per la facciate esposte a sud-est, sud-ovest e ad est.	[a]
mensola riflettente		La mensola riflettente è una superficie riflettente che crea ombra nella parte sottostante, mentre la parte superiore cattura la luce dall'esterno e la riflette all'interno dell'ambiente. La mensola può essere posizionata a diverse altezze dell'apertura, consentendo di mantenere una visuale libera verso l'esterno.	La mensola riflettente è particolarmente indicata per ambienti con facciate fortemente esposte alla radiazione solare diretta.	[b]
frangisole orizzontale		Le schermature con lamelle orizzontali offrono un vantaggio rispetto agli oggetti poiché riducono l'intensità dei carichi di vento e neve sulle aperture, e in estate limitano l'ingresso dei raggi solari nelle vicinanze delle aperture.	Anche per quanto riguarda gli elementi con lamelle orizzontali viene consigliato l'applicazione a facciate esposte a sud, est ed ovest.	[c]
verticale	sezione	prestazione	facciata di esposizione	
oggetto verticale		La schermatura è composta da elementi disposti perpendicolari alla parete, e la radiazione solare incidente sulla superficie varia in funzione della lunghezza e della distanza tra questi elementi. Questo permette di controllare l'intensità e la direzione della luce solare che penetra l'ambiente, garantendo comfort visivo e termico.	Rispetto agli oggetti orizzontali, quelli verticali risultano più efficaci quando installati sulle facciate orientate a est e ovest, soprattutto in climi molto caldi. In queste posizioni, la radiazione solare incide l'edificio al mattino e nel tardo pomeriggio, con un angolo più basso rispetto all'orizzonte.	[d]
frangisole verticale		Analogamente agli oggetti verticali, le schermature con lamelle verticali sono efficaci nel controllare l'ingresso dei raggi solari nelle varie ore della giornata e durante le diverse stagioni. Tuttavia, un limite di questo sistema è la visibilità ridotta verso l'esterno attraverso la schermatura.	Anche per quanto riguarda gli elementi a lamelle verticali viene consigliato l'applicazione a facciate esposte ad est e ovest.	[e]

sistemi mobili				reference
orizzontale	sezione	prestazione	facciata di esposizione	
frangisole orizzontale regolabile		Il sistema frangisole orizzontale fisso è efficace nell'intercettare la radiazione solare incidente su una superficie vetrata durante le giornate più calde e soleggiate. Ma nel caso di cielo nuvoloso, quando la radiazione è principalmente diffusa o riflessa, questo sistema perde di efficacia impedendo la penetrazione dei raggi solari anche d'inverno quando ciò sarebbe vantaggioso. Solo con sistemi mobili si può risolvere questo tipo di problema.	I sistemi di schermatura mobili possono adattarsi in modo migliore alle variazioni climatiche rispetto ai sistemi fissi, per questo motivo è consigliato il loro utilizzo su facciate orientate a sud, est e ovest.	[f]
tenda mobile		Per i sistemi mobili, come le tende, è importante considerare la posizione del sole sia nel periodo invernale che estivo, in modo che l'elemento possa essere regolato di conseguenza. Questo consente di massimizzare l'irraggiamento solare durante l'inverno e di ridurlo durante l'estate.	Anche per la tenda mobile viene favorita l'applicazione a facciate esposte a sud, est e ovest.	[g]
verticale	sezione	prestazione	facciata di esposizione	
frangisole verticale regolabile		Rispetto ai sistemi verticali fissi che permettono di minimizzare la radiazione solare diretta ma limitano la visibilità esterna, i sistemi verticali con lamelle orientabili consentono di seguire con rotazione il percorso solare nell'arco della giornata, ottimizzando sia l'intercettazione della radiazione solare diretta laterale incidente sulla superficie vetrata, che la qualità della vista verso l'esterno.	I sistemi di schermatura mobili offrono una maggiore adattabilità alle variazioni climatiche rispetto ai sistemi fissi. Per questo motivo, è raccomandato utilizzarli su facciate orientate verso sud, est e ovest.	[h]
schermature integrate verticale		Le schermature integrate verticale, costituite da pannelli sovrapponibili che possono essere scorrevoli o avvolgibili, permettono di ottimizzare i livelli di trasmissione della luce diurna filtrata all'interno dell'ambiente e ad una variabile percentuale di ombreggiatura in base al tipo di trama e al livello di trasparenza di pannelli.	Anche per le schermature integrate verticale viene consigliato l'applicazione a facciate esposte a sud, est e ovest.	[i]
copertura	sezione	prestazione		
frangisole a lamelle orientabili		Poiché i raggi solari zenitali sono particolarmente intensi, la luce che incide su una superficie orizzontale presenta un'intensità maggiore rispetto a quella che colpisce una superficie verticale. Un sistema mobile è più efficace nel schermare la radiazione solare che raggiunge tali lucernari, grazie alla capacità di regolare l'orientamento delle lamelle tramite sensori in risposta alle variazioni climatiche. Durante l'e-	state, le lamelle captano la luce e l'energia solare incidente ottimizzando dell'ombreggiamento interno. In inverno, invece, le lamelle possono essere orientate in modo da massimizzare il passaggio della luce zenitale e favorire l'accumulo di calore dalle superfici sottostanti.	[j]
elementi continui di lamiera traforata		La schermatura può essere realizzata con pannelli continui di lamiera perforata, i quali, quando sono completamente chiusi, bloccano la radiazione solare diretta, permettendo così l'ingresso di luce diffusa negli ambienti interni. La quantità di luce diurna diffusa che penetra varia in base alla trama e al grado di trasparenza	della lamiera. Durante l'inverno, quando i pannelli sono lasciati aperti, favoriscono l'ingresso dei raggi solari e, attraverso fenomeni di riflessione, riducono il rischio di abbagliamento interno.	[k]
deflettori solari (skylight reflectors)		I deflettori solari, che possono essere montati sia all'interno che all'esterno di un ambiente, sono progettati con una curvatura specifica per deviare i raggi solari che attraversano la superficie del lucernario. Questa curvatura fa sì che la radiazione solare si distribuisca su un'area	molto più ampia. La quantità e il percorso della radiazione solare riflessa possono essere regolati modificando l'apertura del deflettore.	[l]
frangisole in vetro con fotovoltaico integrato		Il sistema di frangisole con fotovoltaico integrato è particolarmente adottato nei paesi con clima favorevole. Spesso include dei fotosensori che in caso di necessità possono raggiungere la massima posizione di apertura. Questi elementi assorbono l'energia solare, contribuendo a ridurre l'uso della luce artificiale e il carico di raffreddamento dell'edificio, con una conseguente diminuzione del consumo energetico	complessivo. Inoltre, se gli elementi fotovoltaici sono traslucidi possono creare un effetto di luce diffusa all'interno dell'ambiente. Oltre a garantire il comfort degli occupanti ed un efficace controllo della radiazione solare, preserva anche la vista verso l'esterno.	[m]

Per valutare adeguatamente l'efficacia delle componenti schermanti è essenziale considerare una serie di parametri che consentono di ostacolare le radiazioni solari dirette. Queste radiazioni, se non controllate, possono provocare abbagliamento e accumulo di calore all'interno dell'ambiente, causando così effetti di discomfort sia visivi che non visivi. [61]



#### Parametri prestazionali [62]

##### Trasmissione luce visibile / $\tau_v$ [%]

La trasmissione della luce visibile è composta da due trasmittanze, la trasmittanza visibile diretta  $\tau_{v,n-n}$  legata all'Openness Factor (OF), e la trasmittanza visibile diffusa  $\tau_{v,n-dif}$  influenzata dal colore, dallo spessore e dalla costruzione del materiale della schermatura (es. tessuto, listelli, doghe).  $\tau_v = \tau_{v,n-n} + \tau_{v,n-dif}$

##### Riflessione luce visibile / $\rho_v$ [%]

è la riflessione visibile della radiazione solare diretta, e dipende dalle caratteristiche della schermatura quali il rivestimento superficiale e il colore del materiale.

##### Trasmissione solare / $\tau_s$ [%]

Misura la percentuale di radiazione solare che passa attraverso la schermatura, più basso è il valore meno c'è rischio di abbagliamento e di calore eccessivo.

##### Riflessione solare / $\rho_s$ [%]

Indica la capacità del componente schermante a riflettere la radiazione solare verso l'esterno.

##### Emissività infrarossa / $\epsilon_{IR}$ [-]

L'emissività della radiazione infrarossa, insieme alla trasmissione  $\tau_{IR}$  sono parametri necessari per conoscere le proprietà termiche del componente

schermante.

##### Trasmissione luce IR / $\tau_{IR}$ [%]

La trasmissione della radiazione infrarossa influenza direttamente le prestazioni termiche ed energetiche dell'edificio.

##### Fattore di apertura / OF [%]

Questo fattore rappresenta la frazione di fori rispetto all'area totale, caratteristiche delle schermature filtranti. Con  $0.25 < OF < 1$  la trama è larga, con  $0.07 < OF < 0.25$  la trama è media e con  $0 < OF < 0.07$  la trama è stretta.

##### Conducibilità termica / K [W/mK]

La conducibilità termica permette la valutazione delle prestazioni termiche dei sistemi di schermatura, poiché influisce direttamente sull'efficienza energetica dell'edificio.

##### Shading coefficient / SC [-]

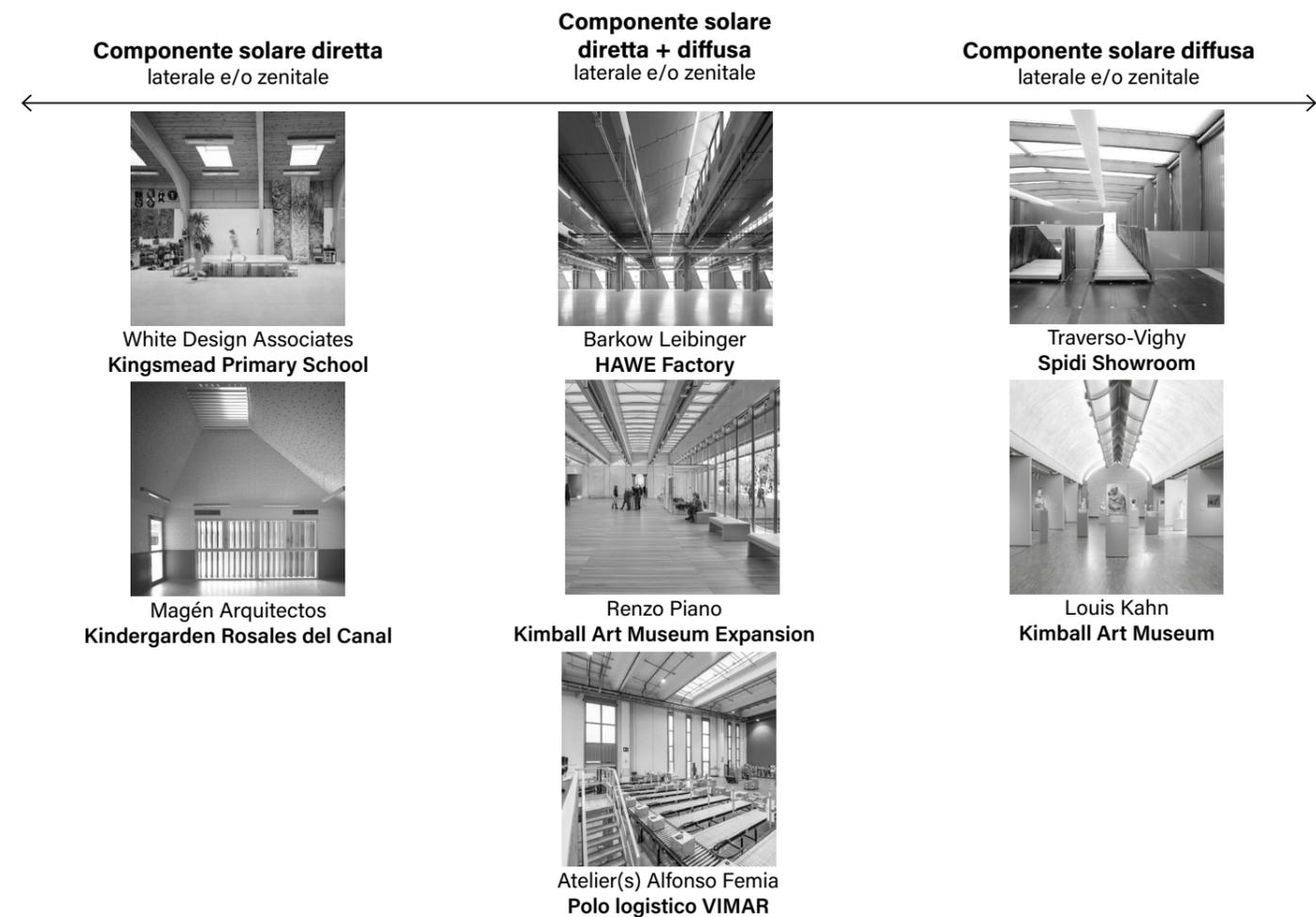
Il coefficiente di ombreggiamento misura la quantità totale di calore che passa attraverso la vetratura, nota come trasmittanza termica solare totale. Il coefficiente definisce quindi la capacità di controllo solare o l'efficienza del sistema di vetratura rispetto all'apertura standard di riferimento. Esso viene espresso con un valore compreso tra 1 e 0, dove un coefficiente di ombreggiamento basso indica una maggiore efficacia della schermatura nel ridurre il guadagno solare.

# 07

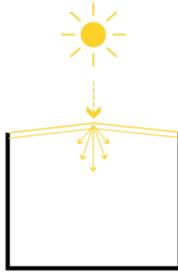
## Casi studio

## Campione progetti /

I casi analizzati si distinguono per tipologia di edificio: industriale, scolastico ecc, e per tipologia di ambiente luminoso, che si può applicare per qualunque tipo di caso studio. Sono stati scelti in questa direzione un campione di progetti che hanno al centro il tema della luce naturale, mettendo in evidenza il tipo di illuminazione proveniente dai sistemi zenitali che cambia la percezione dello spazio interno, che si determina tra lo scenario della componente solare diretta e componente solare diffusa.



# Spidi Showroom / caso vendita di prodotti

<p><b>Componente solare diretta</b> laterale e/o zenitale</p>	<p><b>Componente solare diretta + diffusa</b> laterale e/o zenitale</p>	<p><b>Componente solare diffusa</b> laterale e/o zenitale</p>
	<p>morfologia edificio <b>corpo di fabbrica rettangolare multipiano orientata a nord-sud</b></p>	 <p>luogo / anno di costruzione <b>Meledo Italia / 2006</b></p>
<p>architetti <b>Traverso-Vighy</b></p>	<p>strategie impiegate principalmente <b>sistema zenitale</b></p>	<p>sistema costruttivo <b>struttura con portali in metallo smontabili, ancorati su un volume in CA prefabbricato</b></p>
	 <p>sistema zenitale <b>lucernari tetto piano con integrazione della luce artificiale</b></p>	
<p>effetti della luce naturale <b>luminosità uniforme comfort visivo riflessi chiaro-scuro</b></p>	<p>sistema verticale <b>pelle esterna con pannelli coibentati con finiture superficiali in acciaio inossidabile satinato</b></p>	<p>tipo di vetro <b>vetro selettivo chiaro vetro opalino chiaro</b></p> 
	<p>materiali interni omogenei e monocromatici: <b>ferro, acciaio inossidabile, vetro e tessuto</b></p>	

# Spidi Showroom /

**“ottimizzare l’uniformità della luce naturale”**

La luce naturale entra attraverso la copertura in modo controllato e diffuso tanto da rendere imprevedibile lo scorrere del tempo. I colori e materiali utilizzati sono volutamente monocromatici per rendere omogeneo il contesto e dare massimo risalto al prodotto esposto. L’effetto è ottenuto con la stratificazione di diversi materiali filtranti: vetro selettivo, vetro opalino e tela SPI. (23)

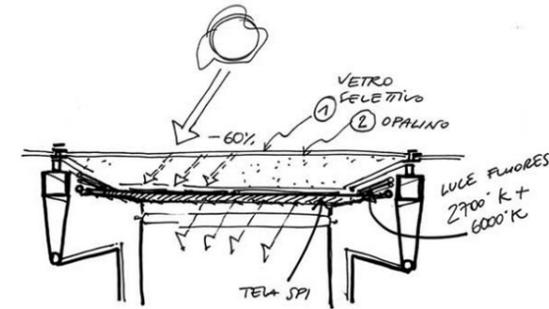
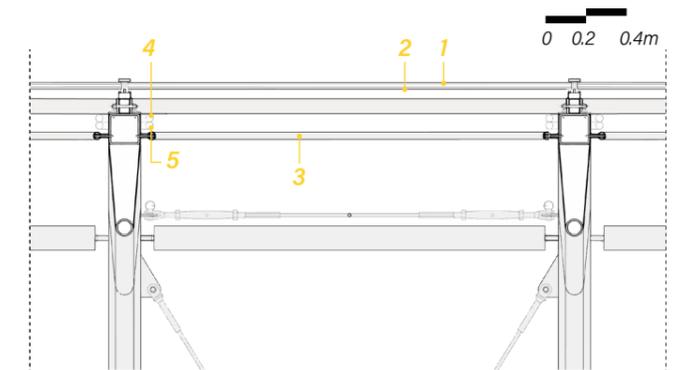


Immagine: illustrazione sistema zenitale

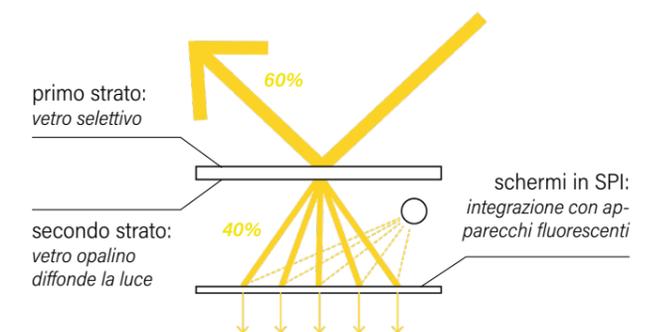


Il comfort visivo degli spazi interni è assicurato da condizioni di luce uniforme alle diverse ore del giorno: la luce artificiale si integra a quella naturale attraverso vetri selettivi e sorgenti di luce di colore variabile regolate da software.

Immagine: dettaglio copertura



- 1 vetro pedonabile selettivo extrachiaro  
vetro a controllo solare COOL-LITE SKN / 8mm  
trasmissione luminosa / 50%  
fattore solare / 0.27
- 2 vetro extrachiaro opalino
- 3 vela in tela Spi pensionata su telio di tubi d30 inox  
sistema di diffusione per integrazione luce artificiale.
- 4 lampada fluorescente T5 2700°K
- 5 lampada fluorescente T5 6000°K  
la miscela delle due lampade con la luce naturale viene controllata da un sistema di sensori e da un software che permette un'integrazione quantitativa e qualitativa della luce naturale.

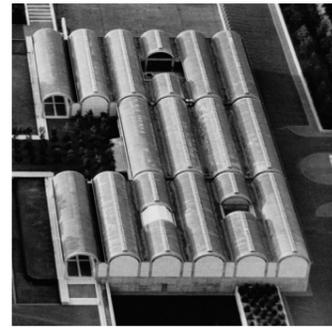


Schema elaborato: trasmissione luce naturale controllata

**Componente solare diretta**  
laterale e/o zenitale

**Componente solare diretta + diffusa**  
laterale e/o zenitale

**Componente solare diffusa**  
laterale e/o zenitale



morfologia edificio  
**volume con volte a botte cicloidali**

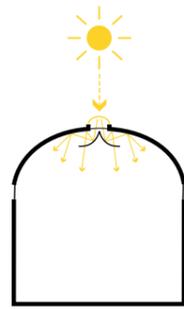
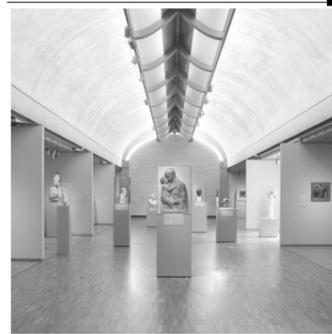


luogo / anno di costruzione  
**Fort Worth, Texas  
US / 1972**

architetto  
**Louis Kahn**

strategie impiegate  
**combinazione sistemi verticali e zenitali**

sistema costruttivo  
**struttura formata da campate a volte cicloidali con doppia colonna e singola trave**

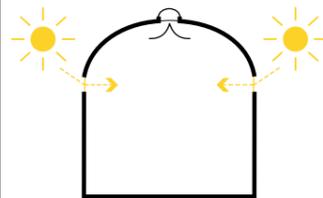


sistema zenitale  
**Lucernari in plexiglass con integrazione della luce artificiale**



ingresso della luce naturale  
**luce naturale diffusa da riflettori in alluminio traforato a forma di ala**

sistema verticale  
**fessure verticali sui travertini laterali e facciate vetrate sui lati esterni dell'edificio**

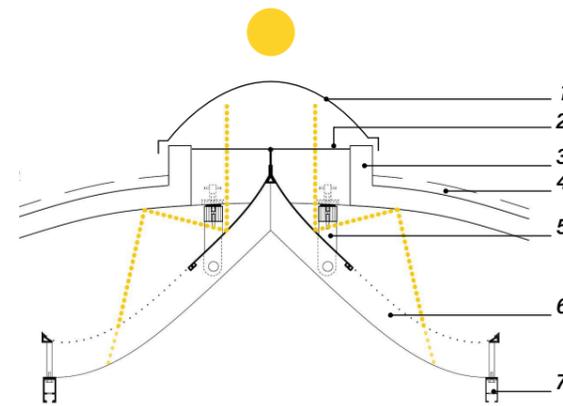


effetti della luce naturale  
**luminosità uniforme controllo abbagliamento luce solare diretta esclusa**



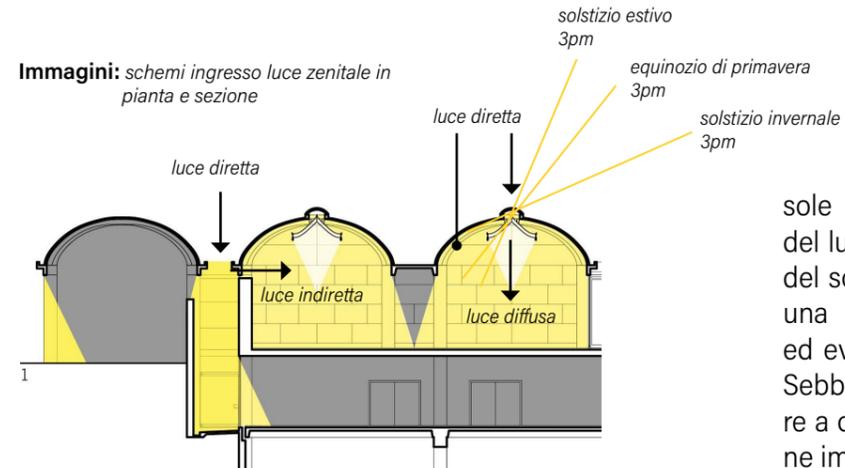
materiali interni  
**materiali naturali come cemento, travertino, quercia bianca, metallo**

Immagine: dettaglio sistema zenitale

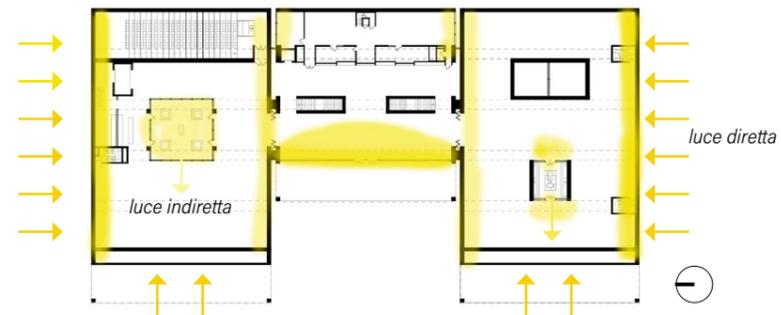


- 1 stretti lucernari in plexiglass permettono luce naturale di filtrare e illuminare lo spazio.
- 2 piastra alluminio
- 3 tiene il ruolo di canale per appendere le lamierie di alluminio
- 4 volte a botte cicloidale in ca
- 5 tetto in piombo
- 6 giuntura con bulloni
- 7 alluminio anodizzato/riflettori in alluminio forato a forma di ala sono appesi nella parte inferiore, consentono di diffondere la luce e conferendo alle superfici della volta un bagliore argentato e fornendo un'illuminazione discreta ma perfetta per le opere d'arte esposte.
- 8 integrazione luce artificiale

Immagine: schemi ingresso luce zenitale in pianta e sezione



Tenendo conto della posizione del sole in estate in Texas, la configurazione del lucernario impedisce l'ingresso diretto del sole negli spazi della galleria, creando una condizione di illuminazione diffusa ed evitando possibili bagliori indesiderati. Sebbene vi sia una fessura di luce lineare a ovest, il portico e il muro in travertino ne impediscono la penetrazione della luce solare diretta dalla fessura.



L'edificio è scandito da cortili, consentendo più luce, flusso d'aria e relazioni tra spazi interni ed esterni. La maggior parte delle gallerie si trovano al piano superiore, per consentire la maggior parte dell'illuminazione naturale.

# Kimball Art Museum Expansion / caso centro di esposizione

Componente solare diretta  
laterale e/o zenitale

Componente solare  
diretta + diffusa  
laterale e/o zenitale

Componente solare diffusa  
laterale e/o zenitale



morfologia edificio  
padiglione aperto  
e trasparente



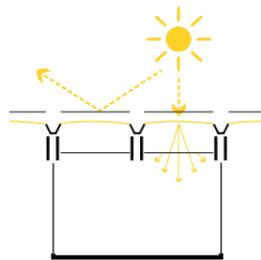
luogo / anno di costruzione  
Fort Worth, Texas  
US / 2013

architetto  
Renzo Piano

strategie impiegate  
combinazione siste-  
mi verticali e zenitali



sistema costruttivo  
struttura a trabeazione  
con singola colonna e  
doppia trave

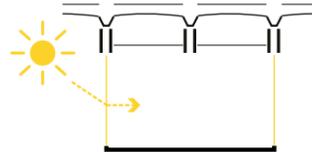


sistema zenitale  
Lucernari curvo a doppio  
vetro  
con integrazione della  
luce artificiale



schermature  
pannelli solari per blocco  
della luce solare diretta  
e  
tela di tessuto per diffusione  
della luce trasmessa

sistema verticale  
Aperture verticali sui lati  
esterni dell'edificio  
con  
persiane scorrevoli



materiali interni  
Vetro, cemento e legno

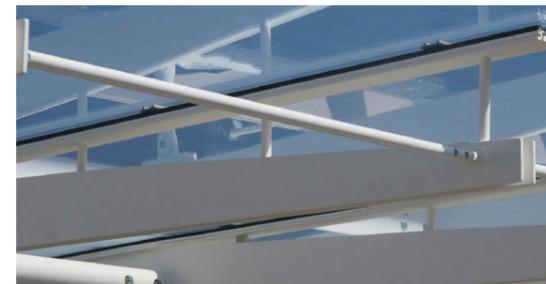


energia  
pannelli solari  
fotovoltaici motorizzati

La funzione primaria del padiglione è la conservazione e l'esposizione di opere d'arte che richiedono condizioni ambientali strettamente controllate. Un intenso coordinamento e sottili dettagli hanno guidato alla progettazione dell'illuminazione, dove i sistemi innovativi sono quasi invisibili. Queste soluzioni consentono al museo di funzionare in modo efficiente migliorando al tempo stesso l'esperienza del visitatore. (25)



pannelli solari motorizzati  
il sistema di pannelli fotovoltaici apribili sono posizionati sul lucernario. I pannelli solari possono essere ruotati manualmente fino a 180°, in modo da proteggere le celle dalla grandine, con angolazioni variabili a seconda delle condizioni esterne. Questo sistema è configurato per bloccare la luce diretta proveniente dal Sud, oltre a compensare fino al 70% delle emissioni di carbonio relative all'illuminazione.



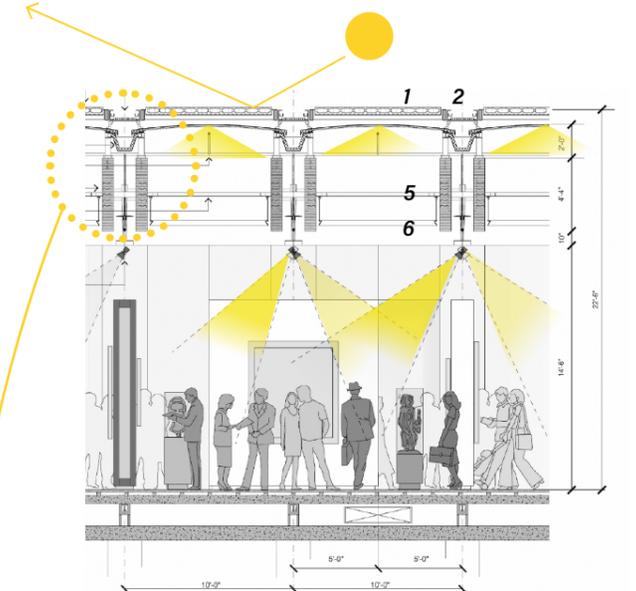
vetro fritto  
Al di sotto dei pannelli solari è posizionato uno strato di vetro fritto leggermente curvato, con un interstrato bianco e un liquido per evitare le riflessioni. Questo strato di vetro forma la barriera contro gli agenti esterni e fornire un'ulteriore diffusione della luce indiretta proveniente dal Nord che entra nell'edificio.



tela di tessuto  
La tela posta sotto lo strato di vetro ha due effetti: per primo, fornisce un'ulteriore strato di diffusione della luce che entra negli spazi della galleria; dall'altra parte, nasconde il vetro e il sistema reticolare orizzontale superiori creando così un'apparenza lineare e un ambiente luminoso uniforme in uno spazio dove era desiderato avere una luce soffusa, senza rischi di abbagliamento.

# Kimball Art Museum Expansion /

Immagine: sezione verticale



- 1 pannelli fotovoltaici in vetro e alluminio
- 2 grata calpestabile per manutenzione
- 3 lucernario curvo a doppio vetro
- 4 trave in legno lamellare
- 5 rinforzo in acciaio verniciato
- 6 pannelli tela di tessuto
- 7 supporto del sistema zenitale
- 8 pannello in metallo, finitura dell'isolante
- 9 attacco in alluminio tra le travi con taglio termico
- 10 giunto di movimento

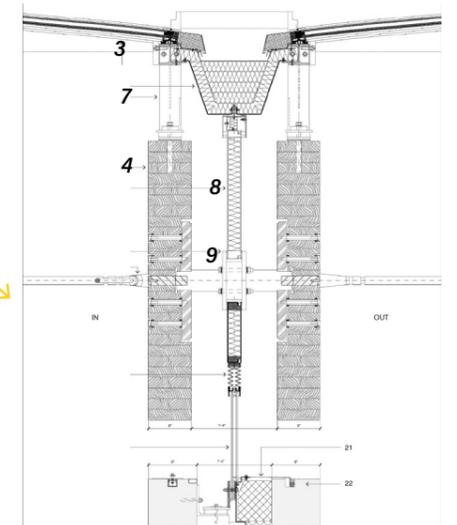


Immagine: dettaglio attacco al sistema zenitale

Componente solare diretta  
laterale e/o zenitale

Componente solare  
diretta + diffusa  
laterale e/o zenitale

Componente solare diffusa  
laterale e/o zenitale



morfologia edificio  
forma concava a  
semi-arco rivolta  
verso nord



luogo / anno di costruzione  
Kingsmead, Cheshire  
UK / 2004

architetti  
White Design  
Associates Ltd

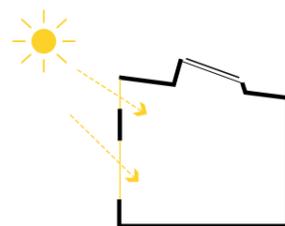
strategie impiegate  
combinazione siste-  
mi verticali e zenitali

sistema costruttivo  
struttura intelaiata in  
legno lamellare



schermature  
tende solari motorizzate  
con lamelle orientabili  
a 90°

sistema verticale  
Aperture verticali sui lati  
esterni dell'edificio  
con  
tende scorrevoli

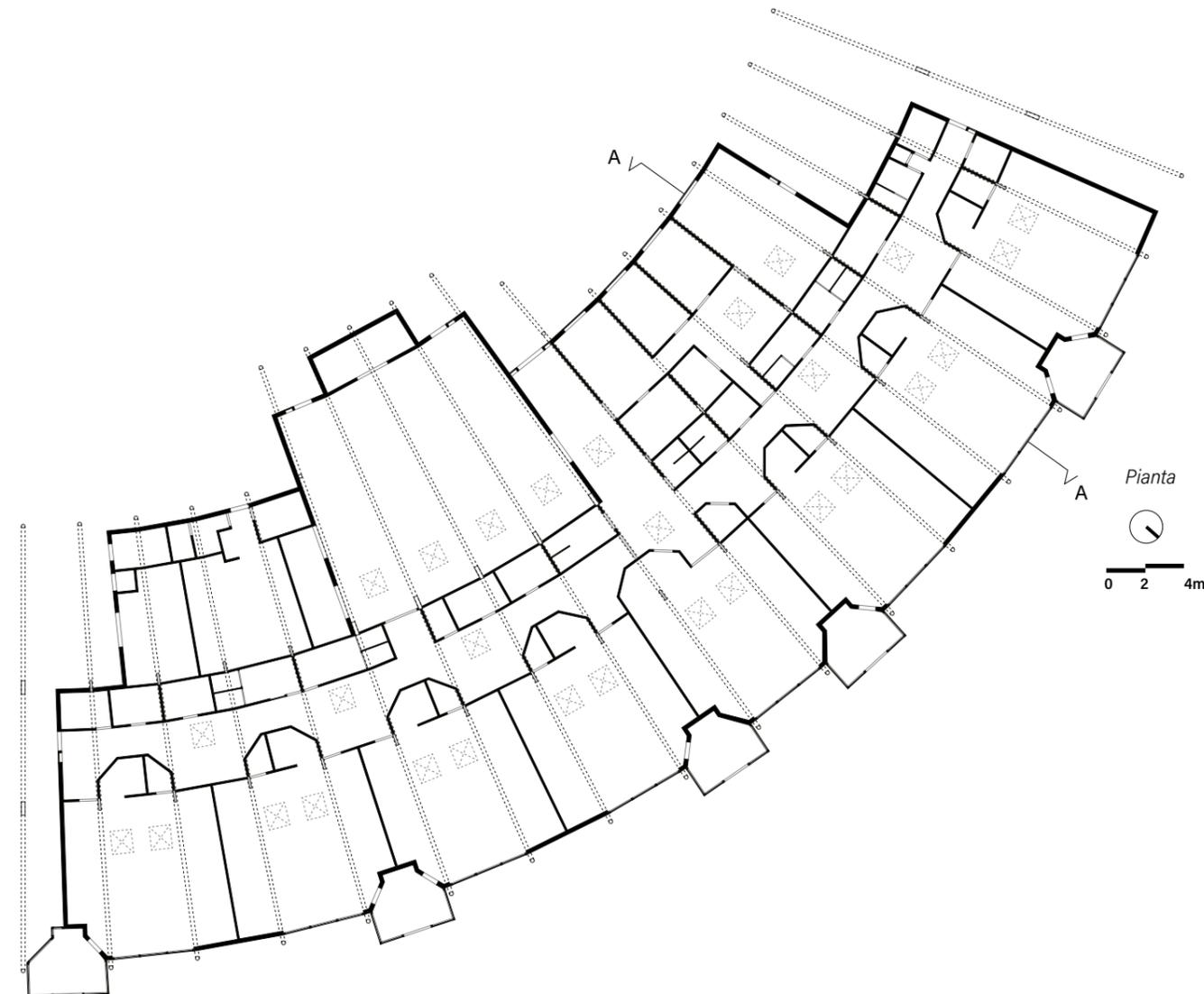


sistema zenitale  
Lucernari inclinati  
apribili dotati di tende  
solari motorizzate



materiali interni  
legno lamellare  
pannelli in bambù  
materiali riciclati

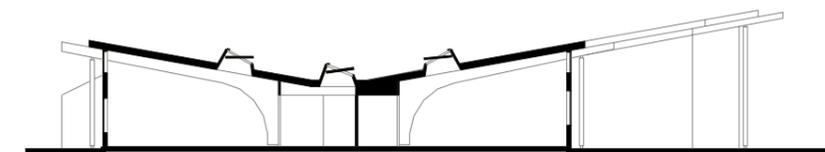
energia  
pannelli solari  
fotovoltaici



Pianta



0 2 4m



Sezione AA

0 2 4m

# Kindergarden Rosales del Canal / caso scolastico

# Kindergarden Rosales del Canal /

# Pianta & Sezione

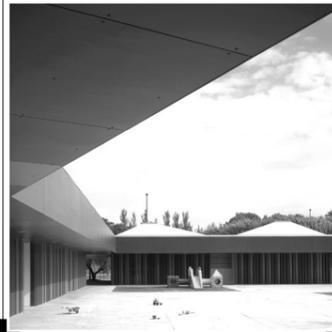
Componente solare diretta  
laterale e/o zenitale

Componente solare  
diretta + diffusa  
laterale e/o zenitale

Componente solare diffusa  
laterale e/o zenitale



morfologia edificio  
unità modulari quadrati  
con coperture a forma  
di piramide tronca  
con vari orientamenti



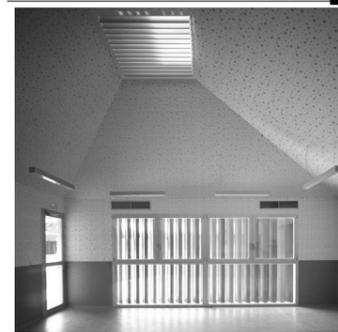
luogo / anno di costruzione  
Zaragoza,  
Spagna / 2009

architetti  
Magén Arquitectos

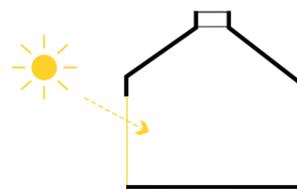
strategie impiegate  
combinazione siste-  
mi verticali e zenitali



sistema costruttivo  
struttura leggera a  
secco con la combi-  
nazione di elementi  
metallici e pannelli di  
legno



effetti della luce naturale  
luminosità uniforme  
controllo abbagliamento  
regolazione temperatura  
comfort acustico



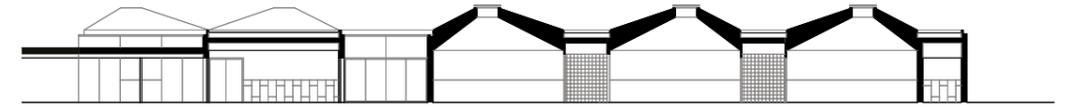
sistema verticale  
Apertura verticale  
a doppio vetro  
con  
lamelle di protezione  
solare motorizzati  
colorate



materiali interni  
facciata ventilata con  
pannello fenolico  
pannelli in legno colorati  
pannelli laminati perforati

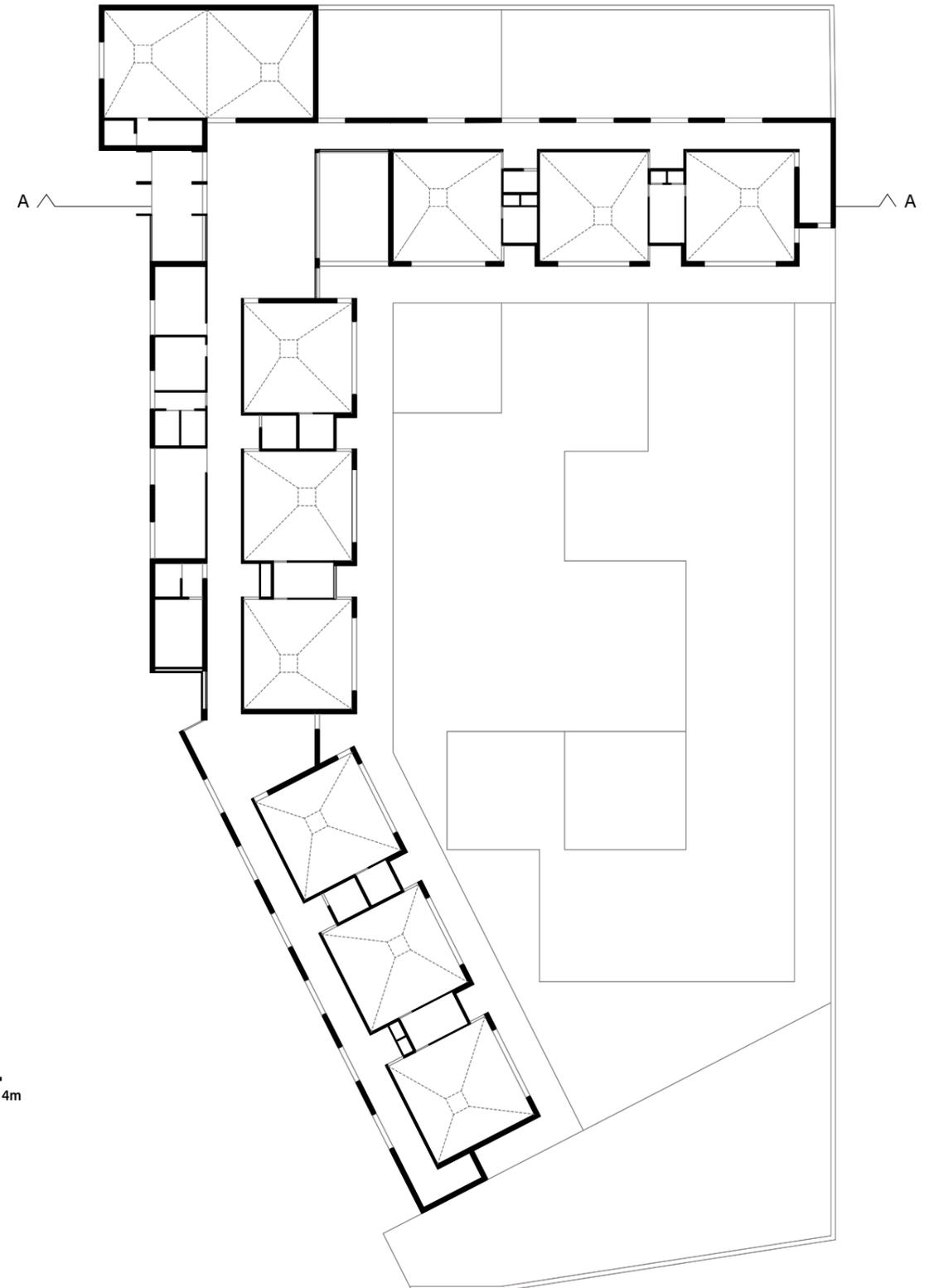


energia  
collettori solari



Sezione AA

0 2 4m



Pianta

0 2 4m

<p><b>Componente solare diretta</b> laterale e/o zenitale</p>	<p><b>Componente solare diretta + diffusa</b> laterale e/o zenitale</p>	<p><b>Componente solare diffusa</b> laterale e/o zenitale</p>
	<p>morfologia edificio <b>edificio lineare con copertura piana</b></p>	
<p>architetti <b>Atelier(s) Alfonso Femia</b></p>	<p>strategie impiegate <b>combinazione sistemi verticali e zenitali</b></p>	<p>luogo / anno di costruzione <b>Marostica, Italia / 2021</b></p>
		<p>sistema costruttivo <b>struttura portante prefabbricata in cemento armato</b></p>
<p>effetti della luce naturale <b>luminosità uniforme controllo abbagliamento</b></p>	<p>sistema zenitale <b>Lucernari continui opalino a vela in plexiglass</b></p>	
	<p>materiali interni <b>pannelli di cemento biodinamico e legno</b></p>	
	<p>energia <b>pannelli solari fotovoltaici e sistema radiante</b></p>	

*“progetto di riflessioni, luci, tagli, di trasparenze”*

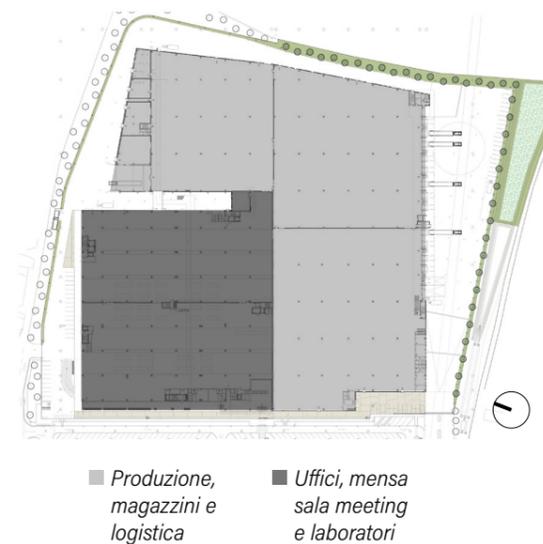


Immagine: pianta divisione funzionale (26)

Particolare attenzione si è posta nella composizione volumetrica dell'edificio; per questo sono state introdotte forme e superfici in grado di ridurre l'impatto dell'intervento nel paesaggio agricolo circostante offrendo un inserimento differente nella percezione da sud verso il centro di Marostica e da nord. La "luce" è il tema principale dell'azienda.

I magazzini e le superfici annesse (polo tecnologico e soppalco destinato a laboratori e uffici) sono riuniti in un unico edificio. Il soppalco che guarda a sud e ospita uffici e laboratori, gode della luce trasferita dalle grandi finestre a tutta altezza. Il magazzino alto più di 10 metri (18m) prende luce zenitale che si mescola con quella del soppalco.

Ma la luce trova sovrapposizione e contrapposizione nella cinta massiva, cioè il tamponamento prefabbricato. Un volume che si scava attraverso la luce, continua o che si spezza a seconda del materiale, trasparente o semitrasparente.

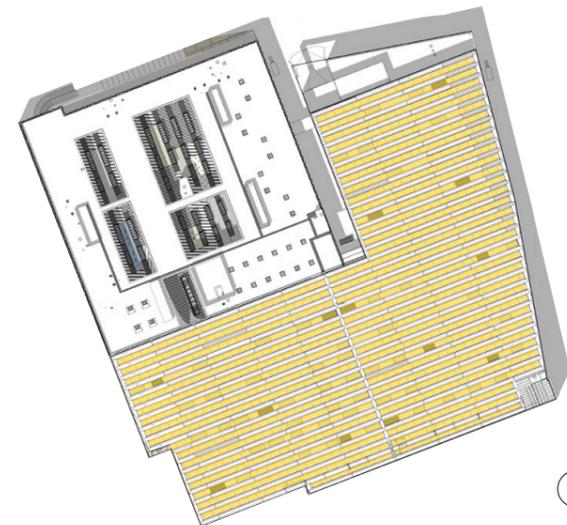


Immagine: pianta copertura sistema zenitale (26)

Un altro materiale che risalta è il calcestruzzo che domina il progetto, ne detta scansioni geometriche e colori che si innestano in equilibrio con il paesaggio agricolo. L'innovazione di un cemento biodinamico utilizzato come pannelli monolitici che assolvono a più fini, la finitura, al sistema termico, all'elemento strutturale e che permette di portare la luce all'interno. Un materiale industriale capace di vibrare con la luce, percepire l'edificio in modo diverso a seconda delle variazioni della luce nel corso della giornata. Collaboranti con il territorio, i materiali e le forme costruiscono una vera e propria architettura per la logistica. Un edificio che mette in avanti la percezione di ciò che gli sta all'esterno.

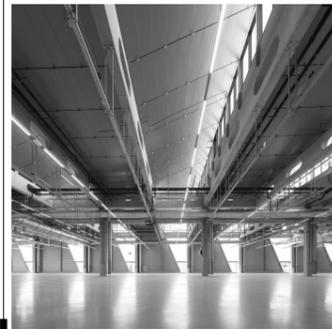
**Componente solare diretta**  
laterale e/o zenitale

**Componente solare diretta + diffusa**  
laterale e/o zenitale

**Componente solare diffusa**  
laterale e/o zenitale



morfologia edificio  
**quattro volumi lineari di capannoni**  
produttivi circondando  
una corta centrale

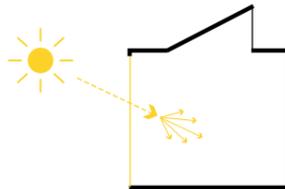


luogo / anno di costruzione  
**Kaufbeuren,**  
**Germania / 2014**

architetti  
**Barkow Leibinger**

strategie impiegate  
**combinazione sistemi verticali e zenitali**

sistema costruttivo  
**struttura portante prefabbricata in cemento armato**  
integrata con elementi in metallo

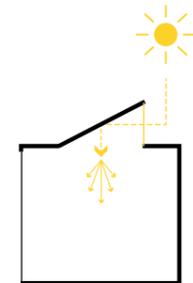


sistema verticale  
**facciate traslucide con vetro profilato UGlass**  
esposte ad est e sud



effetti della luce naturale  
**spazi di lavoro ben illuminati**  
controllo abbagliamento  
comfort termico  
orientamento favorevole

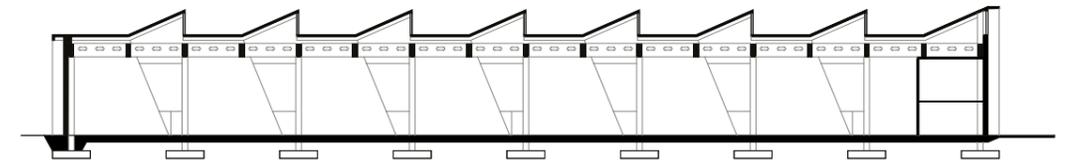
sistema zenitale  
**tetto a denti di sega con lucernari shed a 30°**  
con triplo vetro chiaro orientati a nord



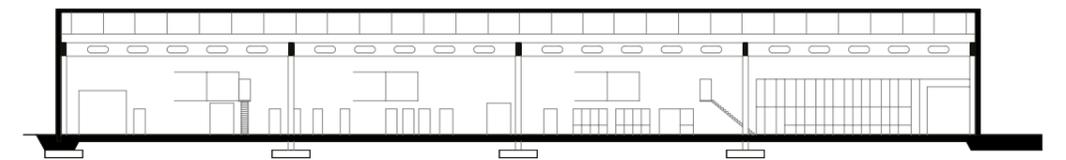
materiali interni  
**lamiera metallica**  
isolamento termico traslucido  
vetro coibentato  
triplo vetro trasparente  
colonne e travi prefabbricate in calcestruzzo



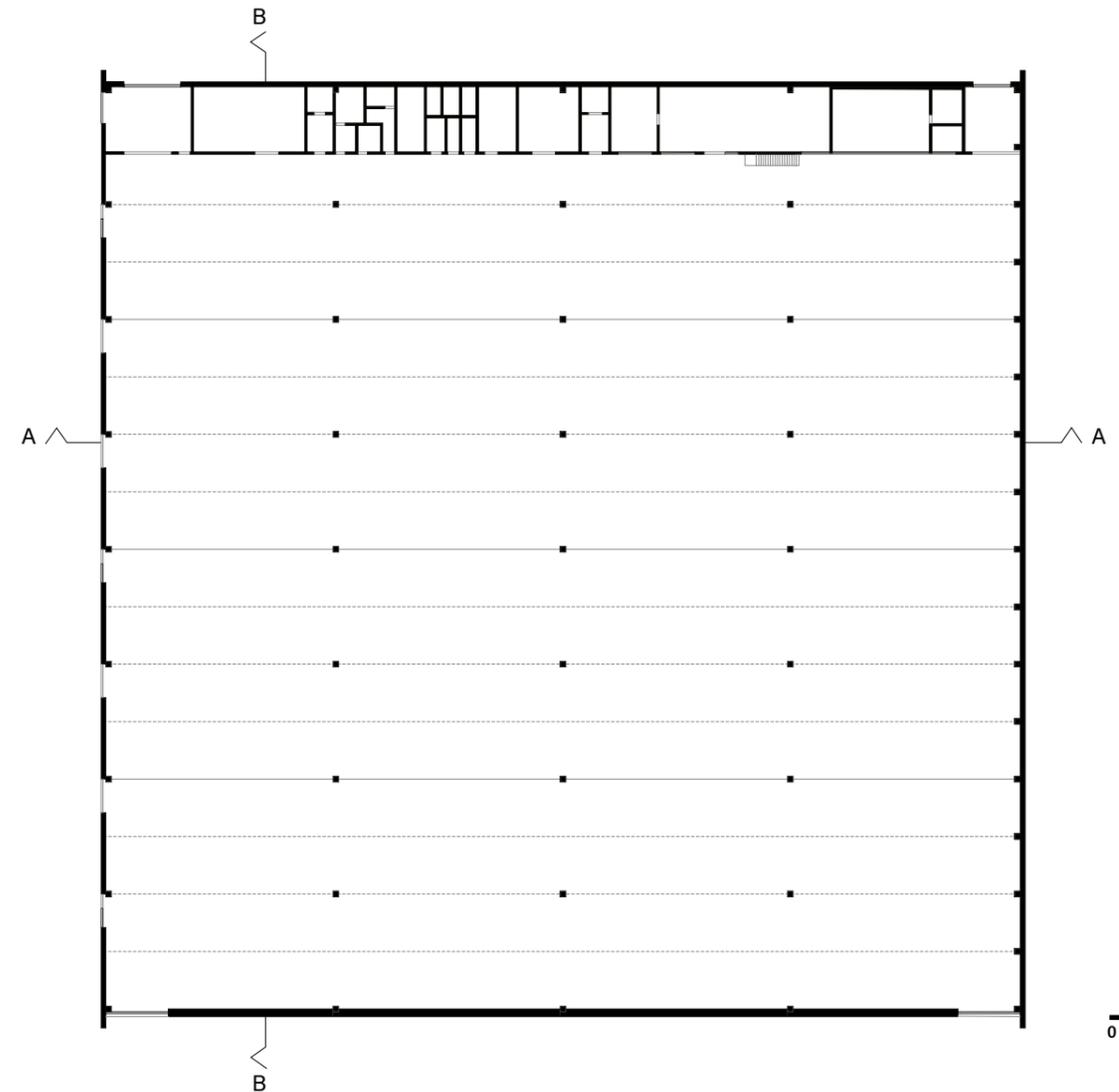
energia  
**pannelli solari fotovoltaici orientati a sud**



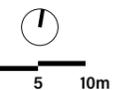
Sezione BB



Sezione AA



Pianta



# 08

## Analisi delle condizioni di illuminazione naturale

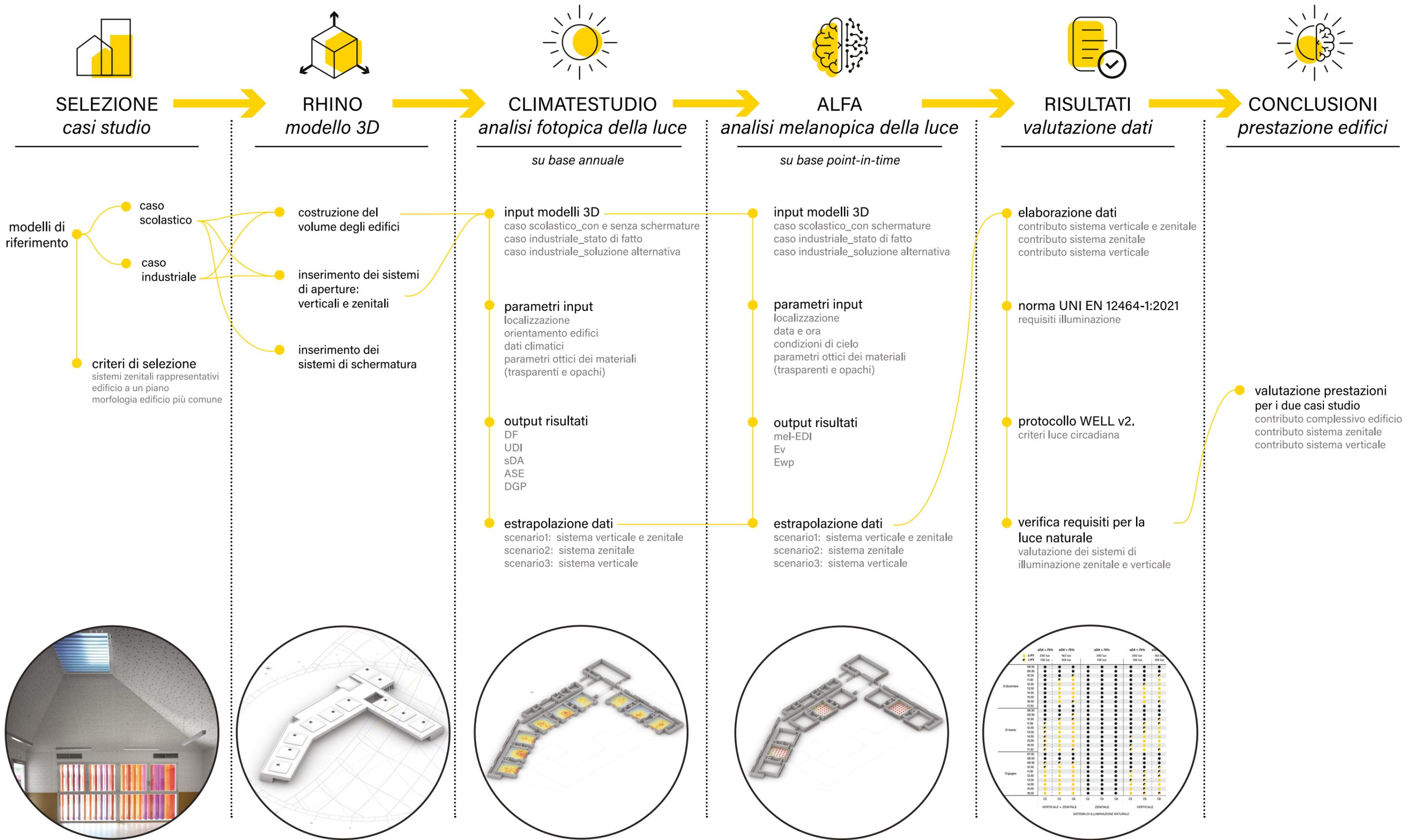
### Obiettivo /

Alla luce delle precedenti considerazioni sul tema dei sistemi di illuminazione zenitale dal punto di vista teorico, evidenziando le principali caratteristiche e le soluzioni più comunemente adottate in ambiente architettonico, è fondamentale approfondire l'argomento sul piano pratico attraverso simulazioni.

L'obiettivo è esaminare e verificare il livello di comfort e benessere, sia visivo che non visivo, offerto dalla luce naturale quando si utilizzano sistemi zenitali. Lo studio di un certo numero di casi nel precedente capitolo hanno fornito una panoramica su come questi sistemi zenitali vengano applicati e in quali contesti risultano più efficaci. Partendo da questa schedatura verranno selezionati due casi studio specifici: uno relativo a un ambiente scolastico e l'altro a un contesto industriale. Su questi esempi verrà condotta un'analisi sulle condizioni di illuminazione, utilizzando software per l'analisi dell'illuminamento fotopico e melanopico, necessari per svolgere attività lavorativa o altre attività negli edifici.

I risultati delle simulazioni permetteranno di confrontare le prestazioni dei sistemi di illuminazione naturale attraverso tre scenari distinti: combinazione di sistema verticale e zenitale, solo sistema zenitale e solo sistema verticale. Questo confronto permetterà di valutare il contributo che ha il sistema zenitale rispetto a quello verticale sul contributo di luce naturale complessivo dell'edificio, secondo diverse condizioni di cielo. Infine, sarà verificato se questi scenari rispettano i requisiti delle normative vigenti, come il protocollo WELL, per ciascun modello di riferimento analizzato.

# WORKFLOW / progetto di simulazione



## 8.1 Selezione / casi studio



Il lavoro di analisi è iniziato con il definire un modello di riferimento basato sui casi studio analizzati nel capitolo precedente. Secondo diversi criteri, tra cui la morfologie dell'edificio e la tipologia del sistema di illuminazione zenitale adottato, sono stati selezionati due edifici rappresentativi di due ambiti in cui l'uso dei sistemi zenitali è più frequente: uno scolastico e uno industriale. Successivamente, sono stati creati modelli tridimensionali per ciascuno di essi.

### Modello scolastico

L'analisi dell'illuminazione naturale è stato condotto utilizzando come riferimento l'asilo nido di Rosales del Canal a Zaragoza (Spagna), situato in una zona di espansione residenziale nel sud-ovest della città. L'edificio lineare è sviluppato su un unico piano e si compone di nove aule, organizzate in un'unità di sistemi modulari quadrati di dimensioni identiche ma con orientamenti diversi. Le aule si affacciano su una corte interna e sono collegate da un portico esterno che corre lungo tutto il perimetro, offrendo una visuale aperta verso il paesaggio naturale a ovest.

La posizione e la configurazione dell'edificio permettono un'illuminazione naturale e una visione esterna nelle aule, grazie a una vetrata verticale che si apre sulla corte e a un lucernario orizzontale posto sul colmo della copertura inclinata. Entrambe le aperture sono dotate di un sistema di schermatura a lamelle verticali mobili per adattarsi alle condizioni ambientali esterne.

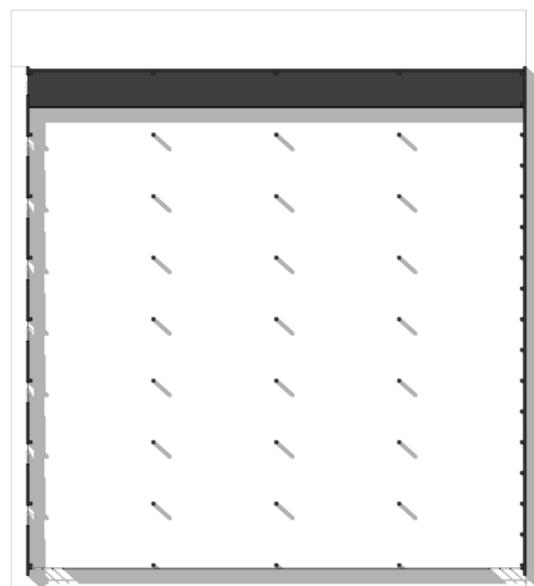


Ricostituzione della pianta / modello scolastico

### Modello industriale

In questo studio, il riferimento preso come modello di riferimento è l'impianto industriale della fabbrica HAWE, specializzata nella produzione di sistemi e componenti idraulici, situata a Kaufbeuren (Germania) in un contesto di paesaggio agricolo, che favorisce una libera vista verso l'esterno. La fabbrica è costituita principalmente da quattro capannoni di produzione con pianta rettangolare, orientati verso nord.

La posizione e la configurazione degli edifici industriali includono aperture verticali sulla facciata ovest, una facciata sud completamente opaca e un sistema di lucernari a shed orientati a nord, progettati per massimizzare l'ingresso di luce naturale negli spazi interni. Poiché tutti e quattro i capannoni presentano la stessa configurazione e orientamento, la simulazione verrà eseguita considerando solo uno dei quattro volumi.



Ricostituzione della pianta / modello industriale

Successivamente, è stato creato un modello alternativo di capannone che, pur mantenendo le stesse dimensioni del modello di riferimento, è stato sostituito il sistema a shed con un lucernario orizzontale. Questa modifica ha consentito di confrontare l'efficacia di due diverse tipologie di sistemi zenitali nelle medesime condizioni.

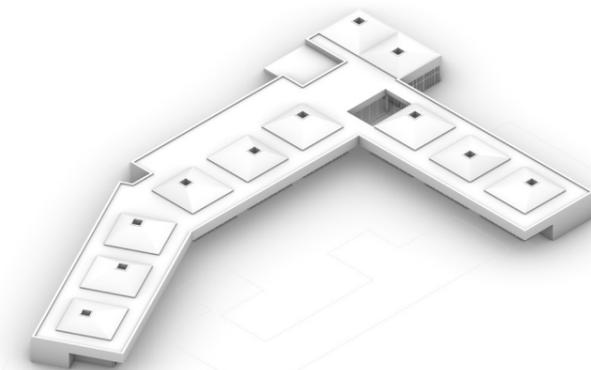
## 8.2 Modellazione / Rhinoceros 3D



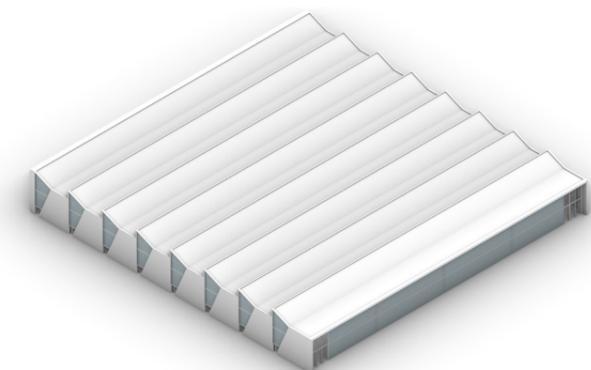
Il primo passo per poter utilizzare i software di simulazione è stato l'elaborazione di modelli tridimensionali per i casi studio scolastico e industriale, impiegando il software Rhinoceros 3D (versione 8) e basandosi sulle planimetrie disponibili. Le dimensioni, come lo spessore dei muri, le altezze e le larghezze dei sistemi di illuminazione zenitale e verticale, nonché i sistemi di schermatura esistenti, sono state replicate il più fedelmente possibile agli edifici reali, al fine di ottenere risultati di simulazione più accurati. Per quanto riguarda il contesto urbano, non sono stati modellati altri edifici, poiché non sono presenti nelle vicinanze o non influenzano significativamente l'apporto di luce naturale negli ambienti interni. Tuttavia, il pavimento esterno è stato considerato, dato che le sue proprietà riflettenti potrebbero avere un impatto, seppur minimo.

È stato intrapreso un primo approccio ai materiali impiegati in ciascun edificio, suddividendoli in vari layer per semplificare le fasi successive del lavoro. La tabella sottostante sintetizza gli elementi principali considerati nella costruzione della base per lo studio di simulazione. Inoltre, l'arredo interno dei due ambienti non è stato preso in considerazione, con l'obiettivo di ridurre i tempi di simulazione e concentrare principalmente l'analisi sull'efficacia tra lo spazio interno e i sistemi di illuminazione naturale.

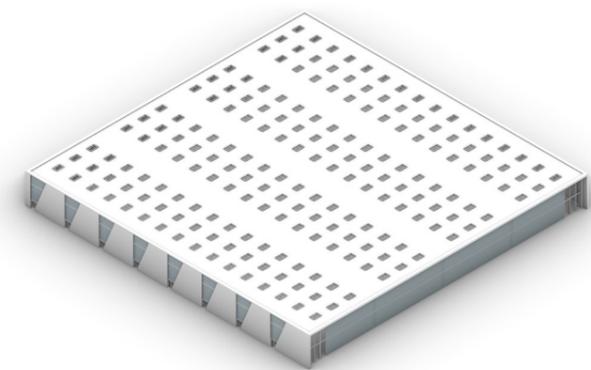
Layer materiali	edificio scolastico	edificio industriale
<b>volume edificio</b>		
parete (interno e esterno)	✓	✓
pavimento interno	✓	✓
superficie soffitto	✓	✓
superficie copertura	✓	✓
porte interne (telaio e superficie)	✓	✓
<b>componente trasparente</b>		
apertura verticale	✓	✓
apertura zenitale	✓	✓
telaio apertura	✓	✓
<b>componente schermante</b>		
lamelle e traversa	✓	✗
<b>contesto esterno</b>		
pavimento calpestabile	✓	✓
vegetazione	✓	✓



Vista modello 3D / modello scolastico

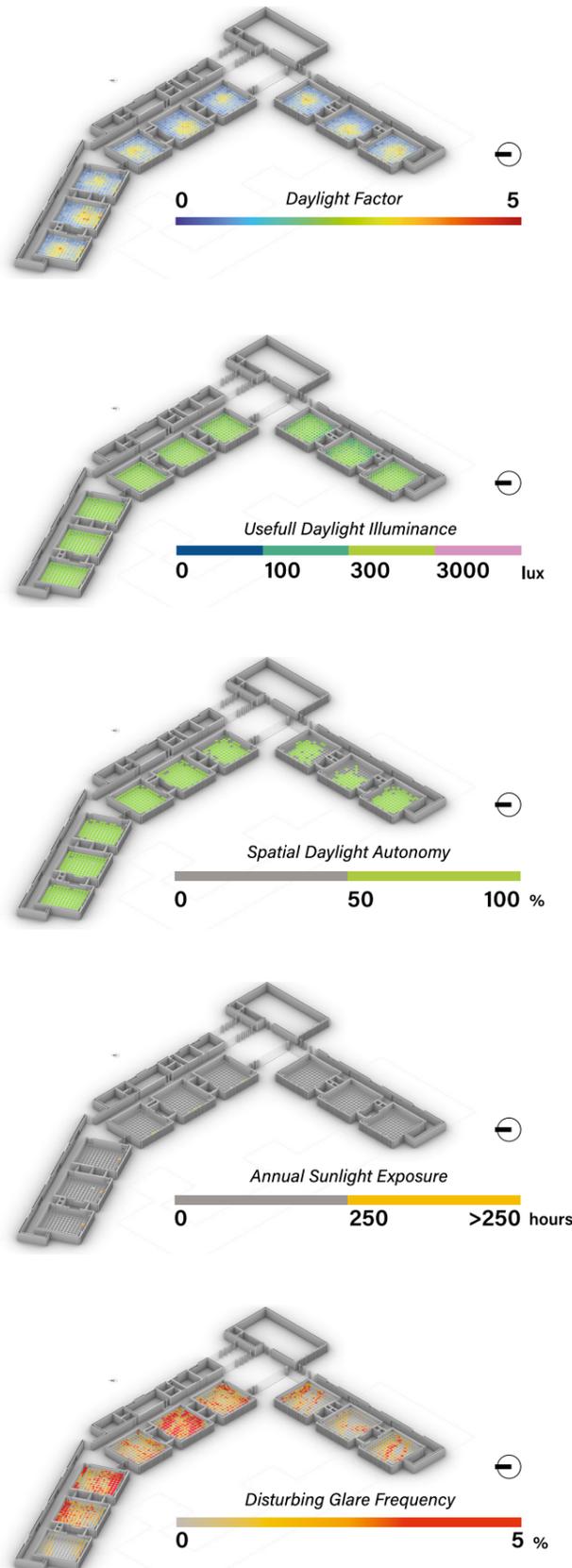


Vista modello 3D / modello industriale dello stato di fatto



Vista modello 3D / modello industriale soluzione alternativa

### 8.3 Effetto fotopico della luce / CLIMATESTUDIO



Le simulazioni per l'analisi dell'illuminazione naturale sono state eseguite utilizzando il plugin **ClimateStudio** integrato in Rhino 3D, parte del software Solemma. Si tratta di un programma avanzato per la simulazione della luce naturale, illuminazione elettrica e termica.

La valutazione della disponibilità di luce diurna nei due modelli è stata condotta in tre fasi, utilizzando diverse metriche che misurano la distribuzione dell'illuminamento all'interno degli ambienti, durante l'intero anno, con l'obiettivo di determinare se la luce diurna è sufficiente per svolgere attività lavorative e altre attività all'interno degli edifici. È stato inoltre utilizzato, per ogni caso studio, il file climatico relativo alla località del progetto.

Il primo passaggio tiene conto della metrica del **"Daylight Factor"**, il fattore di luce diurna è definito come il rapporto tra l'illuminamento in un punto di un edificio diviso per l'illuminamento in un sensore esterno rivolto verso l'alto e non ombreggiato. Il cielo di riferimento per il calcolo è il cielo coperto CIE. Il secondo passaggio invece, verrà fatto con il **"Custom Daylight Availability"** che raggruppa il calcolo di una serie di metriche annuali tra cui: Useful Daylight Illuminance (UDI), Spatial Daylight Autonomy (sDA), Annual Sunlight Exposure (ASE). Infine, il terzo passaggio verrà fatto con la metrica **"Daylight Glare Probability"** (DGP) che calcola le distribuzioni annuali di abbagliamento su un'area di pavimento occupata, che si basa sulla parte di illuminamento verticale della formula DGP di Wienold e Christofferen. [63]

Nel modello scolastico, il sistema di schermatura a lamelle verticali orientabili, presente nel caso studio di riferimento, è stato considerato secondo due scenari: uno senza schermatura e l'altro con lamelle aperte a 90° rispetto alla superficie trasparente. Questo approccio è stato adottato per rendere meno complessa la lettura delle simulazioni e poter valutare l'efficacia del sistema di schermatura nell'apporto di luce diurna all'interno delle aule.

Risultati simulazione con ClimateStudio / modello scolastico  
 Sistema di illuminazione naturale / verticale e zenitale  
 Sistema di schermatura / lamelle aperte a 90°

### 8.4 Effetto melanopico della luce / ALFA



In un secondo tempo, dopo aver determinato i livelli di illuminazione naturale necessari per svolgere il compito visivo sia nel caso scolastico che industriale, è stato utilizzato un secondo plugin su Rhino 3D, anch'esso sviluppato da Solemma LLC: **ALFA** (adaptive lighting for alertness). È un programma che consente ad architetti o progettisti di illuminazione di prevedere e controllare gli effetti non visivi per non compromettere la qualità del sonno, le prestazioni e la salute a lungo termine delle persone, e di creare ambienti più sicuri, più sani e più produttivi. Inoltre, ALFA è l'unico strumento in grado di prevedere l'illuminamento melanopico (EML) mediante simulazioni fisicamente accurate e ad alta risoluzione spettrale, semplifica il calcolo dei crediti WELL Circadian Lighting e include obiettivi regolabili per soddisfare le esigenze di qualsiasi progetto. [64]

Il primo passo prima di avviare la simulazione è stato quello di definire i parametri di localizzazione per ogni caso, inclusi: i dati geografici dell'edificio (latitudine e longitudine); la condizione temporale (mese, giorno, ora) e la condizione del cielo. (fig) Con queste impostazioni le simulazioni, istantanee e non annuali, sono state eseguite basandosi su un profilo di occupazione ipotetico per entrambe l'ambito scolastico e industriale, scegliendo tre giorni specifici dell'anno (solstizio d'inverno, solstizio d'estate ed equinozio di primavera) per avere condizioni estremamente diversi e acquisire una visione più ampia dell'illuminamento melanopico. Tutte le simulazioni sono state condotte considerando sia condizioni di cielo sereno che di cielo coperto. Per il modello scolastico, è stato considerato solo lo scenario con il sistema di schermatura presente, con lamelle aperte a 90° in tutte le condizioni. Le simulazioni sono state effettuate su tre delle nove aule, in particolare le aule C2, C5 e C8, che rappresentano situazioni né completamente esposte alla luce né totalmente ombreggiate. Successivamente, è stato necessario specificare i materiali delle superfici, cercando di selezionare quelli con proprietà più simili a quelli utilizzati su ClimateStudio.

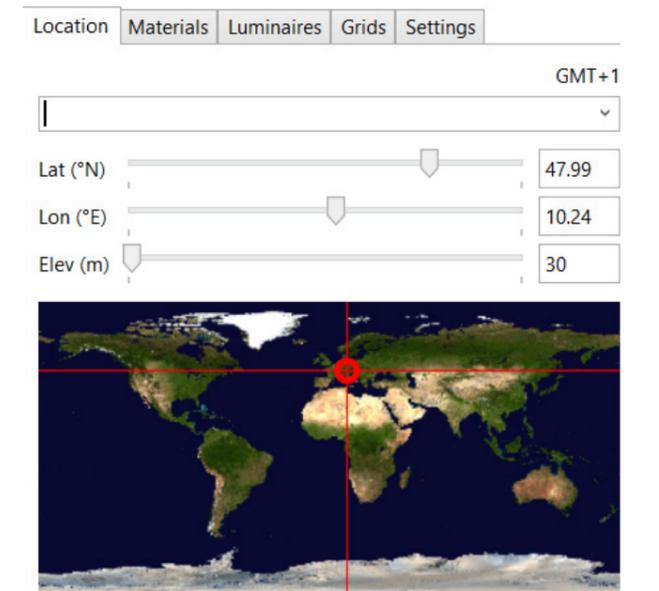
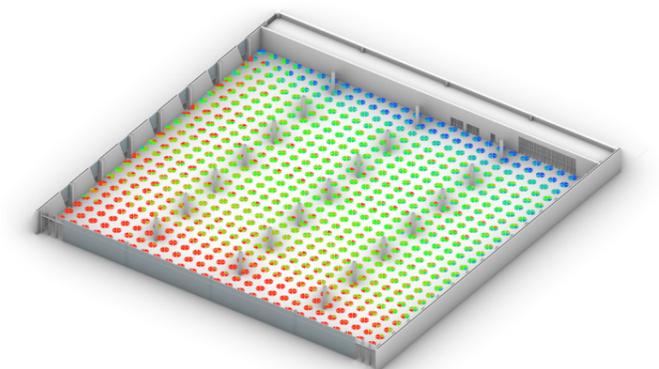
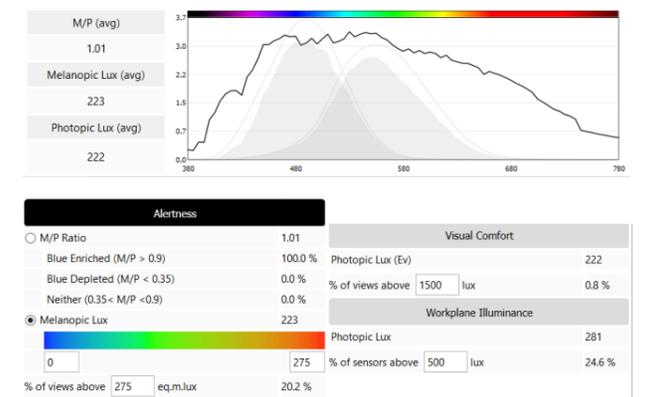


Figura : input parametri di localizzazione su ALFA / caso industriale



Risultati simulazione con ALFA / modello industriale stato di fatto  
 scenario sistema zenitale a shed il 21dic alle 10.30 con cielo coperto

## 8.5 Risultati simulazioni / VALUTAZIONE



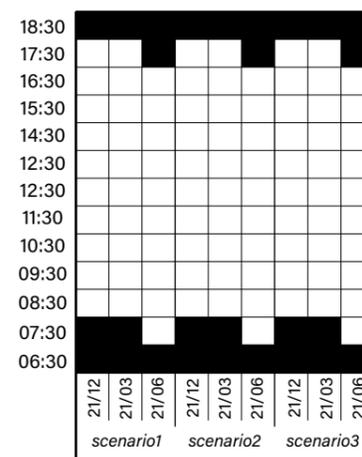
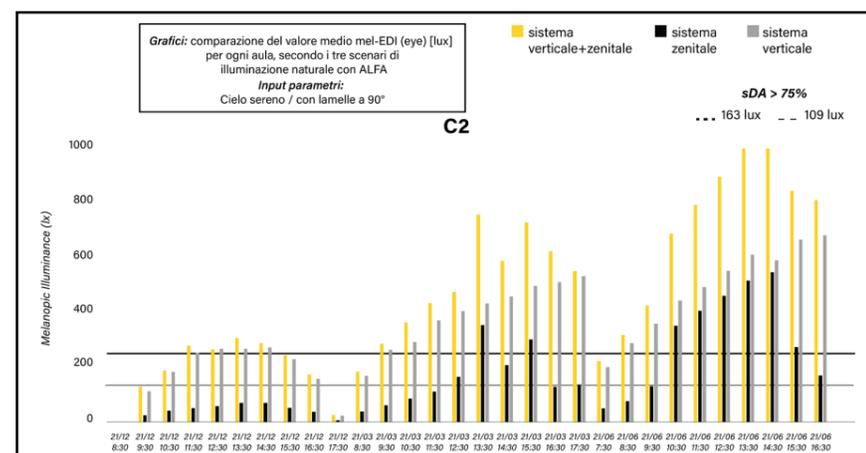
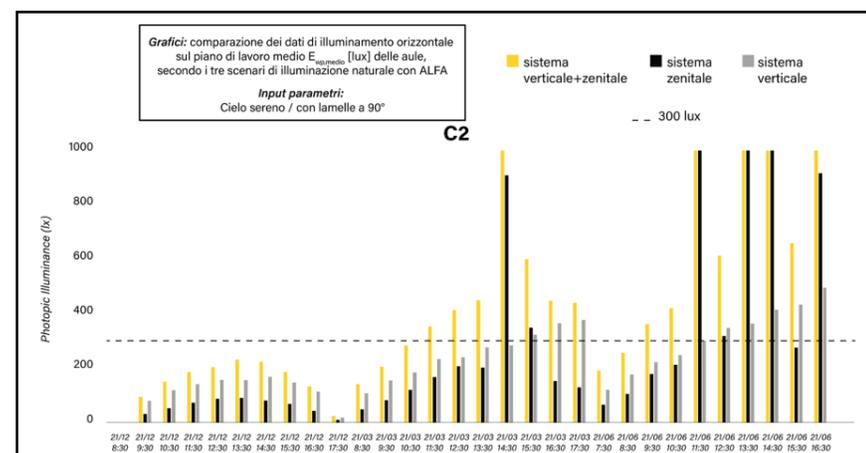
Al termine delle simulazioni condotte tramite ClimateStudio e ALFA per il modello scolastico e industriale, che includevano le due varianti di sistemi zenitali (shed e lucernario), i dati relativi all'illuminamento naturale e circadiano sono stati raccolti e analizzati per ciascuno dei tre scenari. Questo ha permesso di condurre un'analisi complessiva sul contributo del sistema di illuminazione zenitale in combinazione con quello verticale, nonché di valutare l'efficacia individuale di ciascun sistema nel fornire luce naturale all'interno degli ambienti.

Nella valutazione del contributo di questi sistemi sono stati fissati diverse soglie da convalidare:

- Un illuminamento fotopico sul piano di lavoro  $E_{wp}$  che soddisfa un valore di 300 lux nel caso scolastico e un valore di 500 lux nel caso industriale per poter svolgere il compito visivo (secondo i criteri della norma 12464-1), nelle condizioni sia di cielo sereno che di cielo coperto.

- Un illuminamento circadiano a livello degli occhi **mel-EDI** che si verifica con un valore minimo di 109 lux o 136 lux in tutte le condizioni per almeno 4 ore, che corrisponde nel requisito del protocollo WELL ad 1 punto. Oppure si verifica un valore minimo di 163 lux o 250 lux sempre nelle stesse condizioni, per ottenere 3 punti secondo il requisito del protocollo WELL. Questa valutazione dovrebbe essere fatta secondo il protocollo durante tutto l'anno ma nel nostro caso sono stati fatti solo su tre giorni.

Per analizzare in modo più chiaro questi criteri da soddisfare secondo i dati ricavati dalle simulazioni effettuati, sono stati realizzati dei grafici riassuntivi per ogni caso studio che mettono in confronto il contributo dei tre scenari ipotizzati: combinazione sistema verticale e zenitale, sistema zenitale unico e sistema verticale unico, sul piano dell'illuminazione naturale e l'illuminazione circadiana.



Profilo di occupazione per il caso scolastico e industriale nella valutazione del contributo dei sistemi di illuminazione zenitale e verticale per l'illuminamento melanopico, in condizioni di cielo coperto e cielo sereno.

Estratti grafici risultati / modello scolastico confronto valore medio mel-EDI e  $E_{wp,medio}$  per ogni scenario nell'aula C2, in condizione di cielo sereno.

# 09

**Risultati  
delle analisi**

## 9.1 Caso scolastico /

Prima di esporre i risultati relativi al modello scolastico, sarà mostrata una serie di schemi che riassumono le caratteristiche principali dell'edificio di riferimento, offrendo una panoramica delle condizioni in cui sono state effettuate le simulazioni nelle nove aule prese in esame. All'interno della aule sono presenti dei materiali di finitura sul pavimento e parte della parete (in PVC di colore verde, blu, giallo) posti in modo alternato tra le aule, e questo verrà preso in considerazioni nell'attribuzione di materiali su ClimateStudio e ALFA, perché ogni colore è caratterizzato da proprietà di riflessione spettrale diverse, anche se minime.

Rapporto aeroilluminante (R.A.I.) della singola unità dell'aula

**sistema zenitale**

$$S_w = 1.30 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{floor}} = 51 \text{ m}^2$$

$$S_w/S_{\text{floor}} = 0.02$$

**sistema verticale**

$$S_w = 13.6 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{floor}} = 51 \text{ m}^2$$

$$S_w/S_{\text{floor}} = 0.26$$

Condizioni geoclimatiche

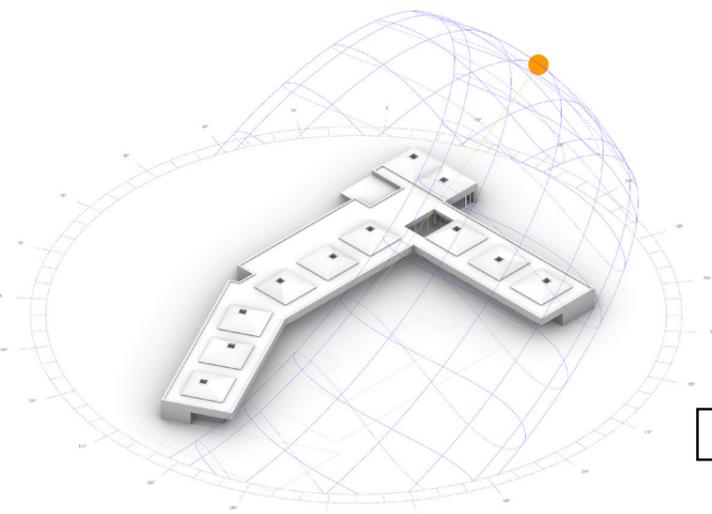
**Localizzazione**

Zaragoza, AR, ESP  
41.67° N, 1.04° W

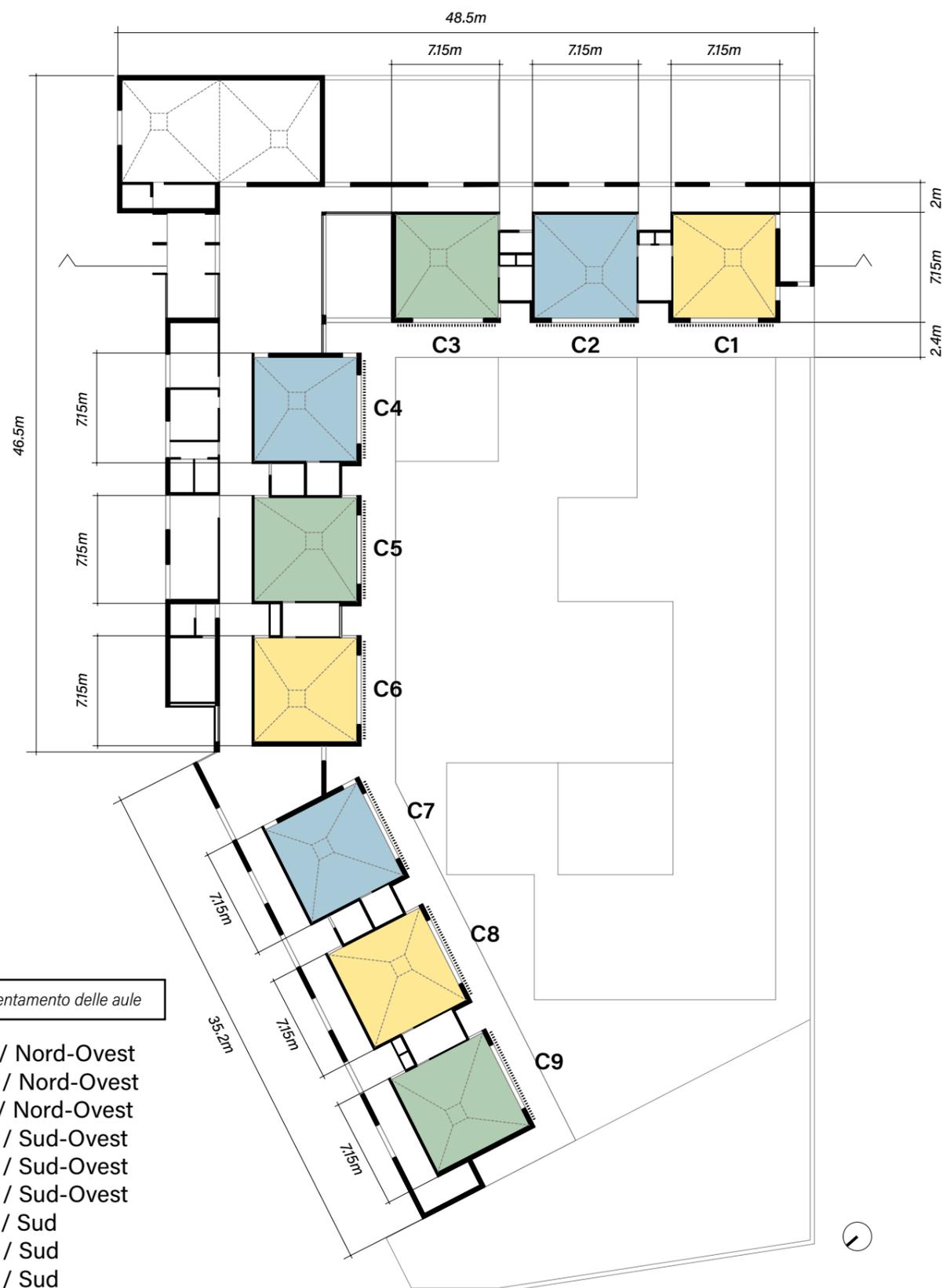
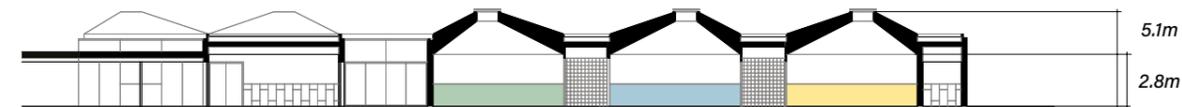
**Zone climatica**

Clima semiarido freddo  
(BSk)

Percorso solare nel modello scolastico



Immagini interno ed esterno delle aule (27)



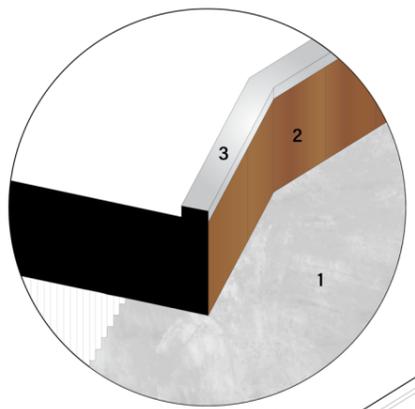
Orientamento delle aule

- C1 / Nord-Ovest
- C2 / Nord-Ovest
- C3 / Nord-Ovest
- C4 / Sud-Ovest
- C5 / Sud-Ovest
- C6 / Sud-Ovest
- C7 / Sud
- C8 / Sud
- C9 / Sud

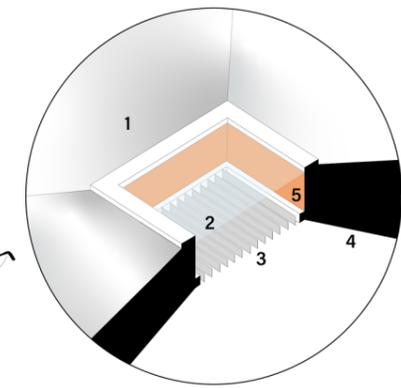


- 1 **pavimento esterno**  
cemento chiaro  
 $R_v$   
22%
- 2 **sporgenza porticato**  
facciata ventilata in pannelli  
fenolici rifiniti in legno naturale  
 $R_v$   
15%
- 3 **cornicie sporgenza**  
pannelli in alluminio  
 $R_v$   
65%

**dettaglio**  
porticato corte

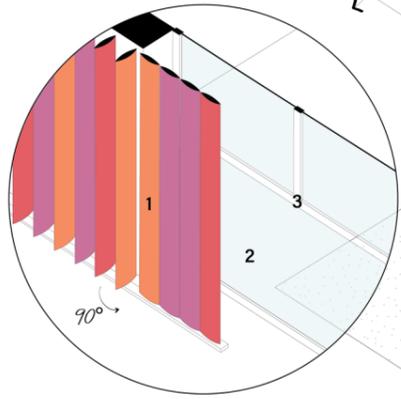


**dettaglio**  
lucernario orizzontale



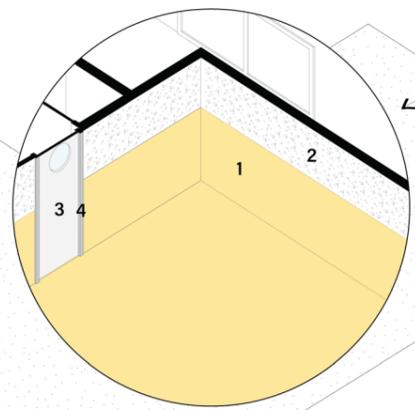
- 1 **tetto spiovente**  
pannelli metallici coibentati  
 $R_v$   
65%
- 2 **apertura orizzontale**  
doppio vetro  
basso emissivo  
 $T_v$  SHGC U-value  
70% 0.46 1.66 W/m<sup>2</sup>K
- 3 **schermatura**  
lamelle in alluminio  
anodizzato motorizzate  
 $R_v$   
50%
- 4 **soffitto interno**  
pannelli con finitura bianca  
 $R_v$   
86%
- 5 **parete interna lucernario**  
pannelli con finitura colorata  
 $R_v$   
48%

**dettaglio**  
schermatura esterna



- 1 **frangisole verticale**  
con lamelle in alluminio  
colorate motorizzate  
 $R_v$   
44%
- 2 **apertura verticale**  
a doppio vetro chiaro  
 $T_v$  SHGC U-value  
70% 0.46 1.66 W/m<sup>2</sup>K
- 3 **telaio apertura**  
in alluminio  
 $R_v$   
72%

**dettaglio**  
materiali interni aule



- 1 **pavimento e parete inferiore**  
in PVC con finitura colorata  
 $R_v$   
52%
- 2 **parete superiore**  
pannelli laminati forati con  
finitura bianca fonoassorbenti (stato di fatto)  
pannelli con finitura bianca (su climatestudio)  
 $R_v$   
80%
- 3 **porta interna**  
in legno verniciato  
colore chiaro  
 $R_v$   
75%
- 4 **telaio porta interna**  
in alluminio  
 $R_v$   
20%

**Proprietà materiali**

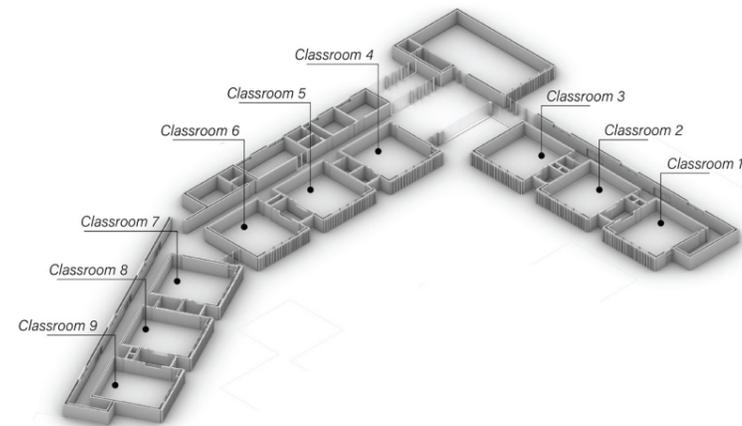
- Trasmissione visibile  $T_v$
- Riflessione visibile  $R_v$
- Fattore solare SHGC
- Trasmittanza termica U-value

## SCENARIO 1

sistema di illuminazione / verticale e zenitale

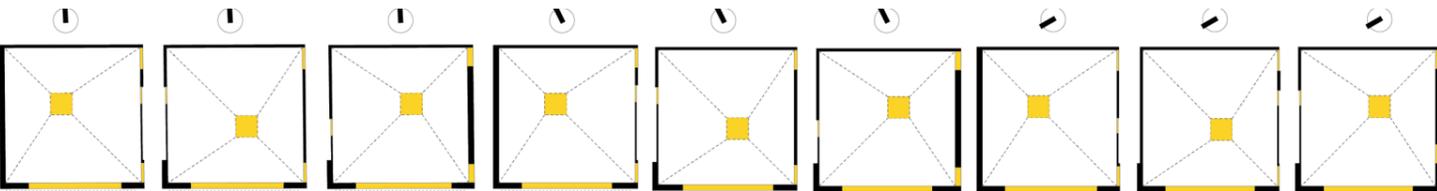
### Prestazioni dei sistemi di illuminazione - tutte le aule

	con schermatura	schermatura assente
DF <sub>m</sub>	1.40%	DF <sub>m</sub> 2.20%
UDI <sub>a</sub>	63%	UDI <sub>a</sub> 77%
sDA	80%	sDA 97%
ASE	1.00%	ASE 4.00%



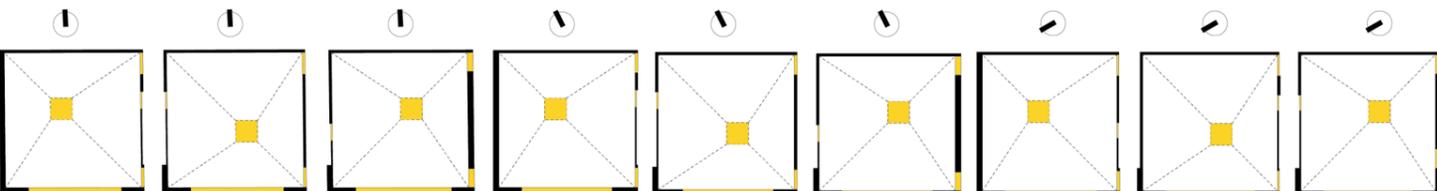
### Prestazioni dei sistemi di illuminazione - singole aule

Sistema di schermatura / lamelle aperte a 90°



	Classroom 9	Classroom 8	Classroom 7	Classroom 6	Classroom 5	Classroom 4	Classroom 3	Classroom 2	Classroom 1
DF	1.53%	DF 1.54%	DF 1.27%	DF 1.45%	DF 1.42%	DF 1.17%	DF 1.30%	DF 1.25%	DF 1.52%
UDI <sub>a</sub>	75%	UDI <sub>a</sub> 74%	UDI <sub>a</sub> 66%	UDI <sub>a</sub> 70%	UDI <sub>a</sub> 67%	UDI <sub>a</sub> 59%	UDI <sub>a</sub> 47%	UDI <sub>a</sub> 46%	UDI <sub>a</sub> 63%
sDA	98%	sDA 99%	sDA 85%	sDA 97%	sDA 93%	sDA 72%	sDA 51%	sDA 43%	sDA 79%
ASE	0.70%	ASE 0.70%	ASE 0.70%	ASE 2.00%	ASE 2.00%	ASE 3.50%	ASE 0.00%	ASE 0.00%	ASE 0.00%

Sistema di schermatura / assente



	Classroom 9	Classroom 8	Classroom 7	Classroom 6	Classroom 5	Classroom 4	Classroom 3	Classroom 2	Classroom 1
DF	2.51%	DF 2.52%	DF 2.12%	DF 2.37%	DF 2.34%	DF 1.87%	DF 2.03%	DF 2.06%	DF 2.37%
UDI <sub>a</sub>	82%	UDI <sub>a</sub> 81%	UDI <sub>a</sub> 80%	UDI <sub>a</sub> 81%	UDI <sub>a</sub> 79%	UDI <sub>a</sub> 72%	UDI <sub>a</sub> 72%	UDI <sub>a</sub> 69%	UDI <sub>a</sub> 81%
sDA	100%	sDA 100%	sDA 100%	sDA 100%	sDA 100%	sDA 97%	sDA 92%	sDA 81%	sDA 100%
ASE	7.00%	ASE 8.00%	ASE 5.50%	ASE 5.50%	ASE 5.50%	ASE 6.00%	ASE 0.00%	ASE 0.00%	ASE 0.00%

## SCENARIO 1

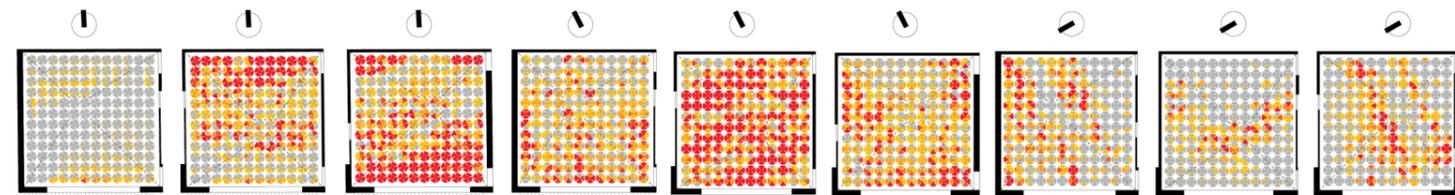
sistema di illuminazione / verticale e zenitale

### Daylight Glare Probability - tutte le aule

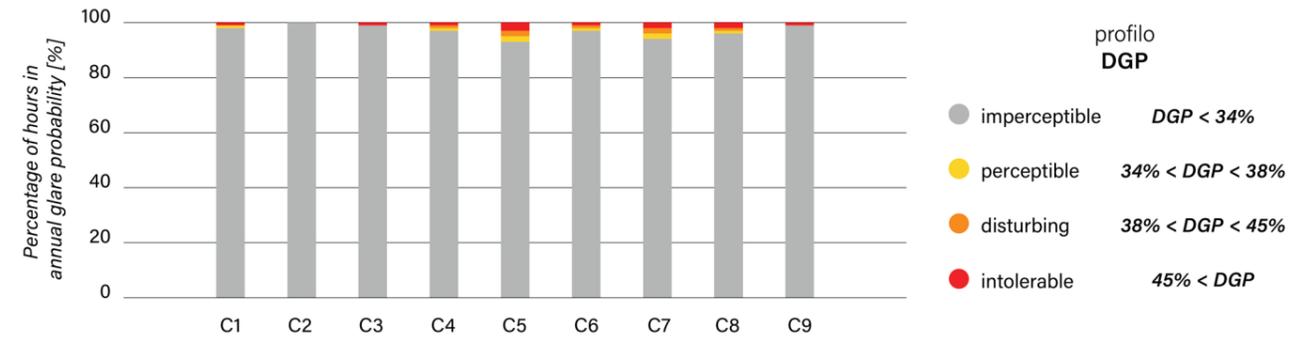
	con schermatura	schermatura assente
sDG	12.5%	sDG 36.6%

### Daylight Glare Probability - singole aule

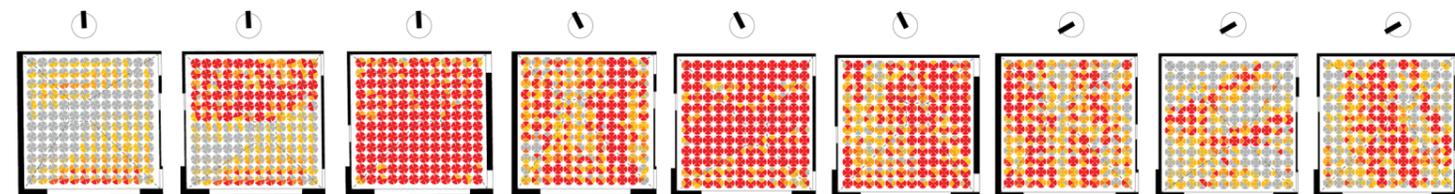
Sistema di schermatura / lamelle aperte a 90°



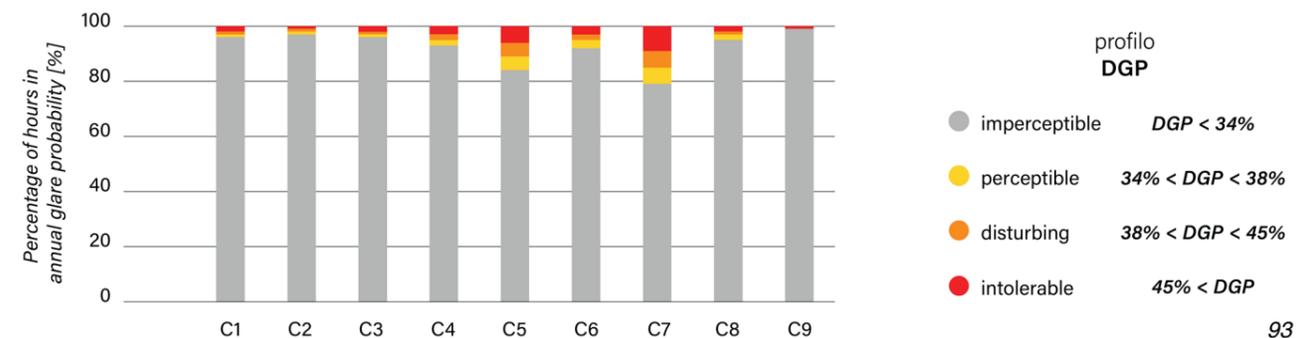
	Classroom 9	Classroom 8	Classroom 7	Classroom 6	Classroom 5	Classroom 4	Classroom 3	Classroom 2	Classroom 1
sDG	0.00%	sDG 17.00%	sDG 29.00%	sDG 7.00%	sDG 38.00%	sDG 10.00%	sDG 6.00%	sDG 1.50%	sDG 5.00%



Sistema di schermatura / assente



	Classroom 9	Classroom 8	Classroom 7	Classroom 6	Classroom 5	Classroom 4	Classroom 3	Classroom 2	Classroom 1
sDG	1.00%	sDG 28.00%	sDG 81.00%	sDG 36.00%	sDG 76.00%	sDG 46.00%	sDG 26.00%	sDG 12.00%	sDG 23.00%

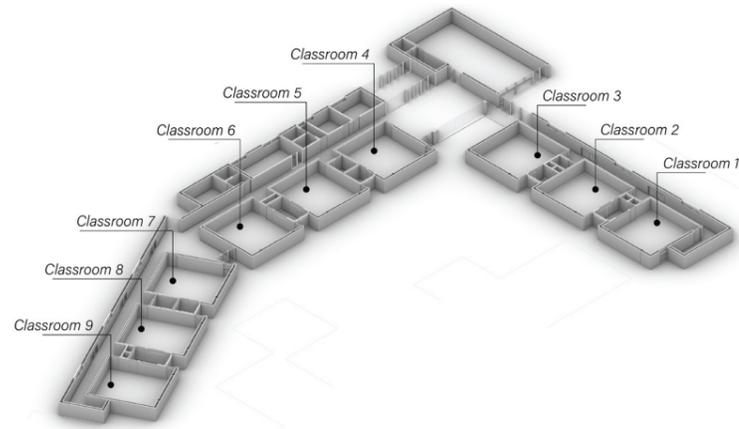


## SCENARIO 2

sistema di illuminazione / solo zenitale

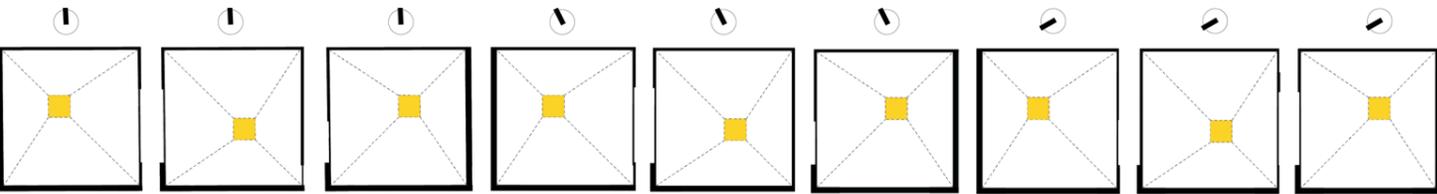
### Prestazioni del sistema di illuminazione - tutte le aule

	con schermatura	schermatura assente
DF <sub>m</sub>	0.70%	DF <sub>m</sub> 1.10%
UDI <sub>a</sub>	14%	UDI <sub>a</sub> 28%
sDA	0%	sDA 8%
ASE	0.00%	ASE 0.00%



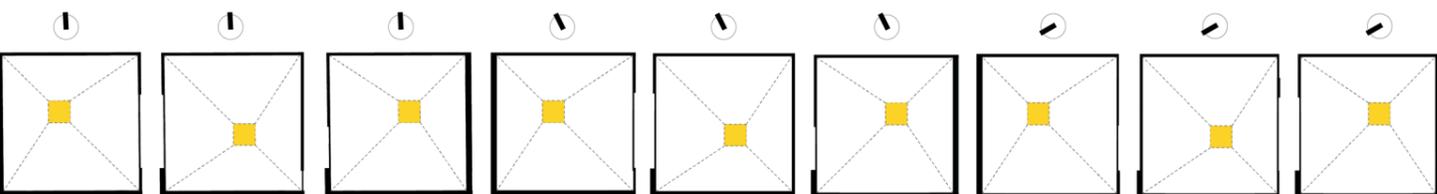
### Prestazioni del sistema di illuminazione - singole aule

Sistema di schermatura / lamelle aperte a 90°



	Classroom 9	Classroom 8	Classroom 7	Classroom 6	Classroom 5	Classroom 4	Classroom 3	Classroom 2	Classroom 1
DF	0.70%	DF 0.74%	DF 0.65%	DF 0.69%	DF 0.70%	DF 0.65%	DF 0.68%	DF 0.61%	DF 0.72%
UDI <sub>a</sub>	14%	UDI <sub>a</sub> 14%	UDI <sub>a</sub> 13%	UDI <sub>a</sub> 14%	UDI <sub>a</sub> 15%	UDI <sub>a</sub> 12%	UDI <sub>a</sub> 14%	UDI <sub>a</sub> 12%	UDI <sub>a</sub> 14%
sDA	0%	sDA 0%	sDA 0%	sDA 0%	sDA 0%	sDA 0%	sDA 0%	sDA 0%	sDA 0%
ASE	0.00%	ASE 0.00%	ASE 0.00%	ASE 0.00%	ASE 0.00%	ASE 0.00%	ASE 0.00%	ASE 0.00%	ASE 0.00%

Sistema di schermatura / assente



	Classroom 9	Classroom 8	Classroom 7	Classroom 6	Classroom 5	Classroom 4	Classroom 3	Classroom 2	Classroom 1
DF	1.18%	DF 1.16%	DF 1.02%	DF 1.14%	DF 1.12%	DF 1.05%	DF 1.13%	DF 1.03%	DF 1.12%
UDI <sub>a</sub>	28%	UDI <sub>a</sub> 30%	UDI <sub>a</sub> 24%	UDI <sub>a</sub> 29%	UDI <sub>a</sub> 29%	UDI <sub>a</sub> 25%	UDI <sub>a</sub> 29%	UDI <sub>a</sub> 24%	UDI <sub>a</sub> 29%
sDA	11%	sDA 7%	sDA 7%	sDA 11%	sDA 7%	sDA 6%	sDA 8%	sDA 6%	sDA 6%
ASE	0.00%	ASE 0.00%	ASE 0.00%	ASE 0.00%	ASE 0.00%	ASE 0.00%	ASE 0.00%	ASE 0.00%	ASE 0.00%

## SCENARIO 2

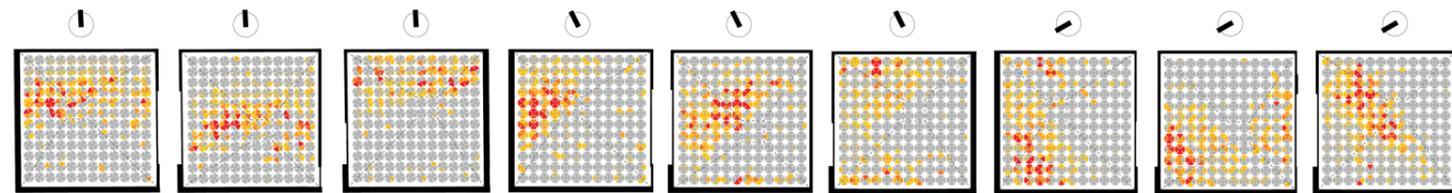
sistema di illuminazione / solo zenitale

### Daylight Glare Probability - tutte le aule

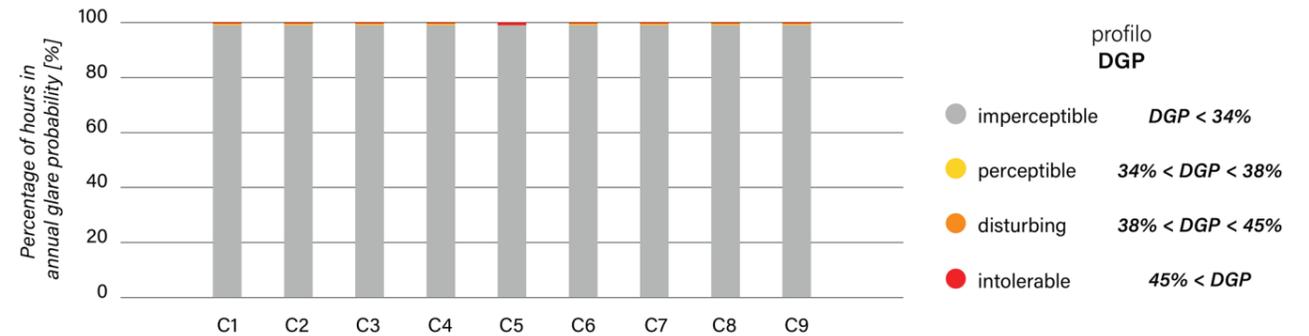
	con schermatura	schermatura assente
sDG	1.8%	sDG 5.6%

### Daylight Glare Probability - singole aule

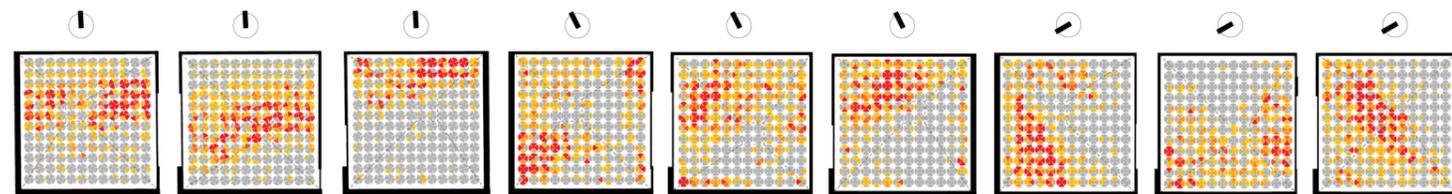
Sistema di schermatura / lamelle aperte a 90°



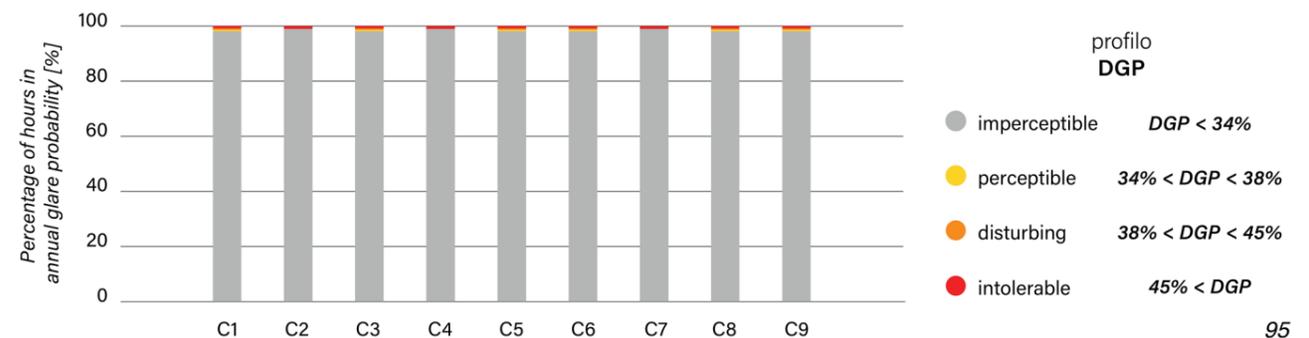
	Classroom 9	Classroom 8	Classroom 7	Classroom 6	Classroom 5	Classroom 4	Classroom 3	Classroom 2	Classroom 1
sDG	2.00%	sDG 2.00%	sDG 1.00%	sDG 2.00%	sDG 2.00%	sDG 1.00%	sDG 2.00%	sDG 1.00%	sDG 2.00%



Sistema di schermatura / assente



	Classroom 9	Classroom 8	Classroom 7	Classroom 6	Classroom 5	Classroom 4	Classroom 3	Classroom 2	Classroom 1
sDG	7.00%	sDG 6.00%	sDG 5.00%	sDG 6.00%	sDG 5.00%	sDG 5.00%	sDG 7.00%	sDG 4.00%	sDG 6.00%



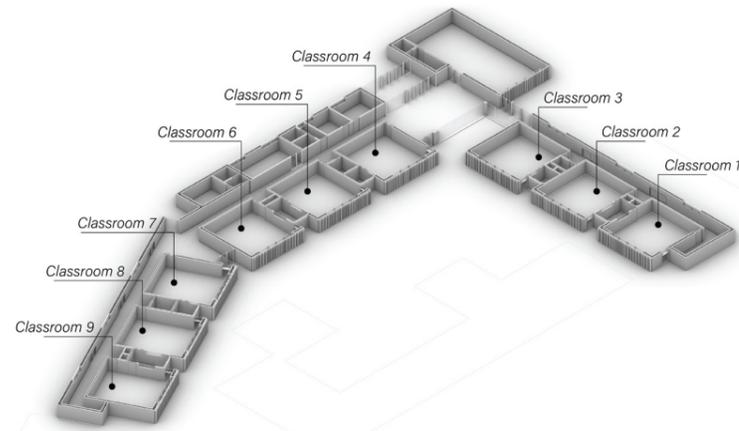
## SCENARIO 3

sistema di illuminazione / solo verticale

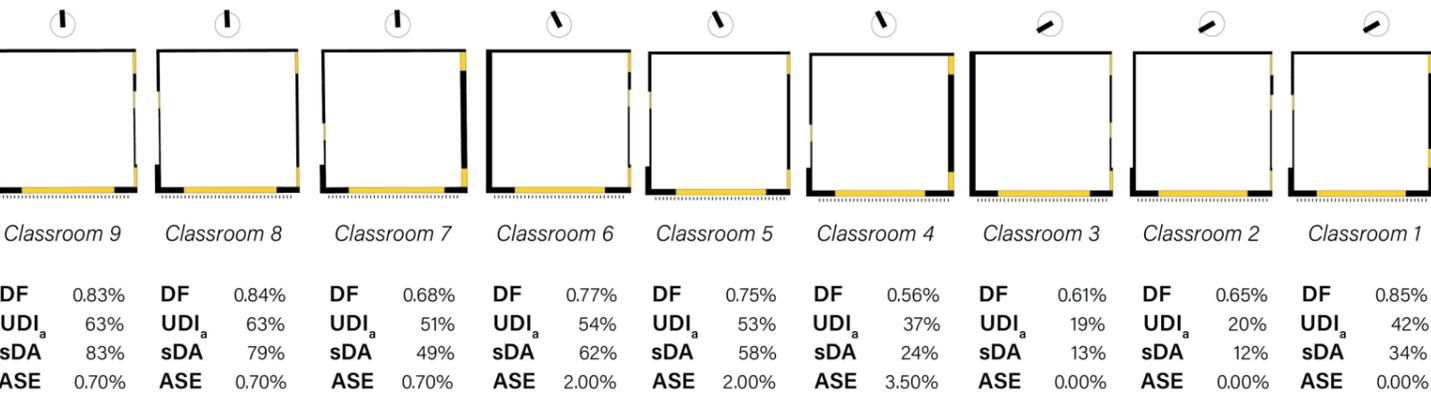
### Prestazioni del sistema di illuminazione - tutte le aule

	con schermatura	schermatura assente
$DF_m$	0.70%	1.20%
$UDI_a$	45%	64%
sDA	46%	78%
ASE	1.00%	4.00%

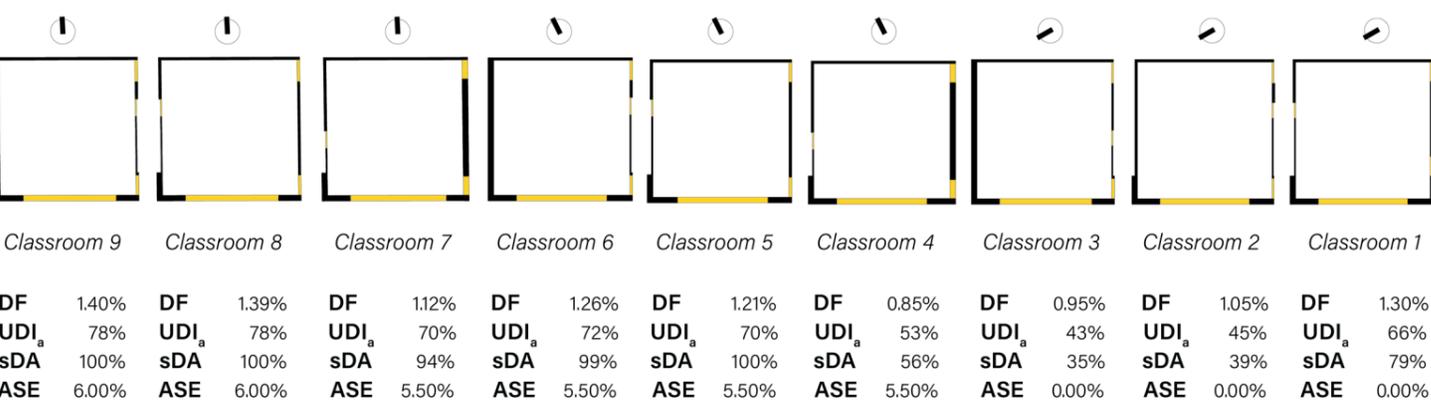
### Prestazioni del sistema di illuminazione - singole aule



### Sistema di schermatura / lamelle aperte a 90°



### Sistema di schermatura / assente



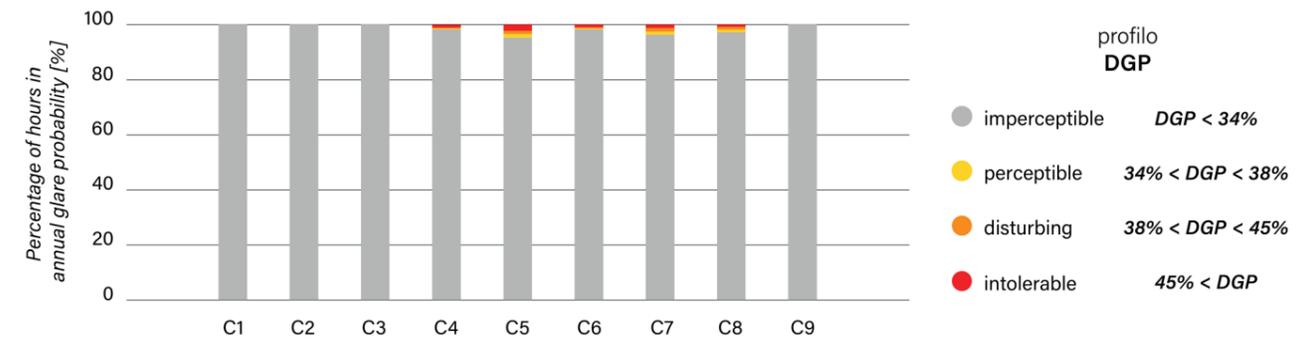
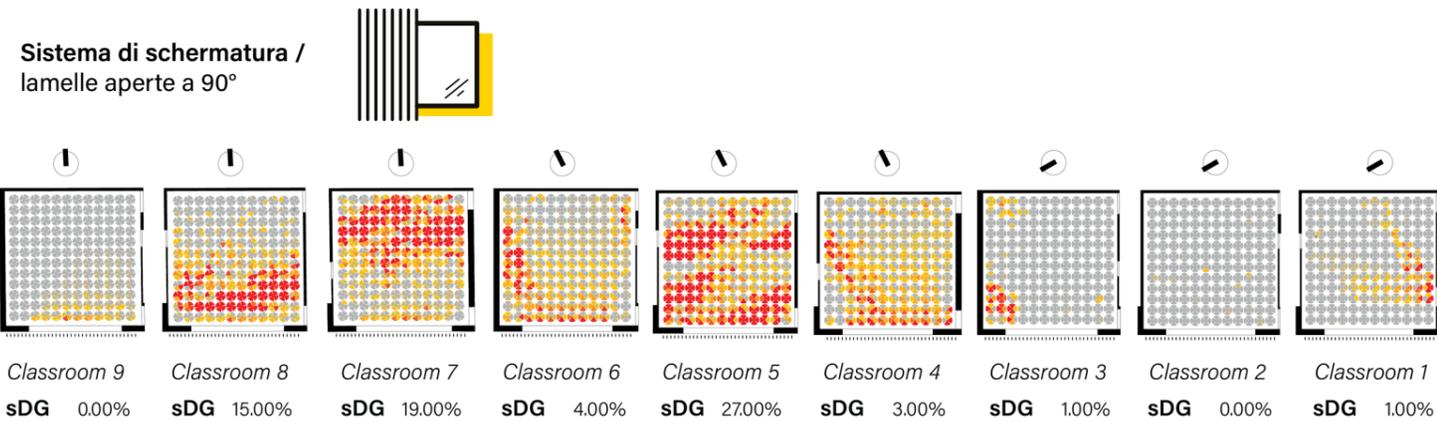
## SCENARIO 3

sistema di illuminazione / solo verticale

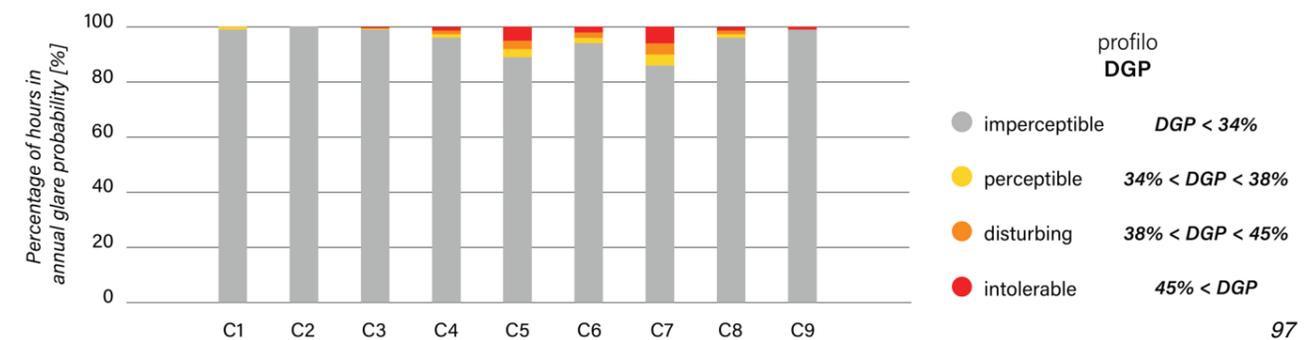
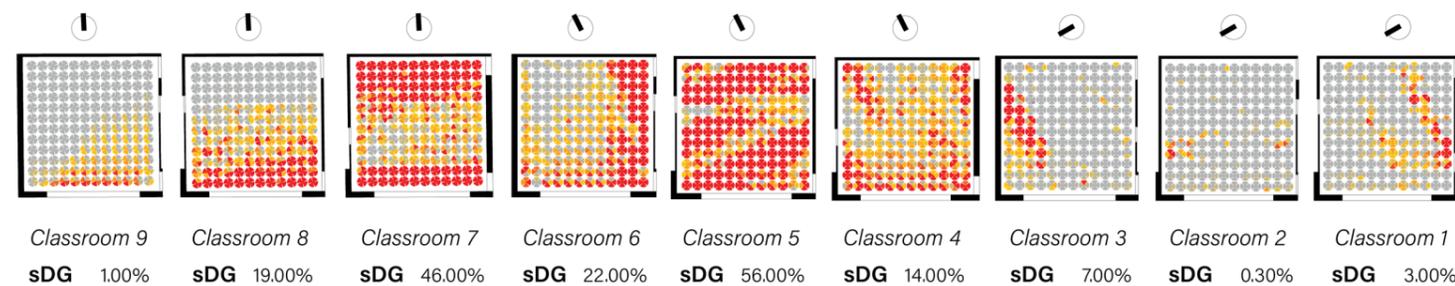
### Daylight Glare Probability - tutte le aule

	con schermatura	schermatura assente
sDG	7.8%	18.6%

### Daylight Glare Probability - singole aule



### Sistema di schermatura / assente



Prime conclusioni/

Inanzitutto ricordiamo gli obiettivi di questa analisi della luce naturale nelle nove aule, facendo riferimento al quadro normativo approfondito nel capitolo 4, per poter valutare il contributo dei sistemi di illuminazione zenitale e verticale secondo i tre scenari ipotizzati.

La prima metrica presa in considerazione per questa verifica è il **Fattore medio di luce diurna (DFm)**, che secondo i requisiti dei Decreti Ministeriali Italiani è richiesto un minimo di **DFm > 2%** per un edificio scolastico, più particolarmente nel caso di un asilo nido. Secondo i tre grafici che riportano il profilo del Fattore medio di luce diurna, si può dire che il risultati dello scenario 1, quindi dell'edificio complessivo che tiene conto della doppia esposizione zenitale e verticale, raggiunge il requisito del 2% in praticamente tutte le aule in assenza del sistema di schermatura, indipendentemente dell'orientamento, nel caso invece di utilizzo di schermatura il Fattore di luce diurna medio delle aule rimane sulla media del 1%. Per gli scenari 2 e 3, i grafici dimostrano che il contributo del sistema zenitale e quello verticale sulla disponibilità di luce diurna all'interno delle aule è ugualmente pari rispetto al contributo complessivo dell'edificio, sia in assenza che in presenza del sistema di schermatura.

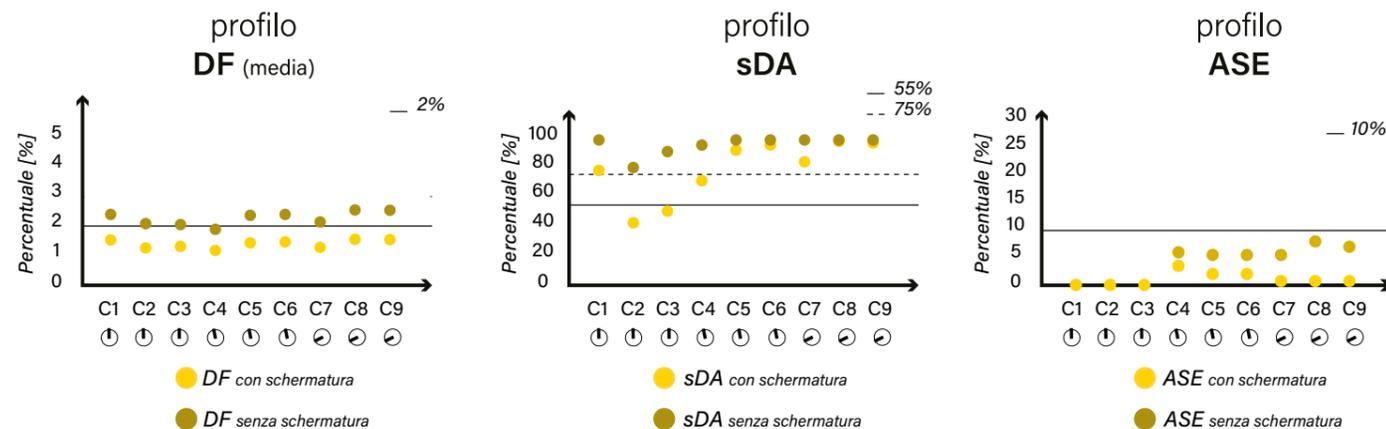
La seconda metrica presa in considerazione è il **Spatial Daylight Autonomy (sDA)** che si basa su simulazioni annuali basate sul clima del sito in diverse condizioni del cielo durante tutto l'anno. Secondo il protocollo LEED v4.1 risulta accettabile se **sDA<sub>300,50%</sub> > 55%** che si verifica soprattutto nello scenario 1, con il contributo complessivo dei sistemi di illuminazione, nelle aule C1, C4, C5, C6, C7, C8 e C9 (sia in presenza che in assenza del sistema di schermatura) tranne per le due aule C2 e C3 entrambe con un orientamento Nord-Ovest in presenza del sistema di schermatura. E in parte si verifica con il solo contributo del sistema verticale, nelle aule C1, C2, C3, C5, C6, C8 e C9, in assenza del siste-

ma di schermatura. Secondo i due altri scenari, il contributo complessivo a quel requisito è fornito in gran parte dal contributo verticale rispetto al contributo zenitale in cui l'**sDA<sub>300,50%</sub>** rimane sotto la soglia dell'11%, indipendentemente dell'orientamento delle aule o dell'utilizzo di un sistema di schermatura. Questo si spiega dal fatto che il sistema verticale fa entrare maggiore radiazione solare diretta nelle aule a differenza del sistema zenitale.

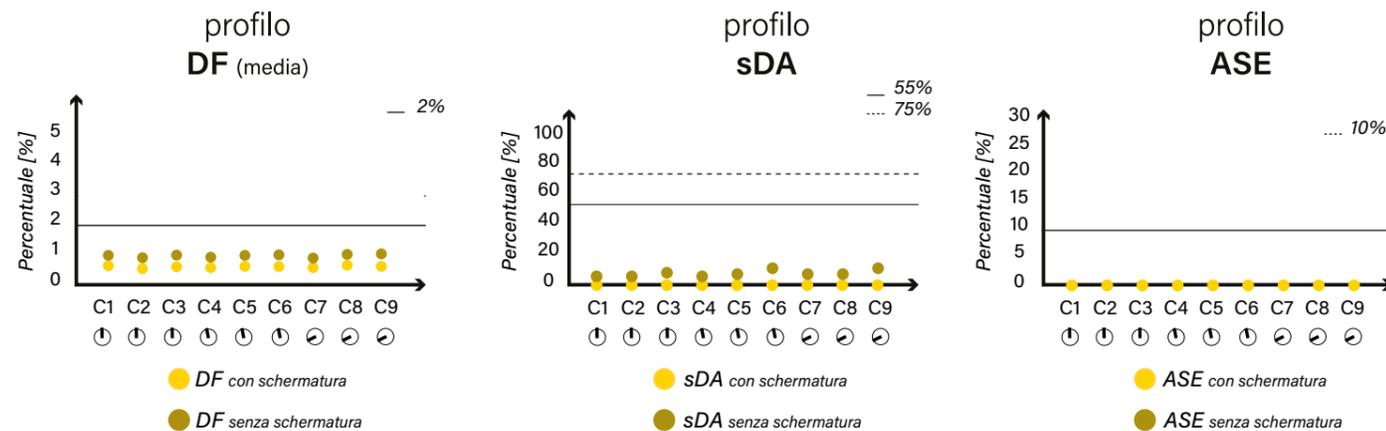
L'ultima metrica considerata è l'**Annual Sunlight Exposure (ASE)** che considera con un limite di 10% un livello accettabile in cui la superficie regolarmente occupata non è "sovrailuminata", riducendo così i rischi di abbagliamento. Lo scenario 1 mostra che l'insieme delle aule non superano questa soglia, sia in presenza che in assenza dei dispositivi di schermatura, ma presentano valori di ASE compresi tra il 0.70% e l'8% fornito dal sistema verticale, come si può vedere nello scenario 3, principalmente nelle aule con orientamento Sud-Ovest e Sud. Il contributo zenitale invece presenta una percentuale ASE pari allo 0% in tutte le aule.

Questi risultati dimostrano che il lucernario contribuisce a metà della disponibilità della luce diurna all'interno delle aule rispetto al contributo complessivo dell'edificio, indipendentemente dell'orientamento dell'aula o della posizione del sistema zenitale sulla copertura, risultando però al di sotto dei 300 lux richiesti. La superficie in cui si verifica 300 lux per almeno 50% del tempo di occupazione nella aule fornito dal sistema zenitale è insufficiente. Questa riflessione può essere giustificata dal rapporto basso tra la superficie trasparente del lucernario e la superficie utile di ogni aula che impedisce la luce solare diretta di entrare nelle aule con maggiore intensità.

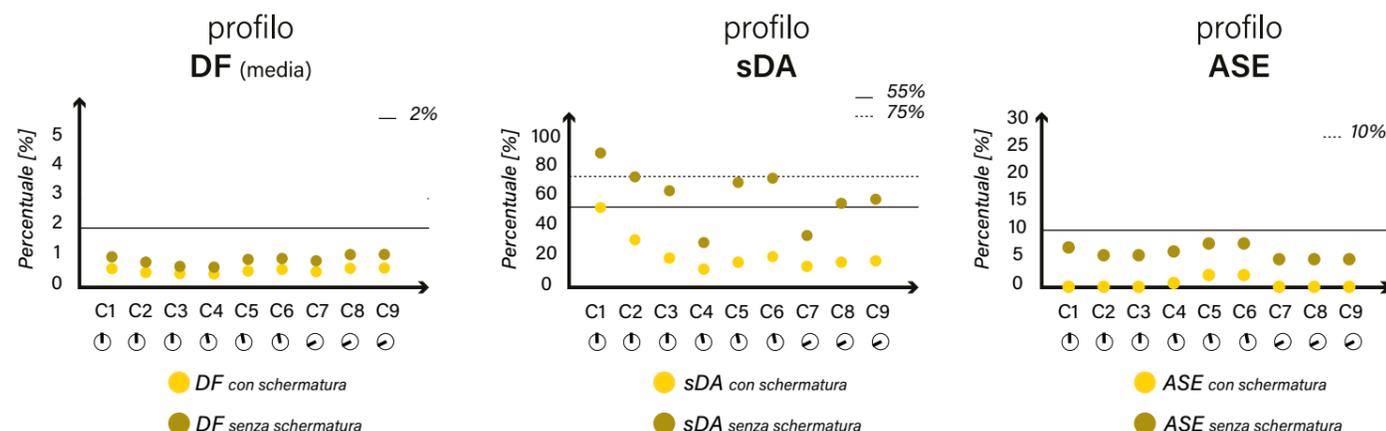
SCENARIO 1 / contributo del sistema verticale e zenitale combinati



SCENARIO 2 / contributo del sistema zenitale

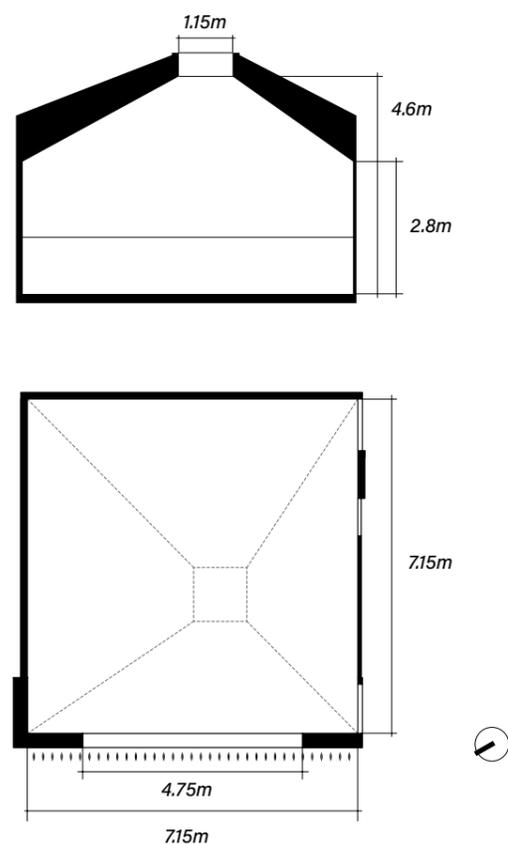
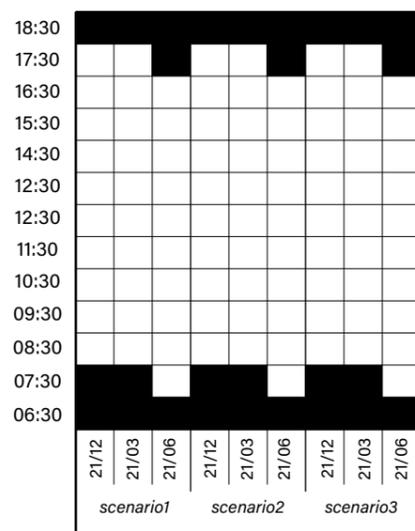


SCENARIO 3 / contributo del sistema verticale

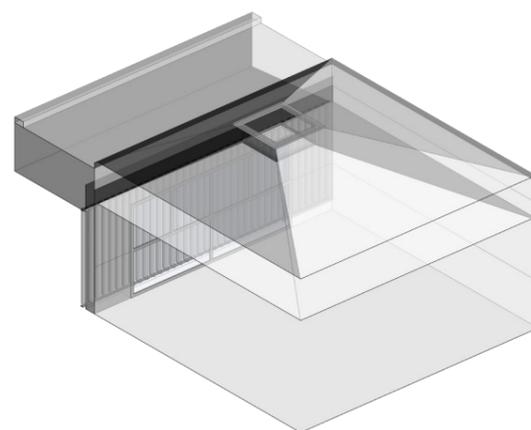


## Prime considerazioni /

Questa sezione si concentra sui risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate su ALFA nell'aula C2, per l'analisi delle condizioni di illuminazione orizzontale sul piano di lavoro e del contributo melanopico della luce secondo i tre scenari ipotizzati in condizioni di cielo sereno e coperto, e considerando il sistema di schermatura, sia per il sistema zenitale che verticale, con lamelle fisse a 90° rispetto alla componente trasparente. Le simulazioni sono state effettuate secondo lo schema sottostante, dove vengono definiti i tre giorni di riferimento, 21 dicembre - 21 marzo - 21 giugno, oltre al profilo di occupazione delle aule.



Sezione trasversale e pianta / aula C2



Vista assonometrica / aula C2

Per i livelli di soglia di riferimento, abbiamo secondo la norma UNI EN 12464-1 un requisito di illuminamento fotopico  $E_{wp} = 300 \text{ lux}$  sul piano di lavoro nel caso di un asilo nido, sia in condizione di cielo sereno che coperto. E secondo il protocollo WELLv2, Q1-Q2 2024 vengono definiti dei livelli di luce che vengono raggiunti sul piano verticale all'altezza degli occhi per simulare la luce che entra nell'occhio dell'occupante, con una soglia minima di  $mel-EDI \geq 109$  o  $163 \text{ lux}$  melanopico o con una soglia minima di  $mel-EDI \geq 136$  o  $250 \text{ lux}$  per almeno 4 ore al giorno, a seconda se la media  $sDA_{300,50\%}$  viene raggiunta per  $\geq 75\%$  della superficie occupata nell'aula esaminata.

Grafico: confronto dell'illuminamento orizzontale  $E_{wp,medio}$  per i tre scenari di illuminazione nell'aula C2, in condizione di cielo sereno e cielo coperto

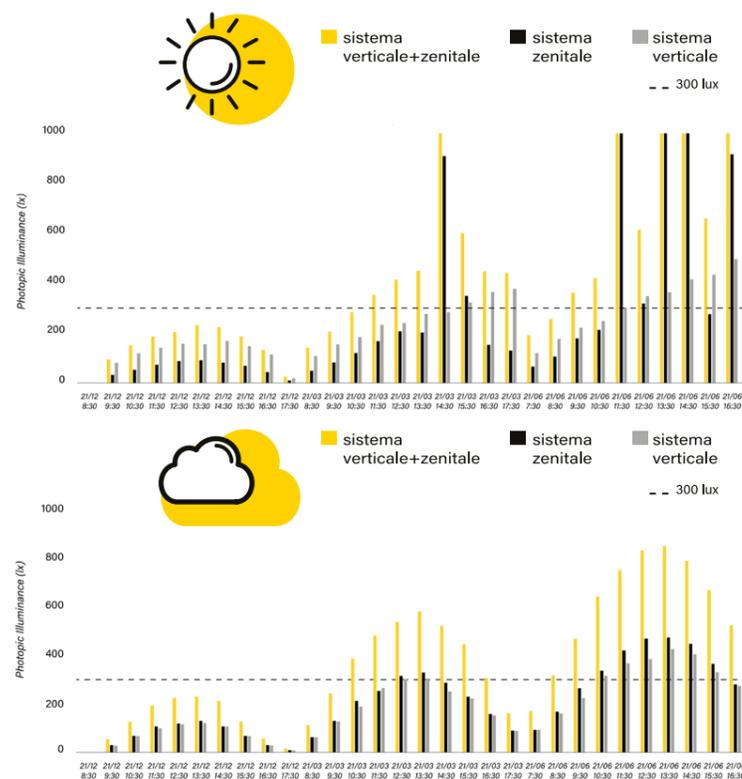
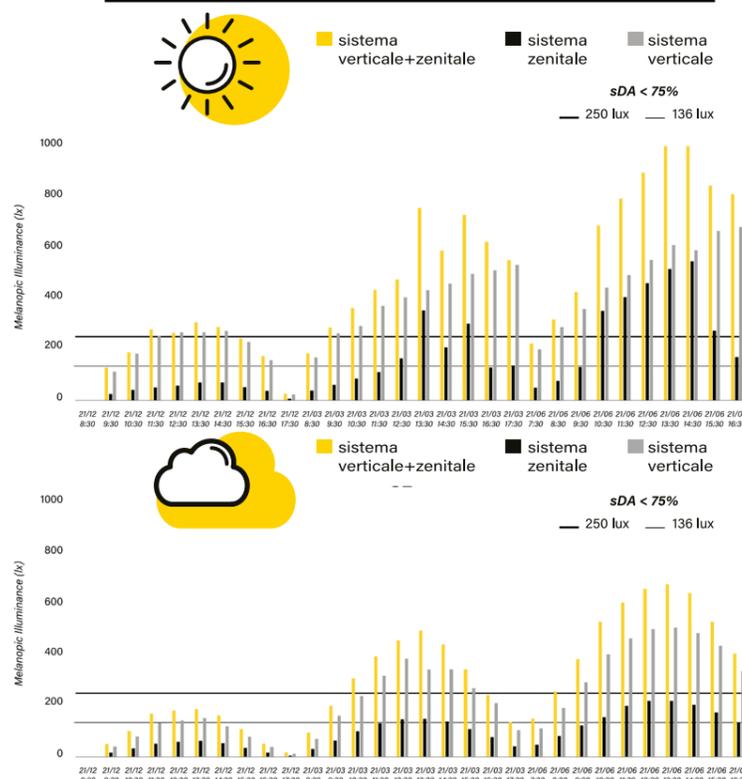


Grafico: confronto del valore  $mel-EDI_{medio}$  per i tre scenari di illuminazione nell'aula C2, in condizione di cielo sereno e cielo coperto



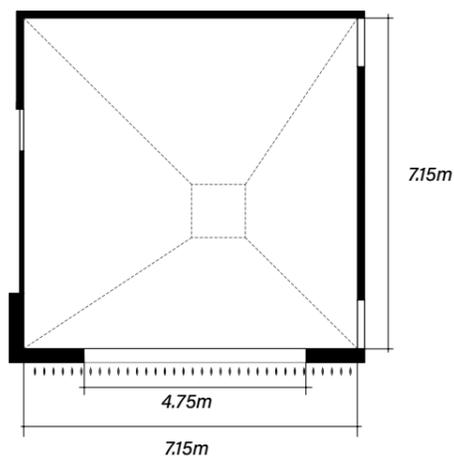
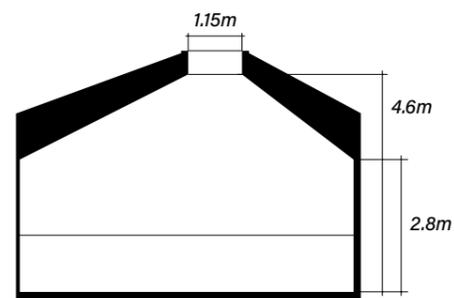
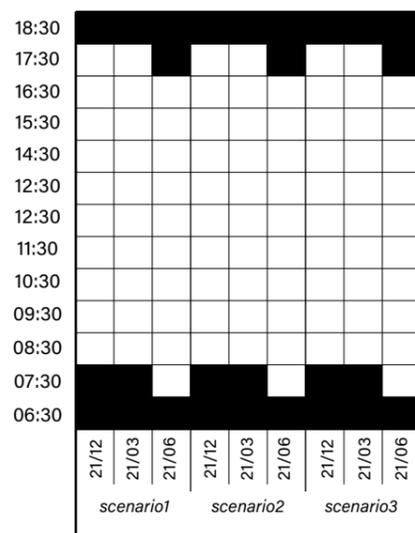
## Aula C2 / orientamento Nord-Ovest

I primi due grafici riportano i risultati ottenuti dalle simulazioni su ALFA dell'illuminamento medio  $E_{wp}$  sul piano di lavoro, sia in condizione di cielo sereno che cielo coperto per i tre scenari ipotizzati. La prima considerazione che si può fare è che in caso di cielo sereno, il contributo verticale è superiore al contributo zenitale, ad eccezione del 21 giugno in cui il contributo zenitale aumenta, ma aumenta anche il contributo in termini di glare. Nel caso di cielo coperto per qualunque giorno esaminato, il lucernario contribuisce a un po' più del 50% sull'illuminamento sul piano di lavoro rispetto al sistema verticale sul contributo complessivo dell'aula. Un'ultima considerazione che si può fare è che il contributo complessivo dell'aula, che tiene conto sia del sistema zenitale che verticale, non è sufficiente al raggiungimento del requisito di 300 lux durante il solstizio invernale, in entrambe le condizioni di cielo sereno e cielo coperto.

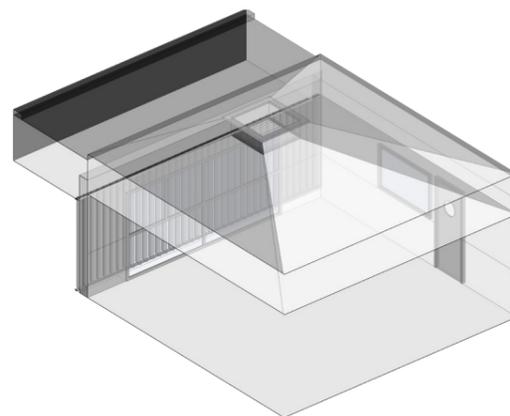
Sulla base dei risultati ottenuti dalle simulazioni su ClimateStudio riguardo le condizioni di illuminazione naturale del contributo complessivo nell'aula C2 (scenario 1), si può registrare un valore medio di  $sDA_{300,50\%}$  pari al 43%, quindi inferiore alla soglia minima di 75% della superficie occupata, verrà quindi considerato secondo il protocollo WELL il requisito medio  $mel-EDI \geq 136 - 250 \text{ lux}$  per almeno 4 ore nel giorno. Nel caso del contributo complessivo dell'aula che tiene conto sia del sistema zenitale che verticale, si può notare che il valore medio  $mel-EDI$  verifica il requisito per i tre giorni presi in considerazione sia in condizione di cielo sereno che coperto. Il contributo maggiore a quel requisito sul contributo complessivo è fornito dal sistema verticale che supera in ogni condizione la soglia minima  $mel-EDI$  rispetto al sistema zenitale, che presenta valori elevati solo durante il solstizio estivo in condizione di cielo sereno.

### Aula C5 / orientamento Sud-Ovest

Questa sezione si concentra sui risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate su ALFA nell'aula C5, per l'analisi delle condizioni di illuminazione orizzontale sul piano di lavoro e del contributo melanopico della luce secondo i tre scenari ipotizzati in condizioni di cielo sereno e coperto, e considerando il sistema di schermatura, sia per il sistema zenitale che verticale, con lamelle fisse a 90° rispetto alla componente trasparente. Le simulazioni sono state effettuate secondo lo schema sottostante, dove vengono definiti i tre giorni di riferimento, 21 dicembre - 21 marzo - 21 giugno, oltre al profilo di occupazione delle aule.



Sezione trasversale e pianta / aula C5



Vista assonometrica / aula C5

Per i livelli di soglia di riferimento, abbiamo secondo la norma UNI EN 12464-1 un requisito di illuminamento fotopico  $E_{wp} = 300 \text{ lux}$  sul piano di lavoro nel caso di un asilo nido, sia in condizione di cielo sereno che coperto. E secondo il protocollo WELLv2, Q1-Q2 2024 vengono definiti dei livelli di luce che vengono raggiunti sul piano verticale all'altezza degli occhi per simulare la luce che entra nell'occhio dell'occupante, con una soglia minima di  $\text{mel-EDI} \geq 109$  o  $163 \text{ lux}$  melanopico o con una soglia minima di  $\text{mel-EDI} \geq 136$  o  $250 \text{ lux}$  per almeno 4 ore al giorno, a seconda se la media  $sDA_{300,50\%}$  viene raggiunta per  $\geq 75\%$  della superficie occupata nell'aula esaminata.

Grafico: confronto dell'illuminamento orizzontale  $E_{wp,medio}$  per i tre scenari di illuminazione nell'aula C5, in condizione di cielo sereno e cielo coperto

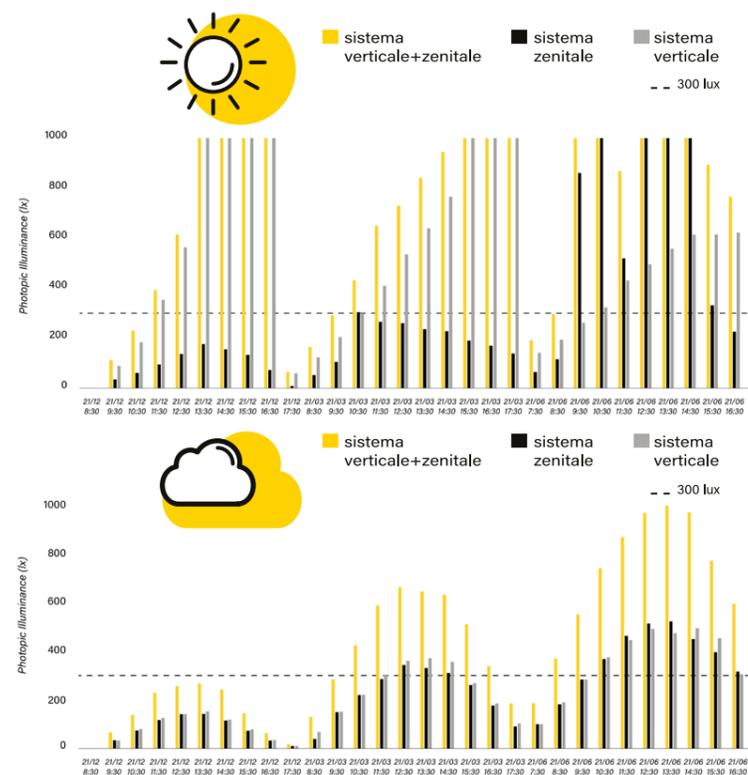
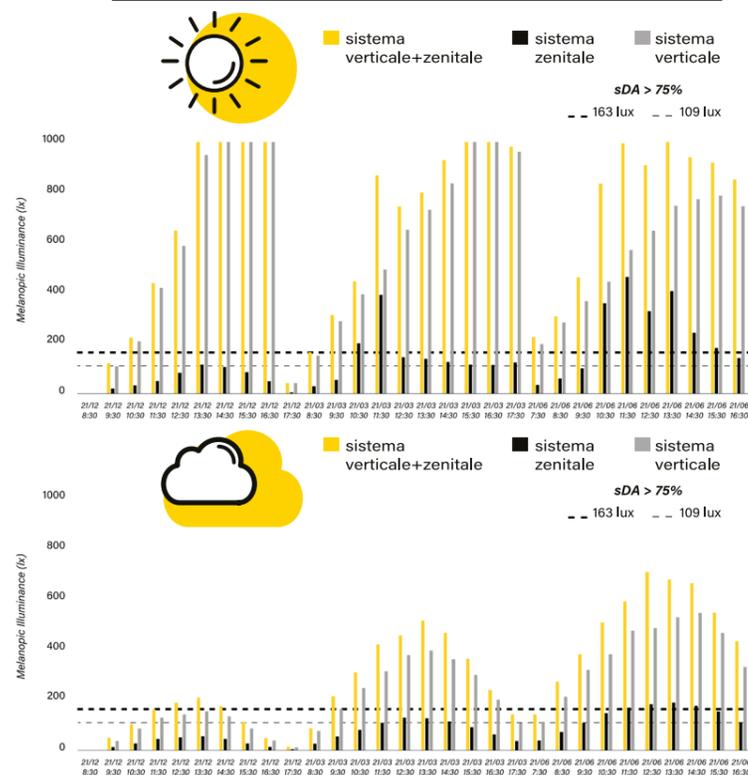


Grafico: confronto del valore  $\text{mel-EDI}_{medio}$  per i tre scenari di illuminazione nell'aula C5, in condizione di cielo sereno e cielo coperto



I primi due grafici riportano i risultati ottenuti dalle simulazioni su ALFA dell'illuminamento medio  $E_{wp}$  sul piano di lavoro, sia in condizione di cielo sereno che cielo coperto per i tre scenari ipotizzati. Per prima cosa si può osservare un maggiore contributo del sistema verticale sul contributo complessivo dell'aula rispetto al lucernaio, con dei picchi di illuminamento sul piano di lavoro tra le 12:30 e le 14:30 nei tre giorni in condizione di cielo sereno; mentre il contributo del sistema zenitale soddisfa il requisito di  $E_{wp}$  di 300 lux solamente nel periodo di giugno. Nel caso di cielo coperto per qualunque giorno esaminato, il lucernario contribuisce al 50% dell'illuminamento sul piano di lavoro rispetto al sistema di illuminazione complessivo dell'aula. Il giorno del solstizio estivo è principalmente l'unico caso in cui si verifica un maggiore illuminamento sul piano di lavoro da parte del sistema zenitale rispetto a quello verticale.

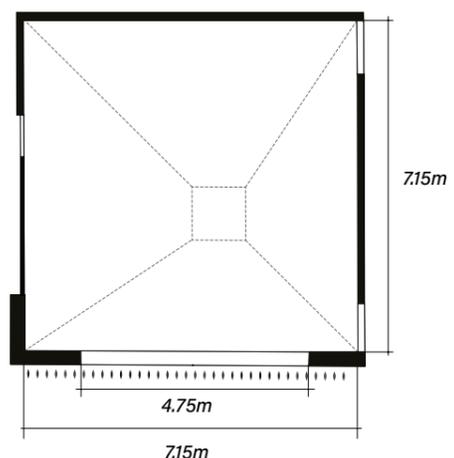
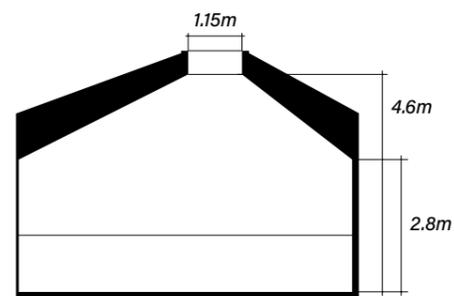
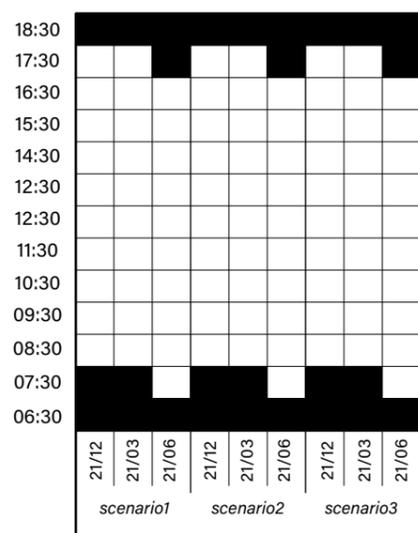
Sulla base dei risultati ottenuti dalle simulazioni su ClimateStudio riguardo le condizioni di illuminazione naturale del contributo complessivo nell'aula C5 (scenario 1), si può registrare un valore medio di  $sDA_{300,50\%}$  pari al 93%, quindi superiore alla soglia minima di 75% della superficie occupata, verrà quindi considerato secondo il protocollo WELL il requisito medio  $\text{mel-EDI} \geq 109 - 163 \text{ lux}$  per almeno 4 ore nel giorno.

Il sistema complessivo dell'aula che tiene conto sia del sistema zenitale che verticale, verifica il requisito minimo di  $\text{mel-EDI}$  per i tre giorni presi in considerazione per le due condizioni di cielo, con valori bassi per il periodo di dicembre in cielo coperto.

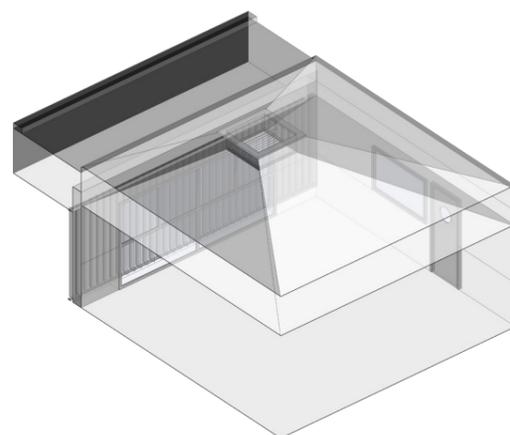
Si può notare dai grafici che il contributo maggiore, sia in condizione di cielo sereno che coperto, è dato dal sistema verticale che soddisfa il requisito minimo WELL per i tre giorni rispetto al contributo del lucernario che soddisfa il requisito minimo di  $\text{mel-EDI}$  principalmente durante il solstizio estivo. Questo contributo verticale superiore rispetto ai risultati ottenuti nell'aula C2, si può dimostrare dal cambio di orientamento dell'aula da Nord-Ovest a Sud-Ovest, e quindi ad una maggiore esposizione alla radiazione solare diretta.

### Aula C8 / orientamento Sud

Questa sezione si concentra sui risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate su ALFA nell'aula C8, per l'analisi delle condizioni di illuminazione orizzontale sul piano di lavoro e del contributo melanopico della luce secondo i tre scenari ipotizzati in condizioni di cielo sereno e coperto, e considerando il sistema di schermatura, sia per il sistema zenitale che verticale, con lamelle fisse a 90° rispetto alla componente trasparente. Le simulazioni sono state effettuate secondo lo schema sottostante, dove vengono definiti i tre giorni di riferimento, 21 dicembre - 21 marzo - 21 giugno, oltre al profilo di occupazione delle aule.



Sezione trasversale e pianta / aula C8



Vista assonometrica / aula C8

Per i livelli di soglia di riferimento, abbiamo secondo la norma UNI EN 12464-1 un requisito di illuminamento fotopico  $E_{wp} = 300 \text{ lux}$  sul piano di lavoro nel caso di un asilo nido, sia in condizione di cielo sereno che coperto. E secondo il protocollo WELLv2, Q1-Q2 2024 vengono definiti dei livelli di luce che vengono raggiunti sul piano verticale all'altezza degli occhi per simulare la luce che entra nell'occhio dell'occupante, con una soglia minima di **mel-EDI  $\geq 109$  o 163 lux** melanopico o con una soglia minima di **mel-EDI  $\geq 136$  o 250 lux** per almeno 4 ore al giorno, a seconda se la media  $sDA_{300,50\%}$  viene raggiunta per  $\geq 75\%$  della superficie occupata nell'aula esaminata.

Grafico: confronto dell'illuminamento orizzontale  $E_{wp,medio}$  per i tre scenari di illuminazione nell'aula C8, in condizione di cielo sereno e cielo coperto

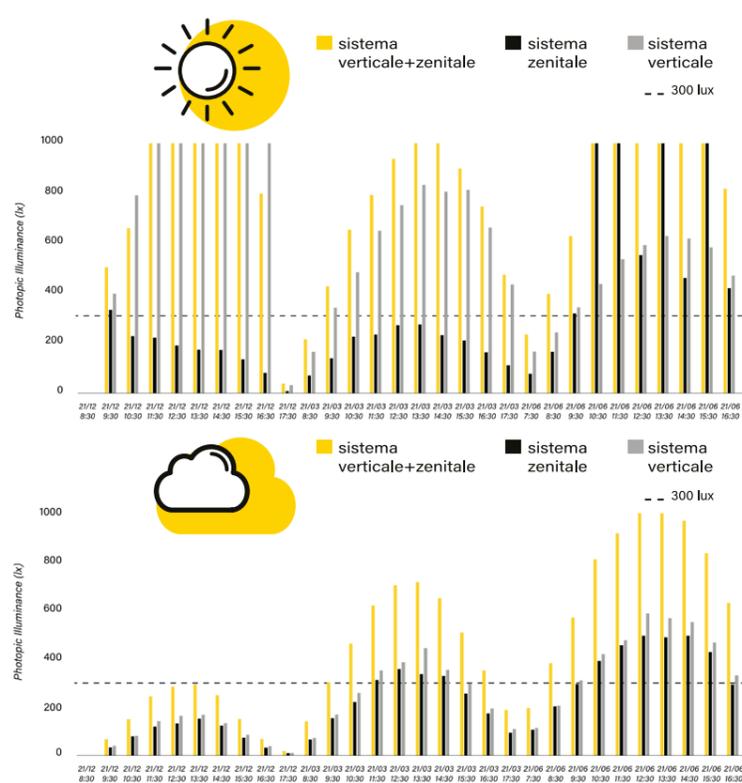
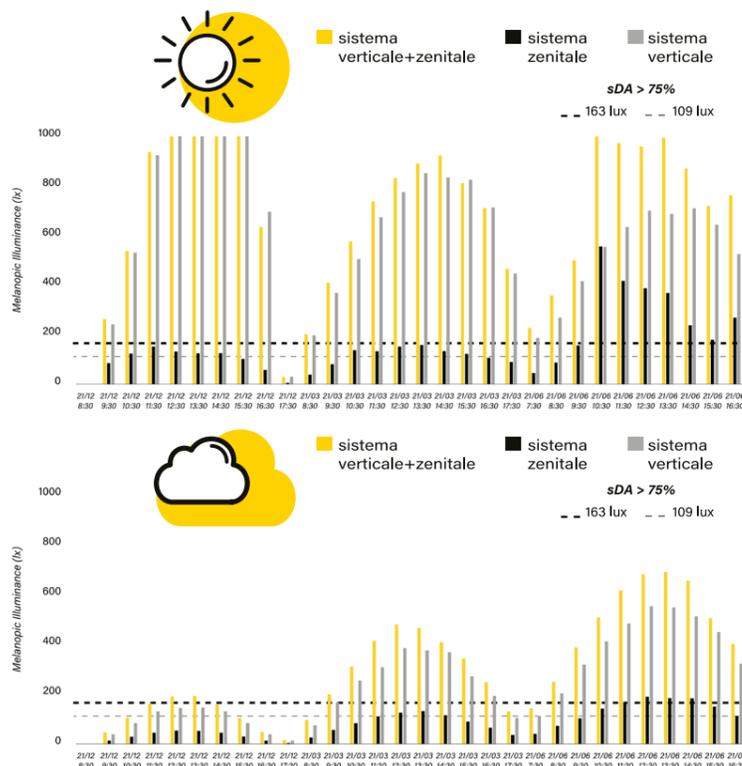


Grafico: confronto del valore  $mel-EDI_{medio}$  per i tre scenari di illuminazione nell'aula C8, in condizione di cielo sereno e cielo coperto



I primi due grafici riportano i risultati ottenuti dalle simulazioni su ALFA dell'illuminamento medio  $E_{wp}$  sul piano di lavoro, sia in condizione di cielo sereno che cielo coperto per i tre scenari ipotizzati. Per prima cosa si può osservare un maggiore contributo da parte del lucernario in condizione di cielo sereno, rispetto all'aula C5, anche se soddisfa il requisito di  $E_{wp}$  di 300 lux solamente nel 21 giugno, a differenza degli altri due scenari che soddisfano il requisito per i tre giorni considerati.

Nel caso di cielo coperto per qualunque giorno esaminato, il lucernario contribuisce a un po meno del 50% dell'illuminamento sul piano di lavoro rispetto al sistema di illuminazione complessivo dell'aula. Anche qua come nel caso dell'aula C5, il giorno del solstizio estivo è principalmente l'unica situazione in cui si verifica un maggiore illuminamento sul piano di lavoro da parte del sistema zenitale rispetto a quello verticale.

Sulla base dei risultati ottenuti dalle simulazioni su ClimateStudio riguardo le condizioni di illuminazione naturale del contributo complessivo nell'aula C8 (scenario 1), si può registrare un valore medio di  $sDA_{300,50\%}$  pari al 99%, quindi superiore alla soglia minima di 75% della superficie occupata, verrà quindi considerato secondo il protocollo WELL il requisito medio **mel-EDI  $\geq 109 - 163 \text{ lux}$**  per almeno 4 ore nel giorno.

Il sistema complessivo dell'aula che tiene conto sia del sistema zenitale che verticale, verifica il requisito minimo di mel-EDI per i tre giorni presi in considerazione per le due condizioni di cielo. Si può notare dai grafici che il contributo maggiore, sia in condizione di cielo sereno che coperto, è dato dal sistema verticale che soddisfa il requisito WELL per i tre giorni per almeno l'80%, rispetto al contributo del lucernario che soddisfa il requisito minimo solo durante il solstizio estivo. Questa esposizione verticale ottimale rispetto ai risultati ottenuti nelle altre due aule, si verifica con un orientamento dell'aula C8 verso Sud.

Prime conclusioni /

Dall'analisi delle tre aule C2, C5 e C8 relativi all'illuminamento melanopico al livello dell'occhio considerando il valore mel-EDI<sub>medio</sub>, in condizioni di cielo sereno e cielo coperto, viene fatta un'ulteriore verifica del contributo dei sistemi di illuminazione attraverso il sistema di punteggio in riferimento al protocollo WELL, per tutti e tre i giorni e nelle due condizioni di cielo, tenendo conto del 100% della superficie delle aule. Anche se nei requisiti del protocollo WELL questa verifica deve tener conto di tutti i giorni dell'anno, nel nostro caso vengono considerati tre giorni (il solstizio d'estate, il solstizio d'inverno e l'equinozio di primavera) che presentano condizioni di illuminamento estremamente diverse per un migliore confronto sul contributo del sistema di illuminazione zenitale rispetto a quello verticale.

Questa verifica viene riassunta in due grafici dove viene evidenziato il funzionamento del sistema di conteggio:

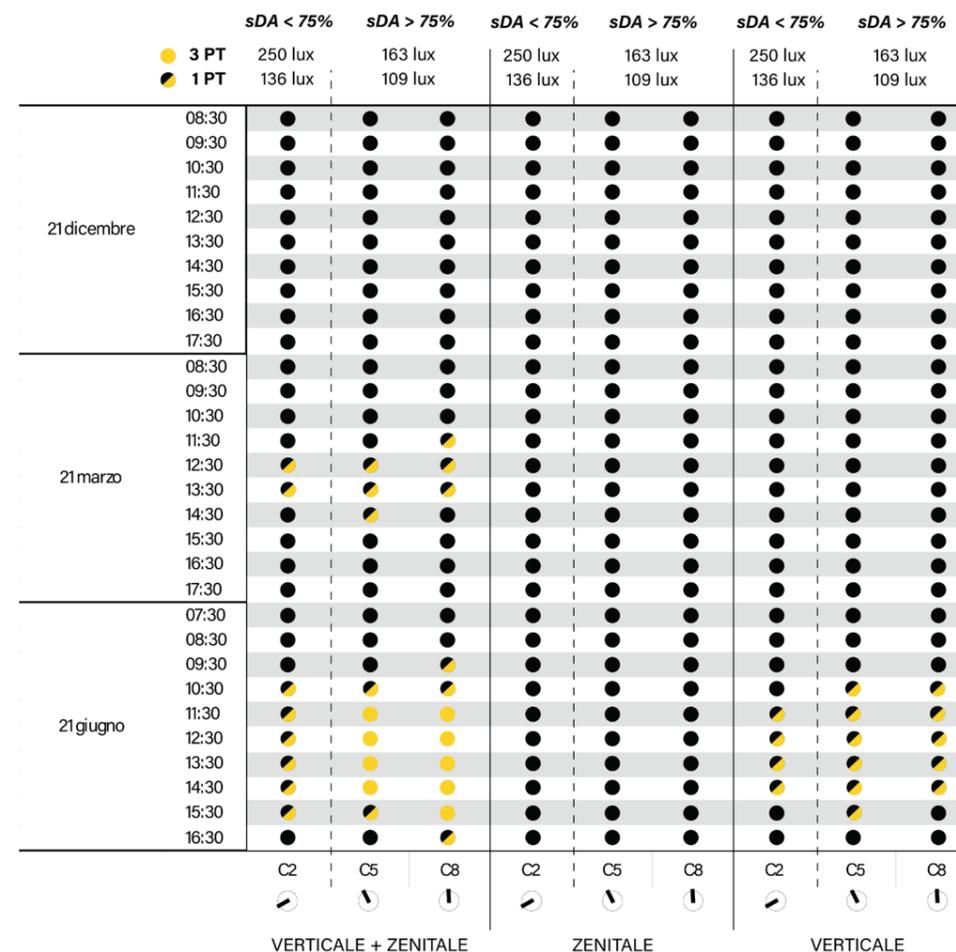
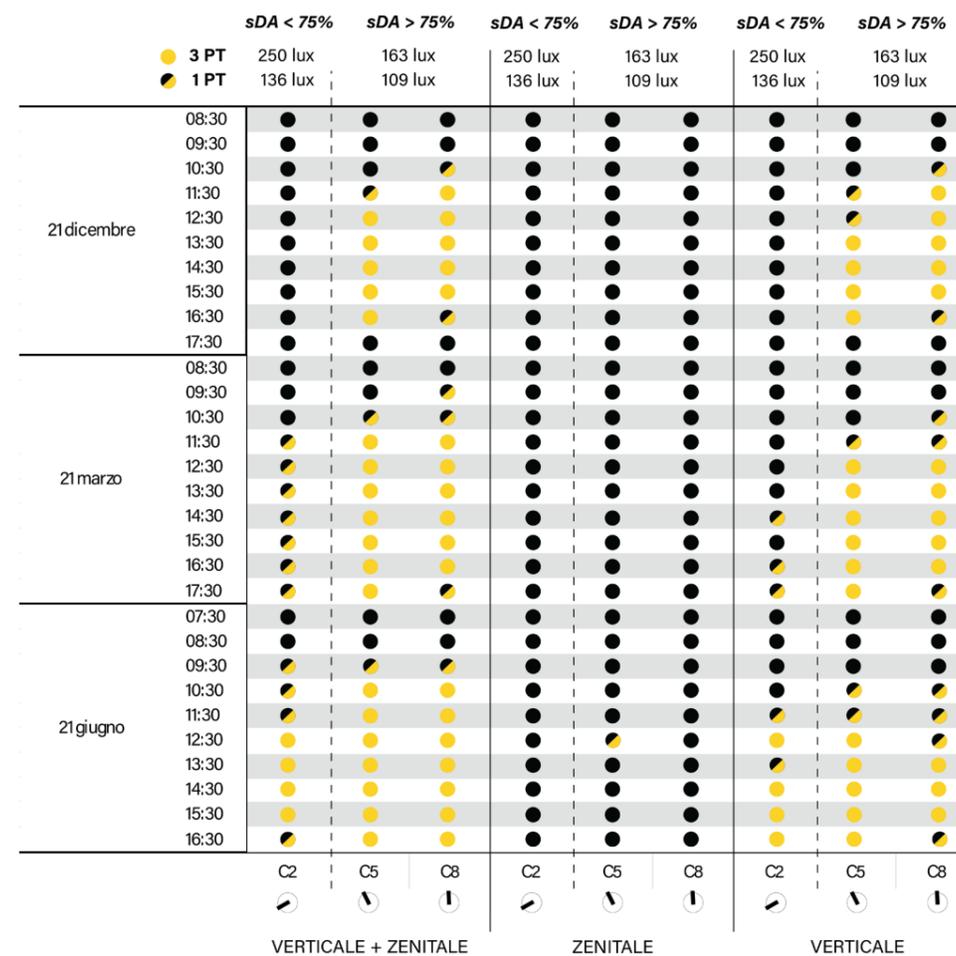
Si ottiene 1 punto se si verifica il raggiungimento di un valore minimo di 136 mel-EDI per almeno 4 ore della giornata (a partire da mezzo giorno al più tardi) in tutte le condizioni di cielo se si ha una media  $sDA_{300,50\%} < 75\%$  della superficie occupata; o un valore minimo di 109 mel-EDI se si ha una media  $sDA_{300,50\%} \geq 75\%$  della superficie occupata.

Si ottiene 3 punti se si verifica il raggiungimento di un valore minimo di 250 mel-EDI per almeno 4 ore della giornata (a partire da mezzo giorno al più tardi) in tutte le condizioni di cielo se si ha una media  $sDA_{300,50\%} < 75\%$  della superficie

occupata; o un valore minimo di 163 mel-EDI se si ha una media  $sDA_{300,50\%} \geq 75\%$  della superficie occupata.

Dal primo grafico si può notare che dal contributo complessivo dei sistemi di illuminazione naturale, in condizione di cielo sereno, le aule C5 e C8, orientate rispettivamente a Sud-Ovest e Sud, soddisfano i requisiti necessari per ottenere 3PT perché nei tre giorni considerati per almeno 4 ore si supera la soglia di 163 lux. Nel caso dell'aula 2 invece, non si ottiene nessun punto perché nel mese di dicembre non vengono soddisfatti nessuno dei requisiti, nel periodo di marzo e giugno però l'aula C2 prende almeno 1PT. Si può notare che il contributo maggiore rispetto a quello complessivo delle aule è fornito dal sistema verticale.

Dal secondo grafico emerge che, in condizione di cielo coperto, nelle aule difficilmente si riesce a soddisfare i requisiti per ottenere un punteggio WELL nei tre giorni presi in considerazione, che sia 1PT o 3PT. Per le aule C5 e C8 si ottiene 3PT solo per il periodo di giugno, mentre per il periodo di dicembre e marzo il punteggio diminuisce a zero punti. Il contributo verticale è superiore a quello zenitale solo durante il mese di giugno, che ottiene 1PT.



## 9.2 Caso industriale / sistema zenitale a shed

Prima di presentare i risultati relativi al modello industriale, verranno mostrati alcuni schemi che sintetizzano le caratteristiche principali dell'edificio di riferimento, fornendo una panoramica delle condizioni in cui sono state condotte le simulazioni nel capannone esaminato. Nella modellazione del capannone è stato considerato l'intero edificio; tuttavia, nelle simulazioni condotte con ClimateStudio e ALFA, si è deciso di focalizzarsi esclusivamente sulla sala principale di produzione, escludendo l'area degli uffici (come evidenziato nella pianta) per approfondire il contributo dei sistemi zenitali a shed in uno spazio aperto. Durante la fase di localizzazione su ClimateStudio, è sorta una complicazione legata alla selezione del sito geografico, per cui è stato utilizzato il sito più vicino a quello dell'edificio di riferimento.

Rapporto aeroilluminante (R.A.I.) dell'area esaminata

### sistema zenitale

$$S_w = 1924.3 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{floor}} = 8674 \text{ m}^2$$

$$S_w/S_{\text{floor}} = 0.22$$

### sistema verticale

$$S_w = 1229 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{floor}} = 8674 \text{ m}^2$$

$$S_w/S_{\text{floor}} = 0.14$$

Condizioni geoclimatiche

### Localizzazione

edificio esistente

Kaufbeuren, DEU  
47.88° N, 10.64° E

### Localizzazione

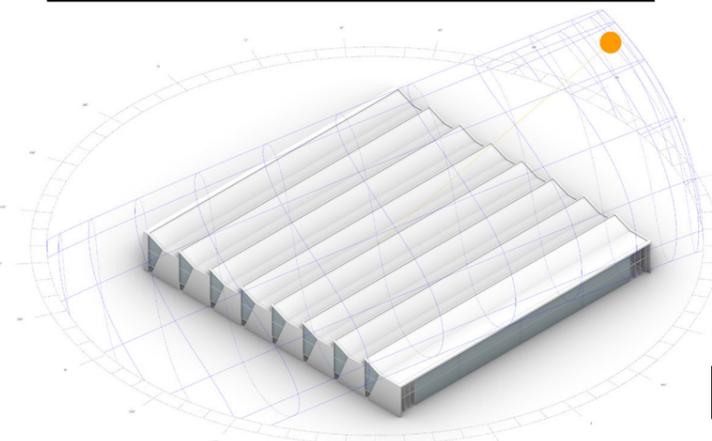
edificio modellato

Memmingen-Allgau, DEU  
47.99° N, 10.24° E

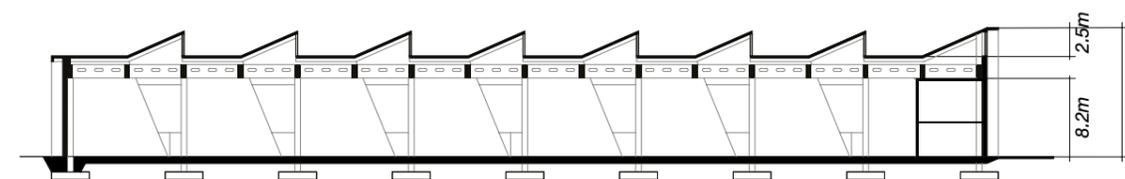
### Zone climatica

Clima temperato  
(Cfb)

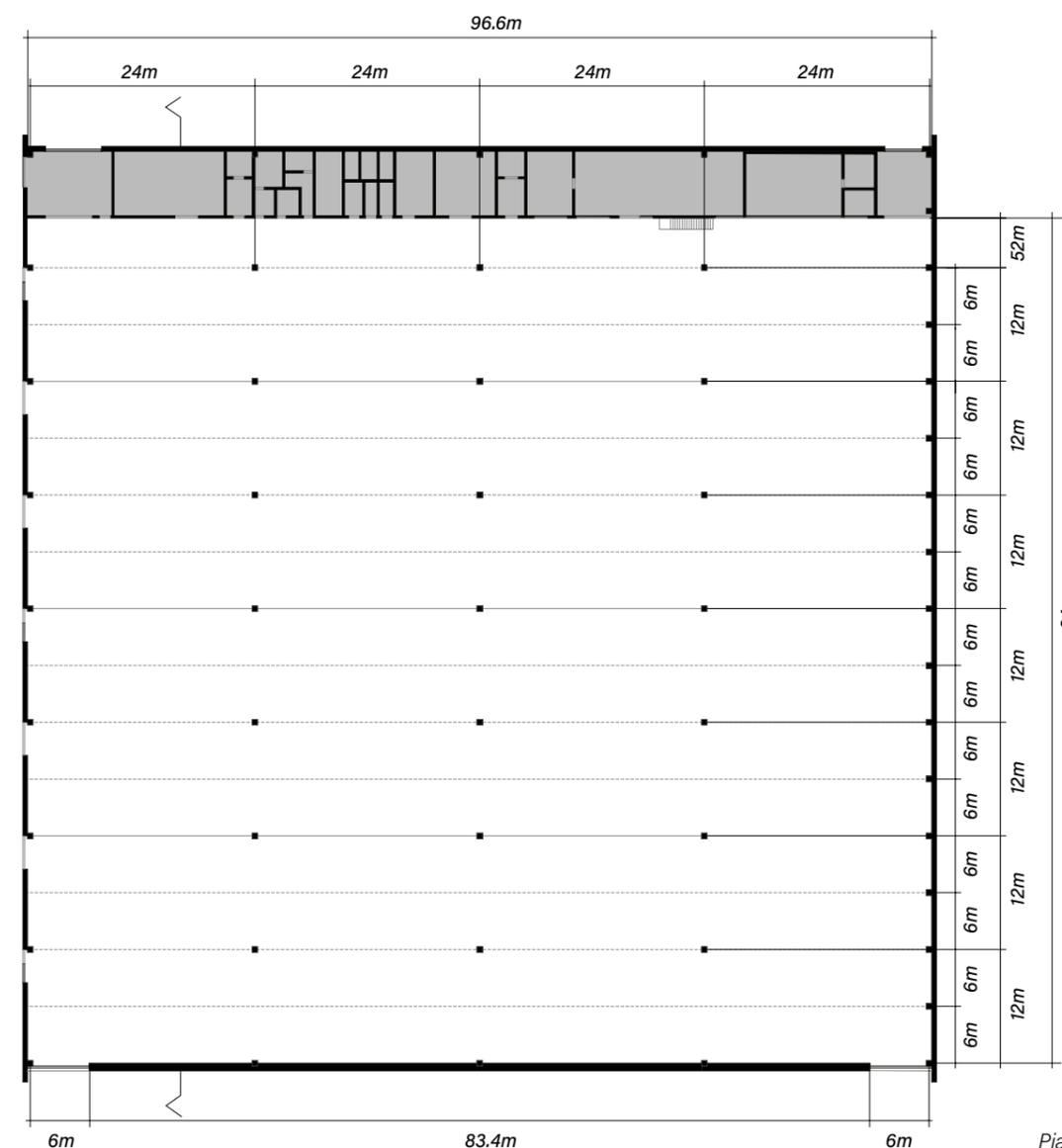
Percorso solare nel modello industriale/sistema a shed



Immagini interno ed esterno del capannone industriale (28)



Sezione



Pianta

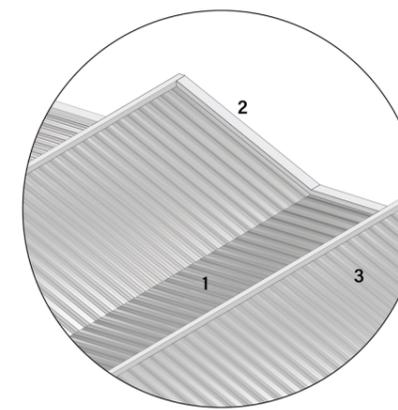


**Proprietà materiali**

Trasmissione visibile  $T_v$   
 Riflessione visibile  $R_v$   
 Fattore solare SHGC  
 Trasmissione termica U-value



**dettaglio**  
apertura zenitale



**dettaglio**  
copertura

1 **copertura piana**  
pannelli coibentati in metallo  
 $R_v$  65%

2 **cornice copertura**  
in alluminio  
 $R_v$  65%

3 **copertura inclinata a sud**  
pannelli fotovoltaici  
 $R_v$  5%

1 **apertura a shed**  
a triplo vetro basso emissivo  
 $T_v$  59% SHGC 0.40 U-value 0.76 W/m<sup>2</sup>K

2 **telaio apertura**  
in alluminio  
 $R_v$  7%

1 **materiale facciata**  
pannelli lamiera profilate  
 $R_v$  65%

2 **apertura inferiore**  
a triplo vetro basso emissivo  
 $T_v$  59% SHGC 0.40 U-value 0.76 W/m<sup>2</sup>K

3 **apertura superiore**  
a vetro traslucido coibentato  
 $T_v$  30% SHGC 0.38 U-value 2.57 W/m<sup>2</sup>K

4 **telaio apertura**  
in alluminio  
 $R_v$  7%

**dettaglio**  
materiali interni

1 **pavimento**  
in cemento levigato  
 $R_v$  29%

2 **sistema costruttivo**  
colonne e travi prefabbricate in calcestruzzo  
 $R_v$  43%

1 **materiale facciata centrale**  
a vetro traslucido coibentato  
 $T_v$  30% SHGC 0.38 U-value 2.57 W/m<sup>2</sup>K

2 **apertura verticale laterale**  
a triplo vetro basso emissivo  
 $T_v$  59% SHGC 0.40 U-value 0.76 W/m<sup>2</sup>K

3 **telaio apertura**  
in alluminio  
 $R_v$  7%

**dettaglio**  
facciata ovest

**dettaglio**  
facciata sud

## Prestazioni dei sistemi di illuminazione - capannone a shed



### SCENARIO 1

sistema di illuminazione / verticale e zenitale

### SCENARIO 2

sistema di illuminazione / solo zenitale

### SCENARIO 3

sistema di illuminazione / solo verticale

## Daylight Glare Probability - capannone a shed

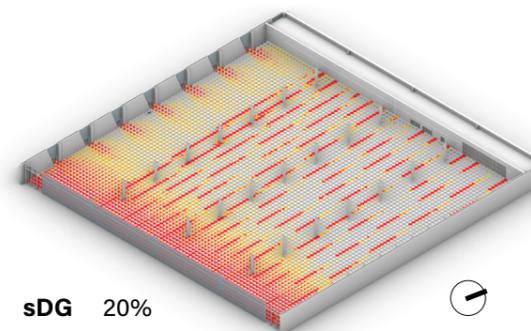
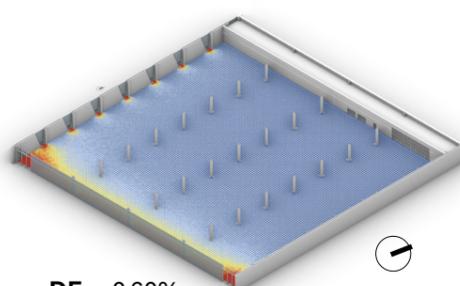
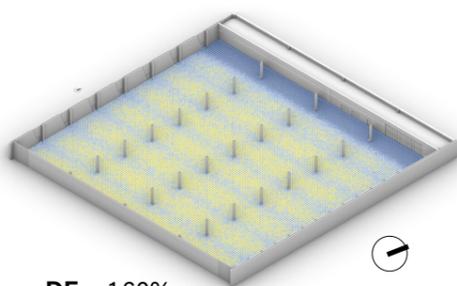
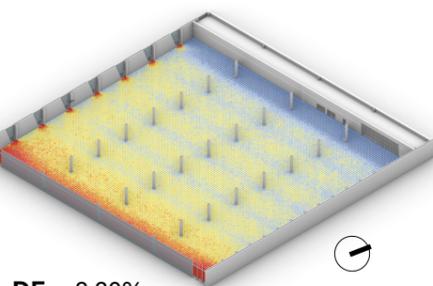


### SCENARIO 1

sistema di illuminazione / verticale e zenitale

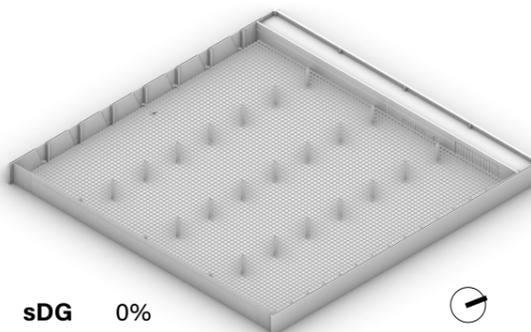
### Prime conclusioni/

Le condizioni di verifica applicate sono le stesse considerate nel caso scolastico. I risultati ottenuti per le condizioni di illuminazione indicano che, nello scenario 1, il contributo complessivo dell'edificio soddisfa i requisiti di illuminazione. Per quanto riguarda il contributo del sistema zenitale, presenta una disponibilità di luce maggiore all'interno del capannone, con un fattore di luce diurna medio  $DF_m$  del 1.60% sul contributo complessivo di 2.20%, poiché il sistema a shed copre una superficie superiore rispetto a quello verticale, che copre solo due pareti dell'edificio. Tuttavia, l'orientamento a nord del sistema a shed fa sì che non tutte le aree interne raggiungano i 300 lux per almeno il 50% del tempo di occupazione, come mostrato nei grafici relativi all' **sDA** e **UDI**. Un'altra osservazione riguarda il tema dell'abbagliamento: l'orientamento nord degli shed impedisce l'ingresso della radiazione solare diretta, riducendo il rischio di abbagliamento all'interno del capannone, come evidenziato nei grafici **ASE** e **DGP**.



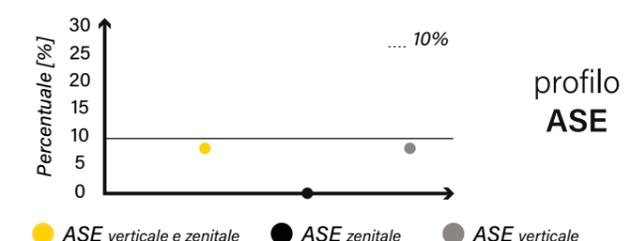
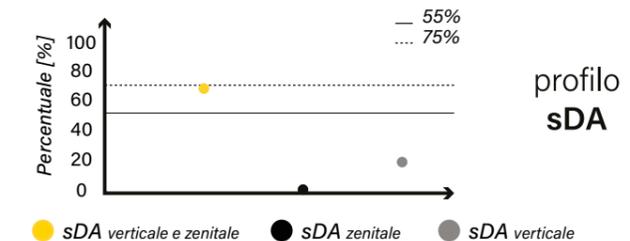
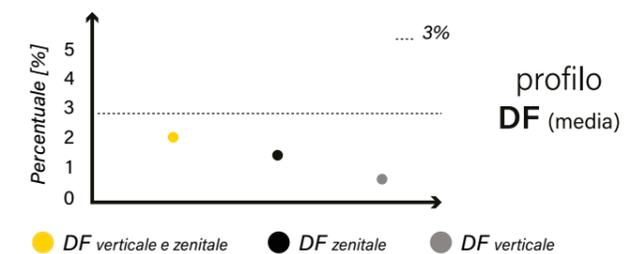
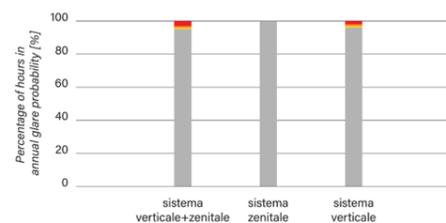
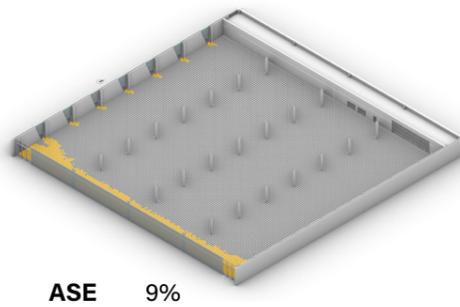
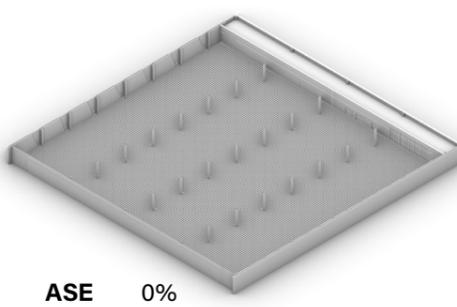
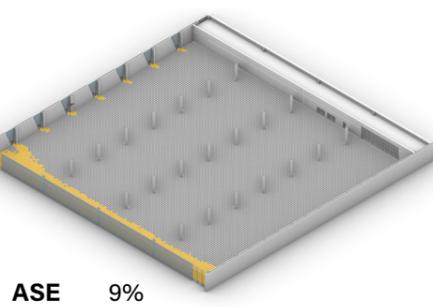
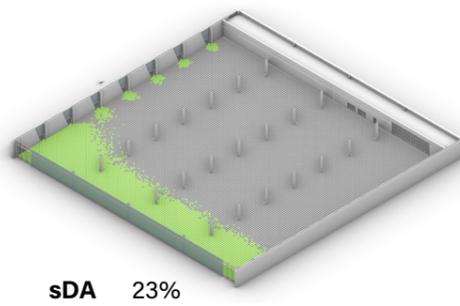
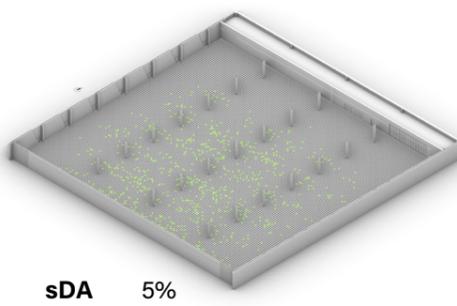
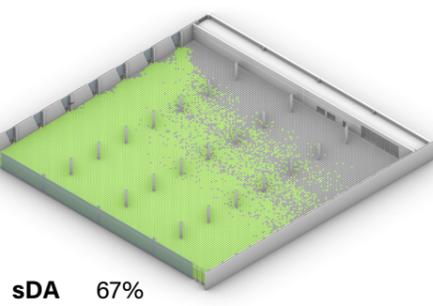
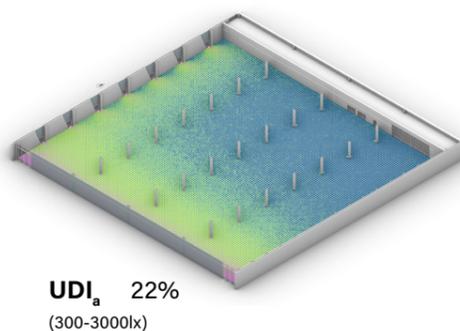
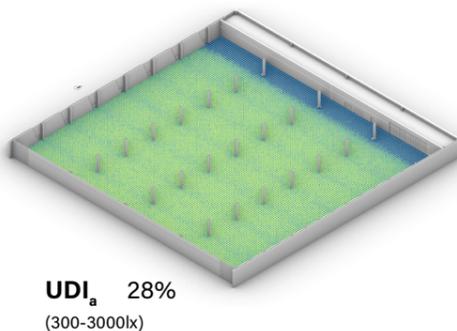
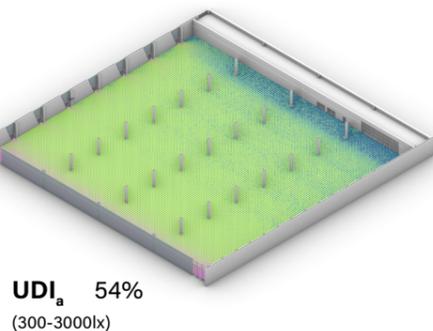
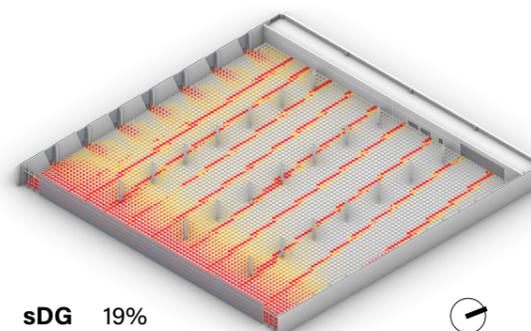
### SCENARIO 2

sistema di illuminazione / solo zenitale



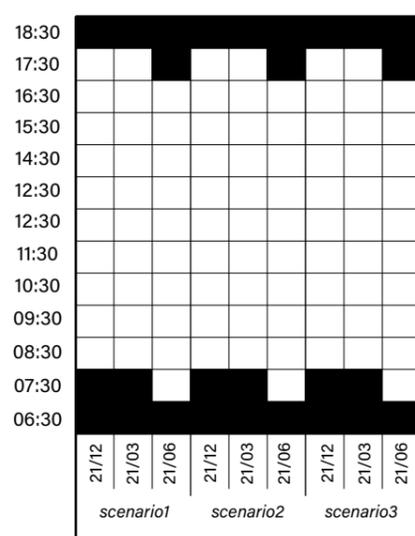
### SCENARIO 3

sistema di illuminazione / solo verticale



### Capannone / sistema a shed

Questa sezione si concentra sui risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate su ALFA nell'edificio industriale con il sistema zenitale a shed, per l'analisi delle condizioni di illuminazione orizzontale sul piano di lavoro e del contributo melanopico della luce secondo i tre scenari ipotizzati in condizioni di cielo sereno e coperto. Le simulazioni sono state effettuate secondo lo schema sottostante, dove vengono definiti i tre giorni di riferimento, 21 dicembre - 21 marzo - 21 giugno, oltre al profilo di occupazione del capannone.



Per i livelli di soglia di riferimento, abbiamo secondo la norma UNI EN 12464-1 un requisito di illuminamento fotopico  $E_{wp} = 500 \text{ lux}$  sul piano di lavoro nel caso di un ambiente con attività di produzione e logistica, sia in condizione di cielo sereno che coperto. E secondo il protocollo WELLv2, Q1-Q2 2024 vengono definiti dei livelli di luce che vengono raggiunti sul piano verticale all'altezza degli occhi per simulare la luce che entra nell'occhio dell'occupante, con una soglia minima di **mel-EDI  $\geq 109$  o  $163 \text{ lux}$**  melanopico o con una soglia minima di **mel-EDI  $\geq 136$  o  $250 \text{ lux}$**  per almeno 4 ore al giorno, a seconda se la media  $sDA_{300,50\%}$  viene raggiunta per  $\geq 75\%$  della superficie occupata nel capannone esaminato.

I primi due grafici mostrano i risultati ottenuti dalle simulazioni su ALFA relative all'illuminamento medio  $E_{wp}$  sul piano di lavoro, sia in condizione di cielo sereno che cielo coperto, per i tre scenari ipotizzati. In primo luogo, si osserva che nel caso dell'edificio complessivo, che tiene conto dei due sistemi di illuminazione, soddisfa il requisito di  $E_{wp} = 500 \text{ lux}$  in tutte le condizioni tranne nel periodo invernale con cielo coperto. In condizioni di cielo sereno, il contributo maggiore di illuminazione è fornito dal sistema verticale, soddisfacendo il requisito di 500 lux di  $E_{wp}$  per i tre giorni analizzati, mentre il sistema a shed con orientamento a nord non permette alla luce diretta di entrare e quindi risultano valori di illuminamento sul piano di lavoro insufficienti.

In caso di cielo coperto, per qualsiasi giorno esaminato, il sistema a shed fornisce all'incirca il 60% dell'illuminamento sul piano di lavoro rispetto al contributo complessivo dell'edificio.

Sulla base dei risultati ottenuti dalle simulazioni su ClimateStudio riguardo le condizioni di illuminazione naturale del contributo complessivo nel capannone (scenario 1), si può registrare un valore medio di  $sDA_{300,50\%}$  pari al 67%, quindi inferiore alla soglia minima di 75% della superficie occupata, verrà quindi considerato secondo il protocollo WELL il requisito medio **mel-EDI  $\geq 136 - 250 \text{ lux}$**  per almeno 4 ore nel giorno.

Dai grafici riportati nelle pagine successive, si nota che il contributo maggiore di mel-EDI sia in condizioni di cielo sereno che coperto, è fornito dal sistema verticale, rispetto al sistema a shed, che registra valori sufficienti di mel-EDI solo il 21 marzo e il 21 giugno in condizioni di cielo coperto. Tuttavia, questi risultati rappresentano un valore medio di mel-EDI; se si osservano le due tabelle sottostanti ai grafici, si può notare che il requisito di **mel-EDI  $\geq 136 - 250 \text{ lux}$**  non viene mai raggiunto sul 100% della superficie analizzata, come viene richiesto dal WELL.



Grafico: confronto dell'illuminamento orizzontale  $E_{wp,medio}$  per i tre scenari di illuminazione nell'edificio industriale con il sistema a shed, in condizione di cielo sereno

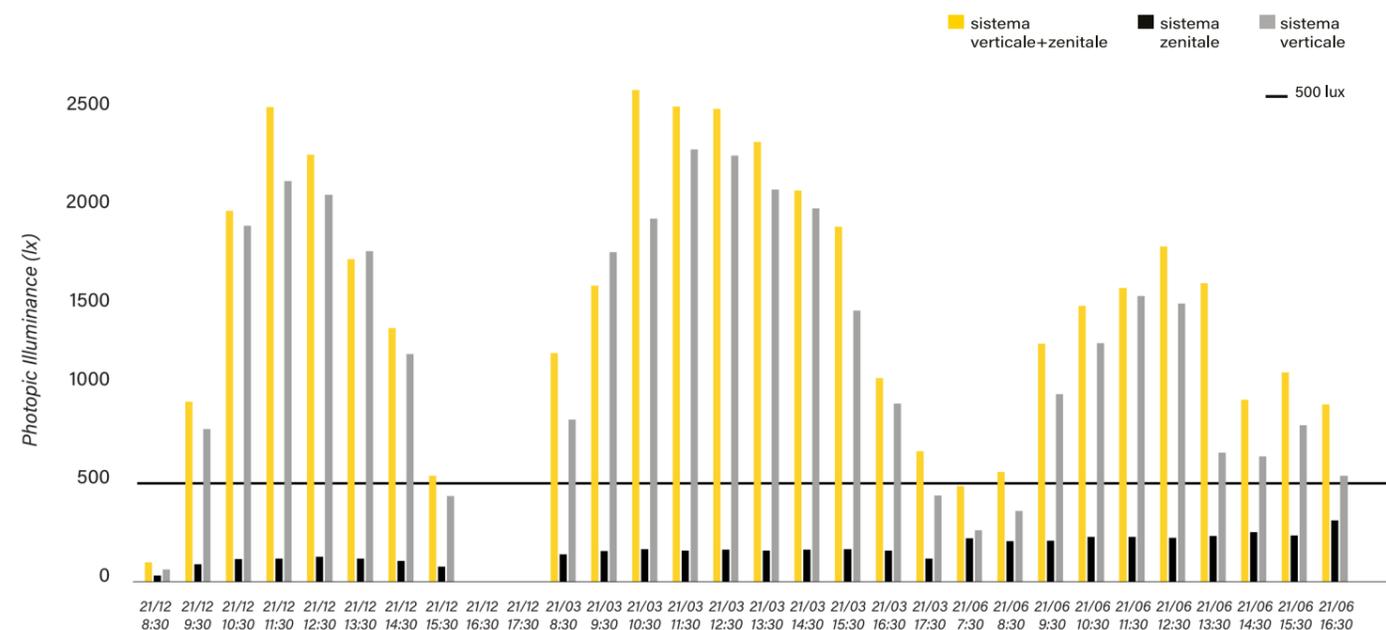
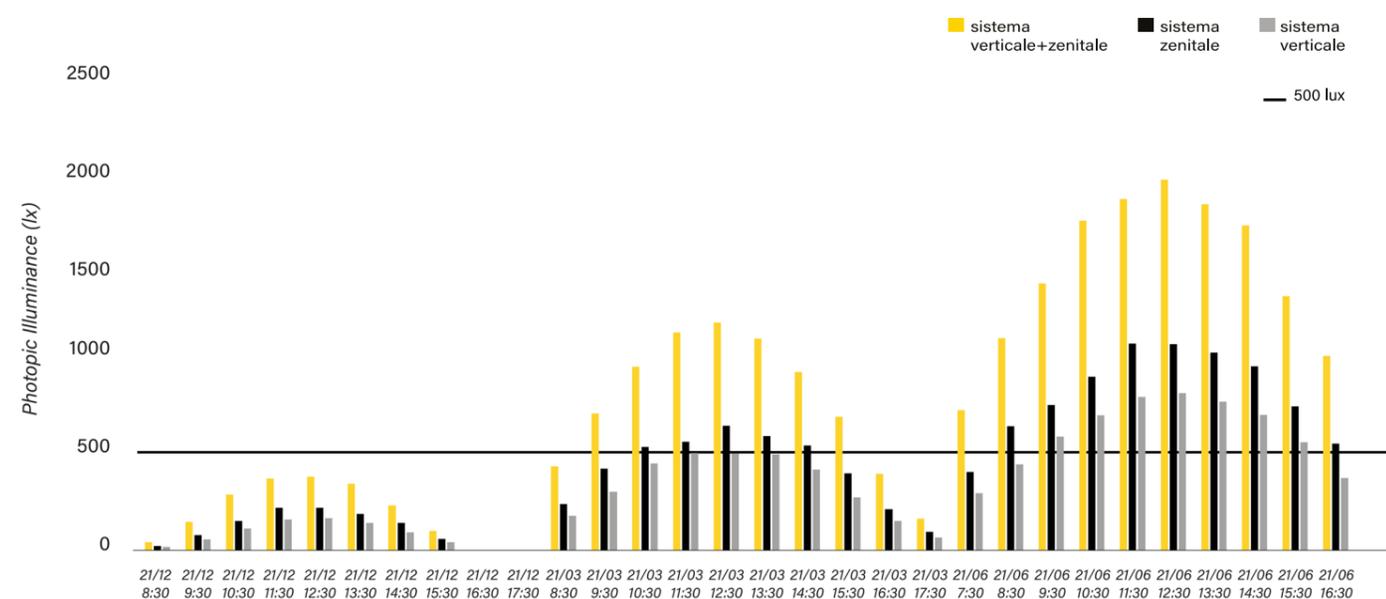


Grafico: confronto dell'illuminamento orizzontale  $E_{wp,medio}$  per i tre scenari di illuminazione nell'edificio industriale con il sistema a shed, in condizione di cielo coperto



# condizioni illuminazione naturale / effetti non visivi

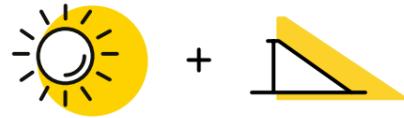


Grafico: confronto del valore mel-EDI<sub>medio</sub> per i tre scenari di illuminazione nell'edificio industriale con il sistema a shed, in condizione di cielo sereno

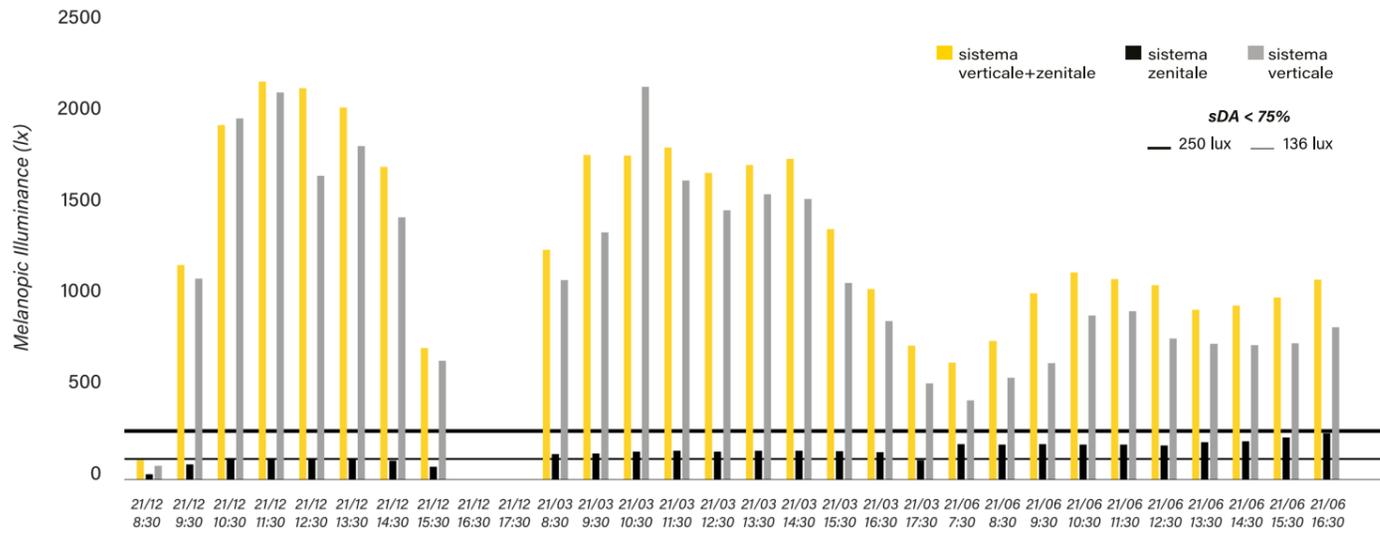
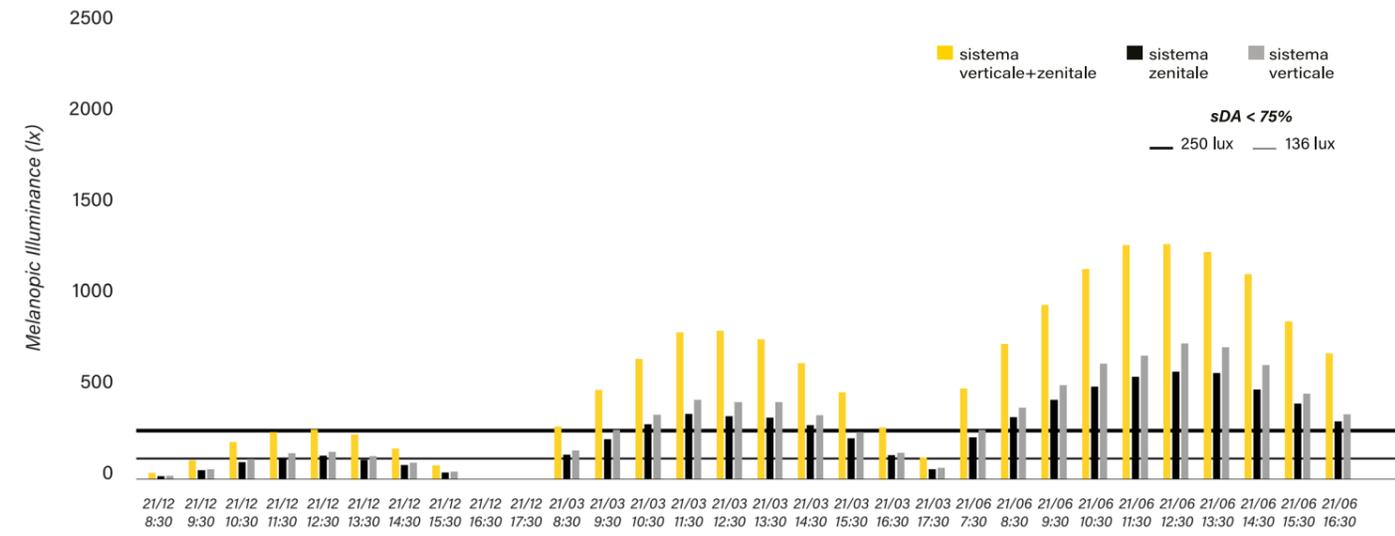


Grafico: confronto del valore mel-EDI<sub>medio</sub> per i tre scenari di illuminazione nell'edificio industriale con il sistema a shed, in condizione di cielo coperto



GIORNO	TEMPO	SISTEMA DI ILLUMINAZIONE NATURALE		
		VERTICALE + ZENITALE	ZENITALE	VERTICALE
21 dicembre	08:30	19%	0%	14%
	09:30	86%	68%	68%
	10:30	93%	29%	77%
	11:30	95%	31%	75%
	12:30	96%	30%	78%
	13:30	94%	31%	77%
	14:30	92%	25%	75%
	15:30	80%	13%	59%
	16:30	0%	0%	0%
21 marzo	08:30	92%	43%	62%
	09:30	92%	45%	70%
	10:30	94%	47%	74%
	11:30	95%	51%	75%
	12:30	95%	49%	74%
	13:30	95%	50%	76%
	14:30	96%	47%	75%
	15:30	95%	44%	76%
	16:30	94%	41%	74%
21 giugno	07:30	92%	59%	59%
	08:30	93%	60%	65%
	09:30	94%	61%	66%
	10:30	95%	61%	71%
	11:30	94%	59%	71%
	12:30	95%	58%	72%
	13:30	95%	61%	73%
	14:30	95%	60%	74%
	15:30	95%	64%	73%
16:30	96%	67%	72%	

Tabella: percentuale di superficie in cui l'illuminamento è superiore a 136 mel-EDI [lux] per ottenere 1PT WELL

GIORNO	TEMPO	SISTEMA DI ILLUMINAZIONE NATURALE		
		VERTICALE + ZENITALE	ZENITALE	VERTICALE
21 dicembre	08:30	2%	0%	2%
	09:30	17%	0%	11%
	10:30	56%	21%	21%
	11:30	72%	32%	26%
	12:30	73%	36%	27%
	13:30	70%	26%	24%
	14:30	49%	18%	17%
	15:30	10%	0%	8%
	16:30	0%	0%	0%
21 marzo	08:30	76%	40%	28%
	09:30	92%	65%	42%
	10:30	94%	77%	51%
	11:30	95%	84%	56%
	12:30	95%	96%	55%
	13:30	95%	84%	54%
	14:30	93%	76%	49%
	15:30	91%	64%	41%
	16:30	81%	37%	27%
21 giugno	07:30	91%	67%	44%
	08:30	95%	85%	53%
	09:30	95%	91%	63%
	10:30	96%	92%	67%
	11:30	97%	93%	69%
	12:30	97%	93%	72%
	13:30	97%	93%	69%
	14:30	96%	93%	67%
	15:30	95%	91%	68%
16:30	95%	82%	53%	

Tabella: percentuale di superficie in cui l'illuminamento è superiore a 136 mel-EDI [lux] per ottenere 1PT WELL

GIORNO	TEMPO	SISTEMA DI ILLUMINAZIONE NATURALE		
		VERTICALE + ZENITALE	ZENITALE	VERTICALE
21 dicembre	08:30	9%	0%	7%
	09:30	63%	0%	53%
	10:30	80%	7%	66%
	11:30	83%	7%	62%
	12:30	83%	7%	63%
	13:30	81%	5%	66%
	14:30	78%	3%	62%
	15:30	50%	0%	39%
	16:30	0%	0%	0%
21 marzo	08:30	80%	13%	46%
	09:30	82%	13%	55%
	10:30	84%	18%	59%
	11:30	85%	18%	58%
	12:30	87%	17%	59%
	13:30	86%	18%	62%
	14:30	88%	18%	63%
	15:30	86%	19%	67%
	16:30	84%	19%	61%
21 giugno	07:30	80%	25%	42%
	08:30	84%	23%	47%
	09:30	87%	23%	49%
	10:30	87%	22%	55%
	11:30	85%	24%	56%
	12:30	87%	22%	57%
	13:30	88%	29%	59%
	14:30	88%	34%	59%
	15:30	89%	37%	58%
16:30	87%	40%	58%	

Tabella: percentuale di superficie in cui l'illuminamento è superiore a 250 mel-EDI [lux] per ottenere 3PT WELL

GIORNO	TEMPO	SISTEMA DI ILLUMINAZIONE NATURALE		
		VERTICALE + ZENITALE	ZENITALE	VERTICALE
21 dicembre	08:30	0%	0%	0%
	09:30	7%	0%	4%
	10:30	20%	1%	12%
	11:30	37%	10%	15%
	12:30	41%	15%	16%
	13:30	33%	5%	13%
	14:30	14%	0%	10%
	15:30	4%	0%	3%
	16:30	0%	0%	0%
21 marzo	08:30	44%	17%	16%
	09:30	74%	30%	27%
	10:30	85%	55%	34%
	11:30	90%	60%	39%
	12:30	89%	60%	37%
	13:30	88%	59%	37%
	14:30	84%	52%	33%
	15:30	72%	34%	26%
	16:30	44%	18%	15%
21 giugno	07:30	8%	0%	6%
	08:30	75%	34%	27%
	09:30	88%	59%	36%
	10:30	92%	67%	47%
	11:30	94%	75%	51%
	12:30	94%	79%	52%
	13:30	94%	81%	56%
	14:30	94%	80%	56%
	15:30	91%	65%	42%
16:30	87%	54%	34%	

Tabella: percentuale di superficie in cui l'illuminamento è superiore a 250 mel-EDI [lux] per ottenere 3PT WELL

Prime conclusioni sul sistema a shed/

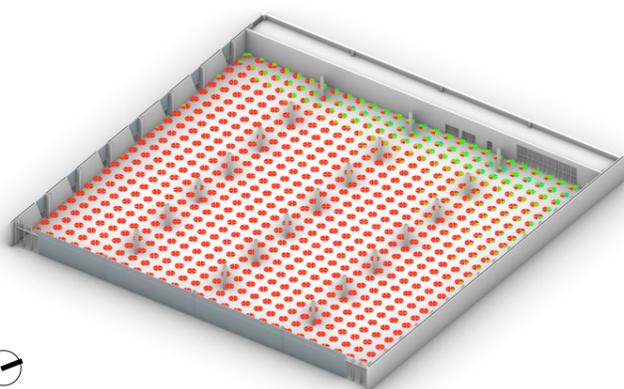
Dall'analisi del capannone industriale, con il sistema zenitale a shed, relativo all'illuminamento melanopico al livello dell'occhio con il valore mel-EDI<sub>medio</sub> in condizioni di cielo sereno e cielo coperto, viene fatta un'ulteriore verifica del contributo dei sistemi di illuminazione attraverso il sistema di punteggio in riferimento al protocollo WELL per tutti e tre i giorni e nelle due condizioni di cielo, che tiene in conto il 100% della superficie del capannone. Anche se nei requisiti del protocollo WELL questa verifica deve tener conto di tutti i giorni dell'anno, nel nostro caso vengono considerati tre giorni (il solstizio d'estate, il solstizio d'inverno e l'equinozio di primavera) che presentano condizioni di illuminamento estremamente diverse per un migliore confronto sul contributo del sistema di illuminazione zenitale rispetto a quello verticale.

Questa verifica viene riassunta in due grafici dove viene evidenziato il funzionamento del sistema di conteggio:

Si ottiene 1 punto se si verifica il raggiungimento di un valore minimo di 136 mel-EDI per almeno 4 ore della giornata in tutte le condizioni di cielo con una media  $sDA_{300,50\%} < 75\%$  della superficie occupata.

Si ottiene 3 punti se si verifica il raggiungimento di un valore minimo di 250 mel-EDI per almeno 4 ore della giornata in tutte le condizioni di cielo con una media  $sDA_{300,50\%} < 75\%$  della superficie occupata.

Nei due grafici riportati a fianco, si osserva che, in condizioni di cielo sereno e di cielo coperto, l'edificio complessivo, che tiene conto del sistema zenitale e verticale, non riesce a soddisfare nessuno dei requisiti necessari per ottenere 1PT o 3PT nei tre giorni considerati, per almeno 4 ore al giorno. Questo risultato è dovuto dalla percentuale di superficie con un illuminamento, superiore ad un mel-EDI di 136 lux (per 1 punto) o superiore a 250 lux (per 3 punti), che non raggiunge mai il 100% dell'intera superficie del capannone. La causa di ciò è che le pareti a nord e ad est del modello non forniscono alcun contributo di illuminazione, creando così un'area più ostruita, come illustrato nella figura sottostante. In un'ipotesi in cui questa zona in ombra non fosse presa in considerazione, o si tenesse conto di un apporto di luce proveniente dagli uffici situati a Nord del capannone (esclusi nel modello), sarebbe possibile soddisfare i requisiti necessari per ottenere il punteggio secondo il protocollo WELL.



Risultato mel-EDI / scenario sistema a shed, 21marzo, 12:30, cielo sereno

		3 PT 250 lux	1 PT 136 lux	SDA < 75%	3 PT 250 lux	1 PT 136 lux	SDA < 75%	3 PT 250 lux	1 PT 136 lux	SDA < 75%
21 dicembre	08:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	09:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	10:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	11:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	12:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	13:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	14:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	15:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
21 marzo	08:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	09:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	10:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	11:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	12:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	13:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	14:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	15:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
21 giugno	07:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	08:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	09:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	10:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	11:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	12:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	13:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	14:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●

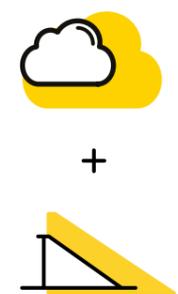
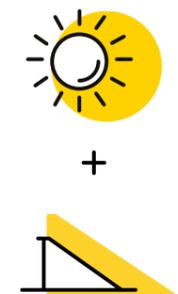
VERTICALE + ZENITALE      ZENITALE      VERTICALE

SISTEMA DI ILLUMINAZIONE NATURALE

		3 PT 250 lux	1 PT 136 lux	SDA < 75%	3 PT 250 lux	1 PT 136 lux	SDA < 75%	3 PT 250 lux	1 PT 136 lux	SDA < 75%
21 dicembre	08:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	09:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	10:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	11:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	12:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	13:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	14:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	15:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
21 marzo	08:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	09:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	10:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	11:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	12:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	13:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	14:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	15:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
21 giugno	07:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	08:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	09:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	10:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	11:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	12:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	13:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	14:30	●	●	●	●	●	●	●	●	●

VERTICALE + ZENITALE      ZENITALE      VERTICALE

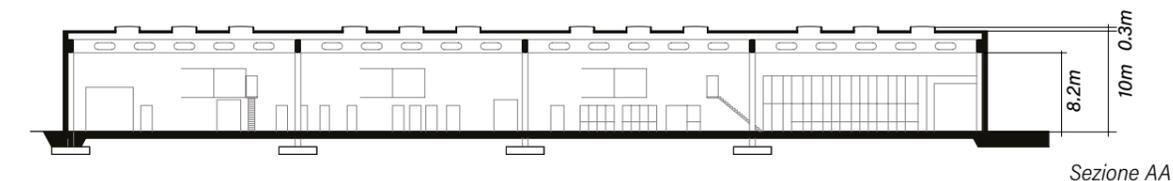
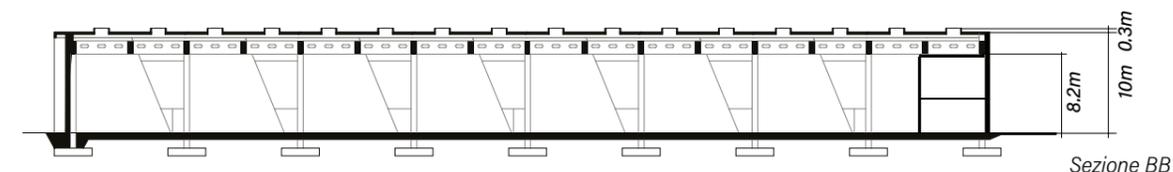
SISTEMA DI ILLUMINAZIONE NATURALE



### 9.3 Caso industriale / sistema zenitale a lucernario

Partendo dal precedente modello industriale con sistema zenitale tradizionale a shed, è stato sviluppato un nuovo modello di capannone industriale, mantenendo le stesse dimensioni, orientamento dell'edificio e proprietà dei materiali, per confrontarlo con un altro sistema zenitale comunemente impiegato nei capannoni industriali. In questo caso, è stato scelto un sistema zenitale orizzontale con numero di lucernari ricavato indicativamente dal metodo semplificato per il dimensionamento del sistema zenitale, sviluppato da Eurolux (un'associazione di produttori di lucernari ed evacuatori di fumo) secondo la "Guideline 03: Daylighting by rooflights" [65], che basandosi sulla percentuale di superficie luminosa del tetto  $x = K_L / \tau_{D65} * D$

[%] con un D target del 2% si racava un totale di 192 lucernari di 1,5 m x 2,5 m, realizzati con un basamento di 30 cm di altezza e con un vetro trasparente di trasmissione luminosa del 60%. Questi lucernari sono stati distribuiti in modo regolare lungo le quattro campate principali, evitando interferenze con il sistema strutturale, come illustrato nello schema sottostante. L'obiettivo di questa soluzione alternativa è valutare l'impatto del sistema a lucernario, rispetto al sistema a shed sulla quantità di luce naturale all'interno del capannone e determinare i possibili vantaggi o svantaggi di questo sistema in termini di effetti ftopici e melanopici della luce naturale per il comfort degli occupanti.



Rapporto aeroilluminante (R.A.I.) dell'area esaminata

**sistema zenitale**

$$S_w = 720 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{floor}} = 8674 \text{ m}^2$$

$$S_w / S_{\text{floor}} = 0.08$$

**sistema verticale**

$$S_w = 1229 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{floor}} = 8674 \text{ m}^2$$

$$S_w / S_{\text{floor}} = 0.14$$

Condizioni geoclimatiche

**Localizzazione**

edificio esistente  
Kaufbeuren, DEU  
47.88° N, 10.64° E

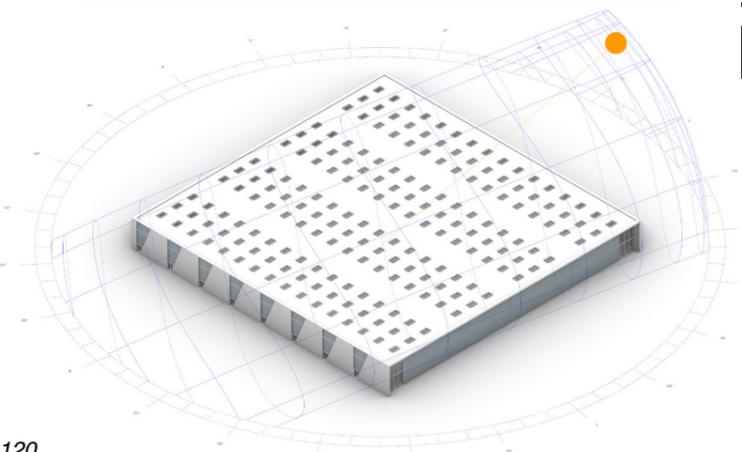
**Localizzazione**

edificio modellato  
Memmingen-Allgau, DEU  
47.99° N, 10.24° E

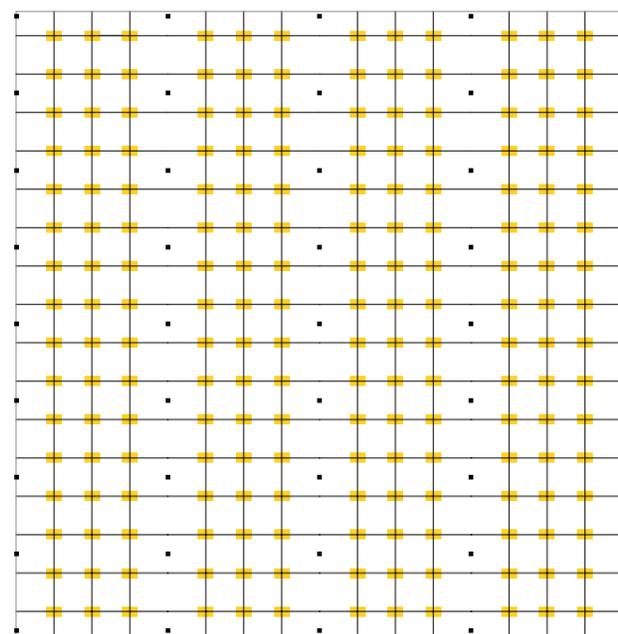
**Zone climatica**

Clima temperato  
(Cfb)

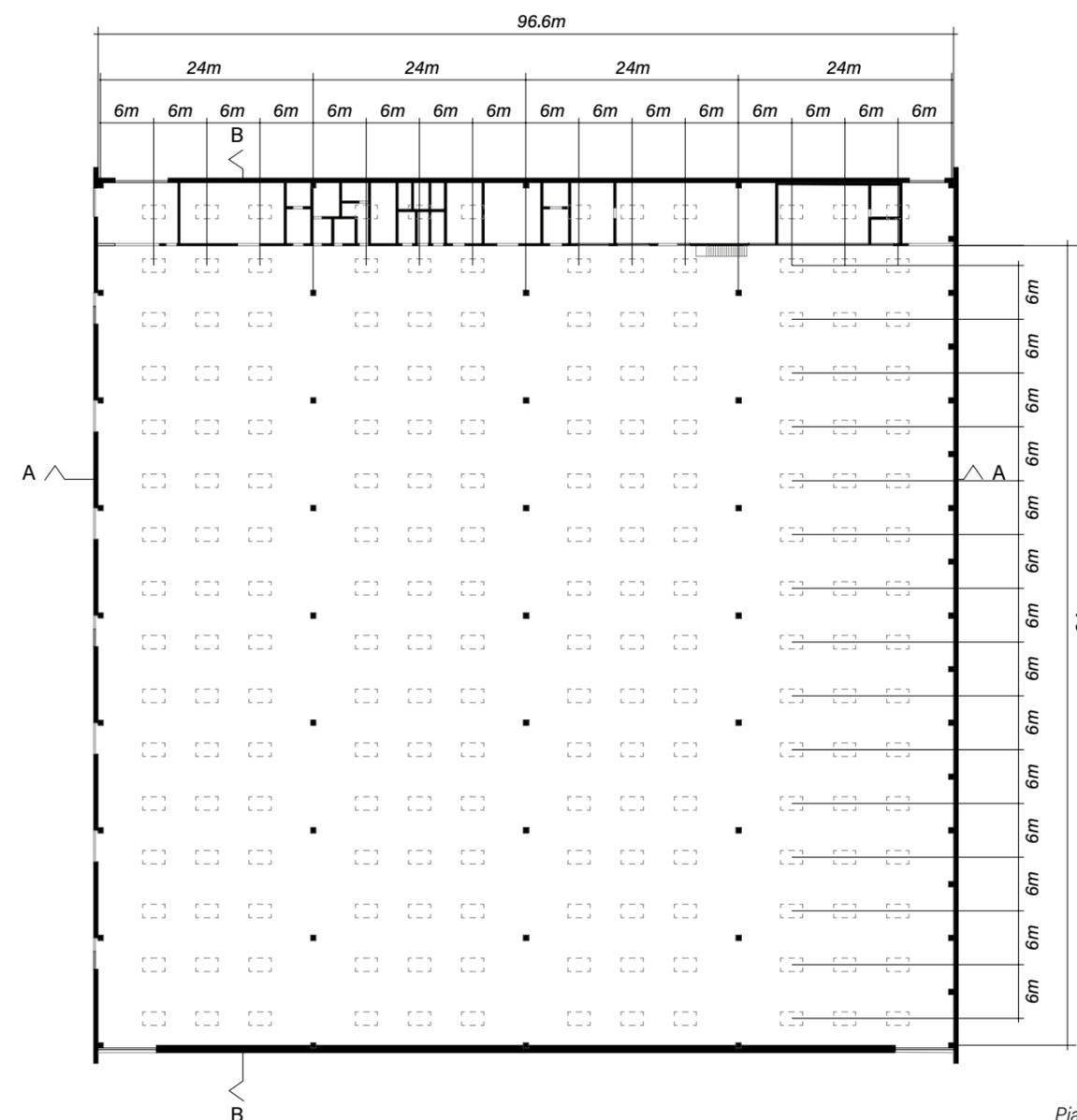
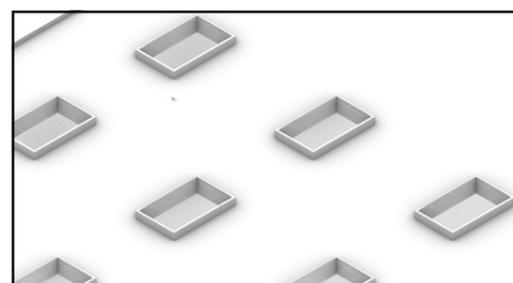
Percorso solare nel modello industriale/sistema a lucernario



Schema disposizione del sistema a lucernario



Rappresentazione del sistema a lucernario



Pianta



**Proprietà materiali**

Trasmissione visibile  $T_v$   
 Riflessione visibile  $R_v$   
 Fattore solare SHGC  
 Trasmittanza termica U-value

1 **lucernari**  
 a doppio vetro chiaro  
 $T_v$  SHGC U-value  
 60% 0.31 1.21 W/m<sup>2</sup>K

2 **telaio apertura**  
 pannelli in alluminio  
 $R_v$   
 65%

1 **materiale facciata**  
 pannelli lamiera profilate  
 $R_v$   
 65%

2 **apertura inferiore**  
 a triplo vetro basso emissivo  
 $T_v$  SHGC U-value  
 59% 0.40 0.76 W/m<sup>2</sup>K

3 **apertura superiore**  
 a vetro traslucido coibentato  
 $T_v$  SHGC U-value  
 30% 0.38 2.57 W/m<sup>2</sup>K

4 **telaio apertura**  
 in alluminio  
 $R_v$   
 7%

1 **pavimento**  
 in cemento levigato  
 $R_v$   
 29%

2 **sistema costruttivo**  
 colonne e travi prefabbricate in calcestruzzo  
 $R_v$   
 43%

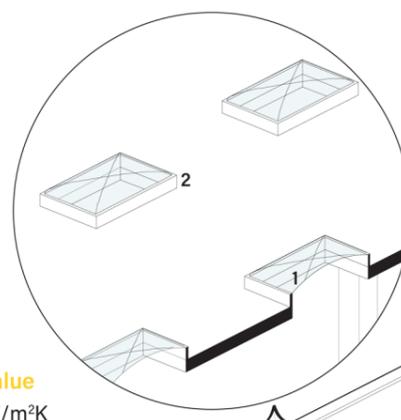
1 **copertura piana**  
 pannelli coibentati in metallo  
 $R_v$   
 65%

2 **cornicie copertura**  
 in alluminio  
 $R_v$   
 65%

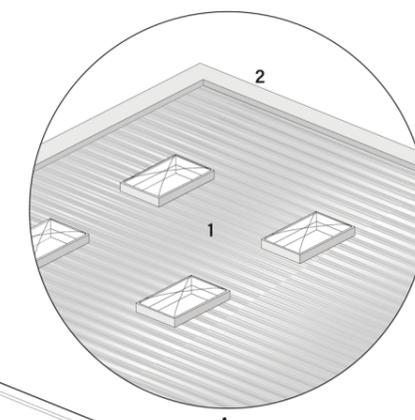
1 **materiale facciata centrale**  
 a vetro traslucido coibentato  
 $T_v$  SHGC U-value  
 30% 0.38 2.57 W/m<sup>2</sup>K

2 **apertura verticale laterale**  
 a triplo vetro basso emissivo  
 $T_v$  SHGC U-value  
 59% 0.40 0.76 W/m<sup>2</sup>K

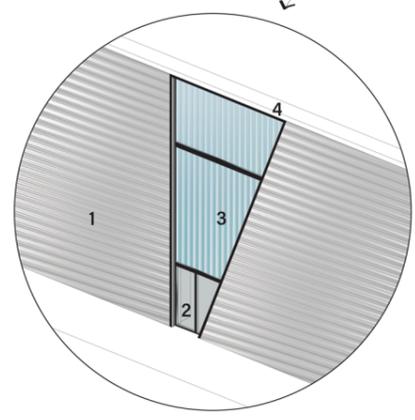
3 **telaio apertura**  
 in alluminio  
 $R_v$   
 7%



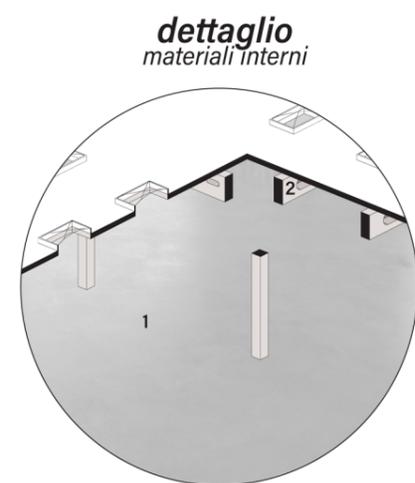
**dettaglio**  
 apertura zenitale



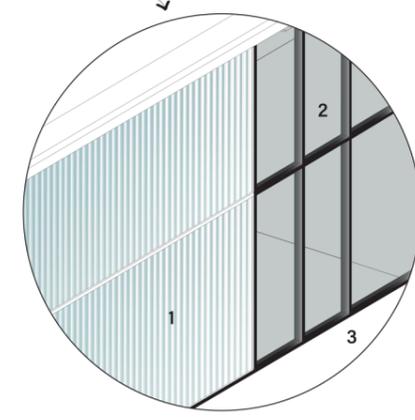
**dettaglio**  
 copertura



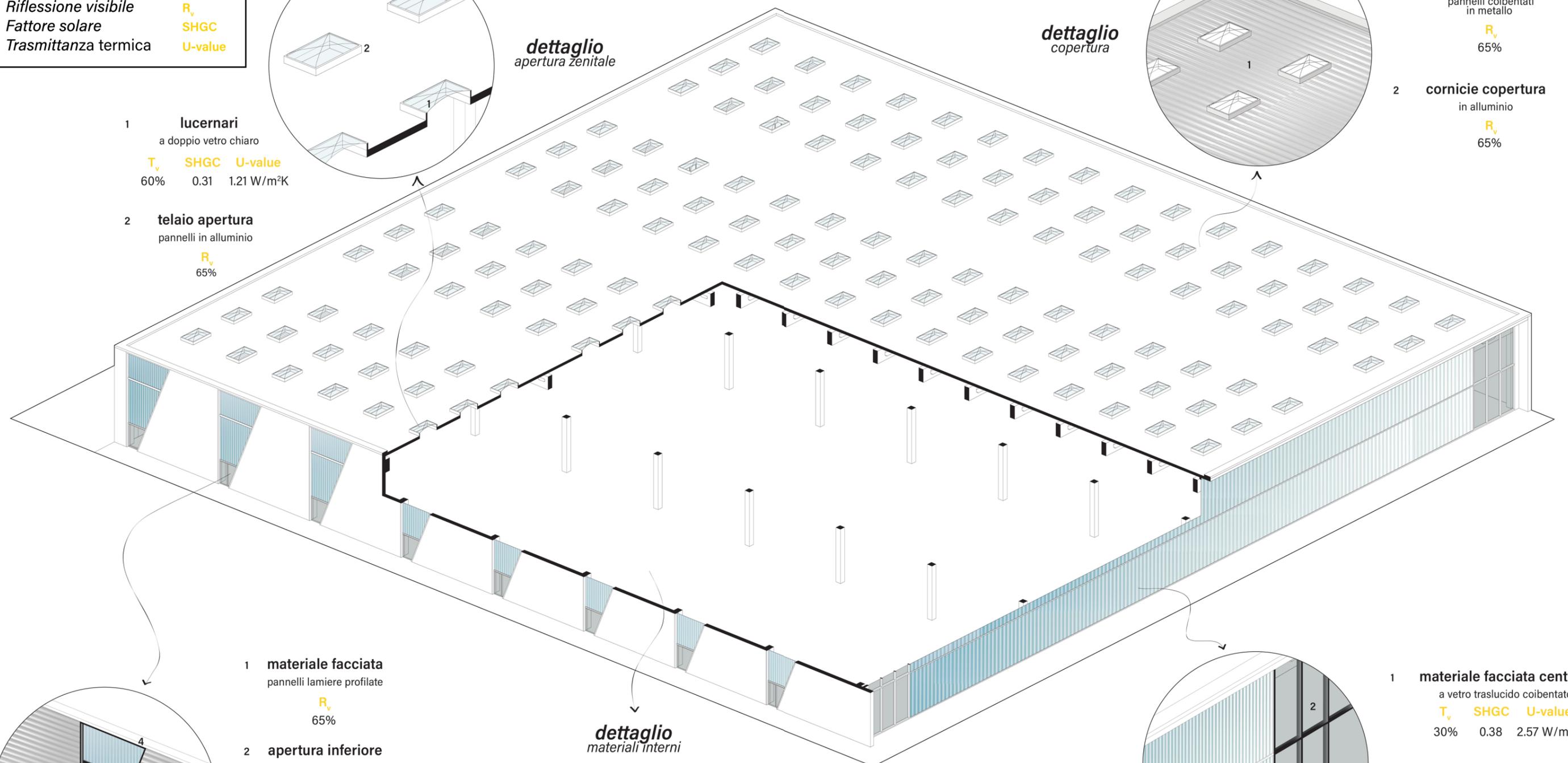
**dettaglio**  
 facciata ovest



**dettaglio**  
 materiali interni



**dettaglio**  
 facciata sud



## Prestazioni dei sistemi di illuminazione - capannone a lucernario



### SCENARIO 1

sistema di illuminazione / verticale e zenitale

### SCENARIO 2

sistema di illuminazione / solo zenitale

### SCENARIO 3

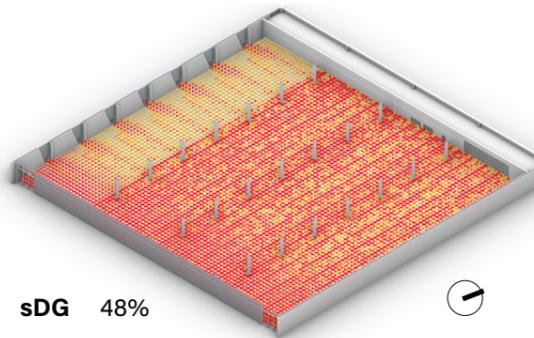
sistema di illuminazione / solo verticale

## Daylight Glare Probability - capannone a lucernario



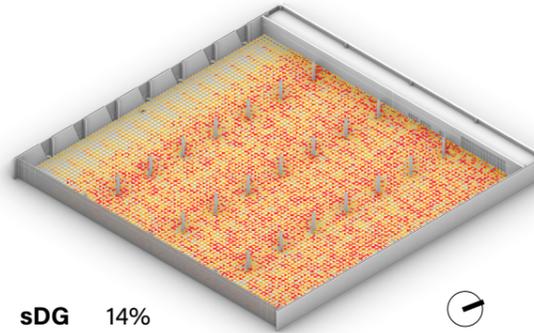
### SCENARIO 1

sistema di illuminazione / verticale e zenitale



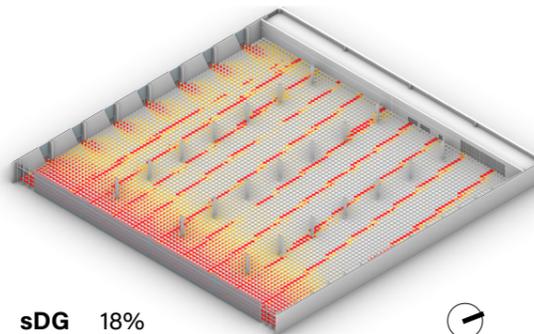
### SCENARIO 2

sistema di illuminazione / solo zenitale



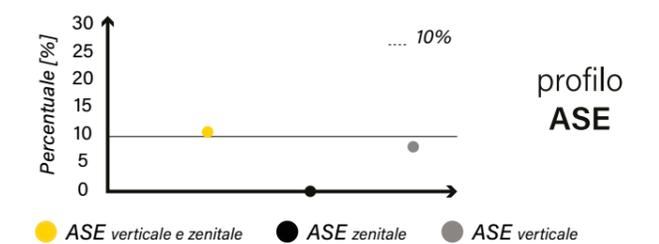
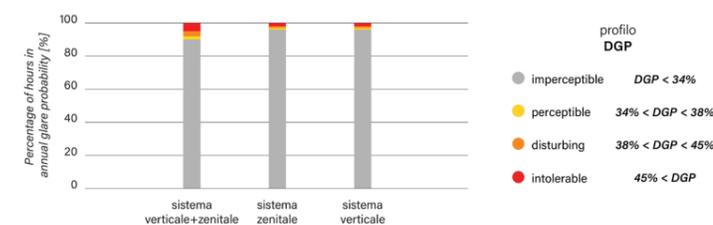
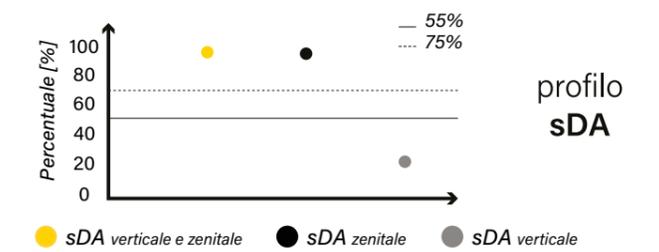
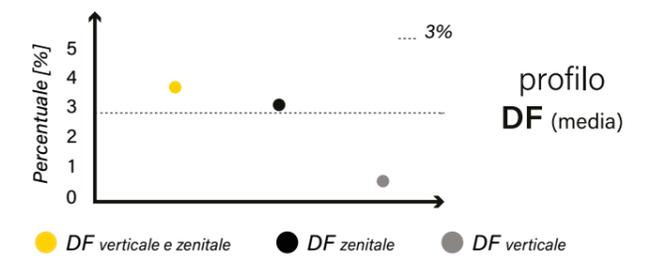
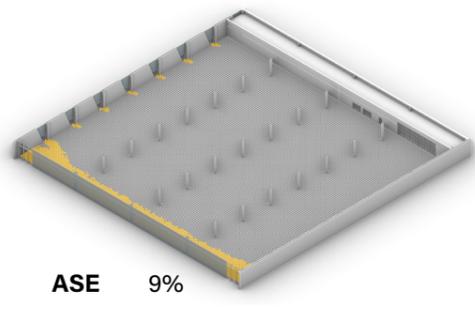
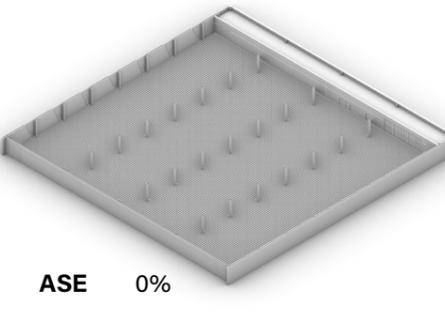
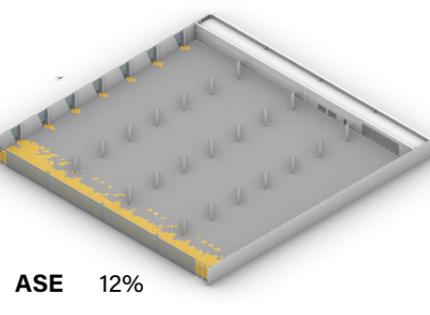
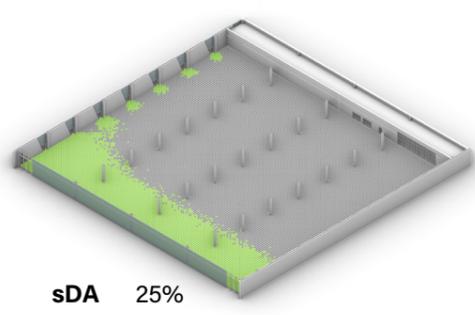
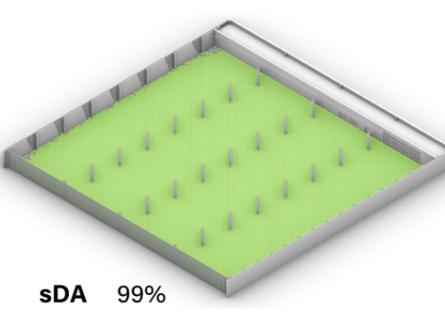
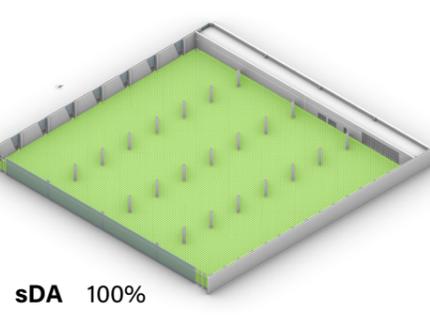
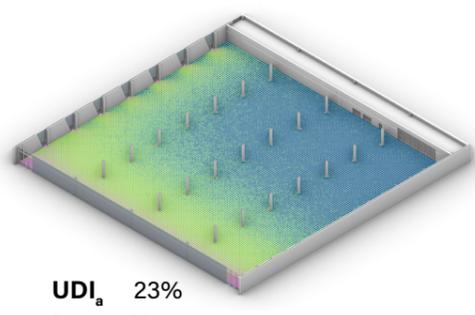
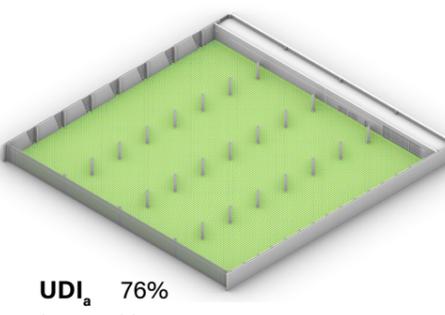
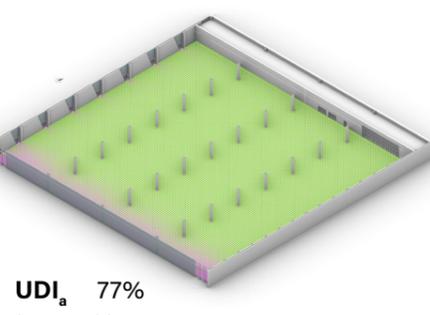
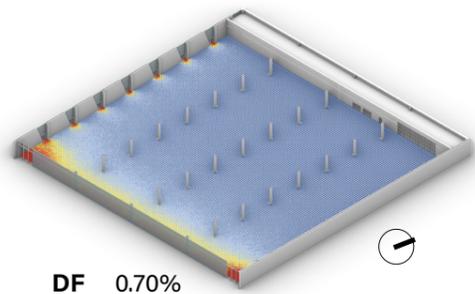
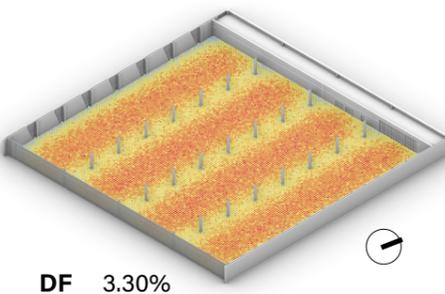
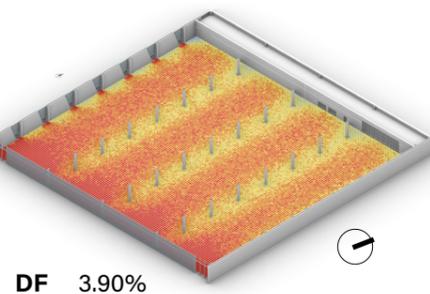
### SCENARIO 3

sistema di illuminazione / solo verticale



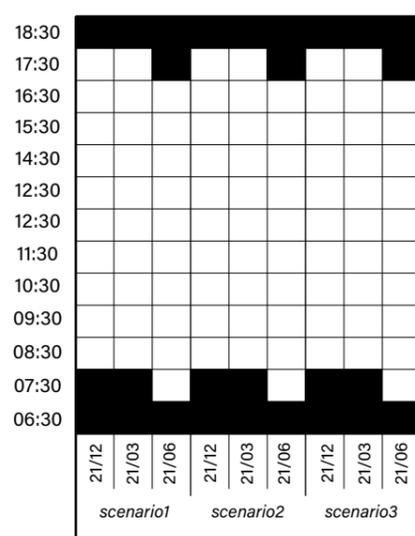
### Prime conclusioni/

I risultati ottenuti per le condizioni di illuminazione naturale indicano che, nello scenario 1, il capannone soddisfa generalmente i requisiti di illuminazione. In particolare, il contributo del sistema zenitale rivela che il lucernario, rispetto allo shed, offre un apporto luminoso più significativo all'interno del capannone, con un fattore di luce diurna medio  $DF_m$  del 3.30% rispetto al 3.90% complessivo, grazie alla sua posizione orizzontale che consente l'ingresso diretto della radiazione solare. Questo sistema, distribuito in modo regolare sulla copertura, distribuisce uniformemente la luce, permettendo a una maggiore parte della superficie interna di raggiungere i 300 lux per almeno il 50% del tempo di occupazione, come mostrato nei grafici relativi a **sDA** e **UDI**. Tuttavia, l'ingresso della radiazione solare diretta attraverso i lucernari e l'impiego di un vetro trasparente non mitigano i rischi di abbagliamento all'interno del capannone, come mostrano i grafici **ASE** e **DGP**, il che porta ad una condizione di discomfort visivo degli occupanti.



### Capannone / sistema a lucernario

Questa sezione si concentra sui risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate su ALFA nell'edificio industriale con il sistema zenitale a lucernario, per l'analisi delle condizioni di illuminazione orizzontale sul piano di lavoro e del contributo melanopico della luce secondo i tre scenari ipotizzati in condizioni di cielo sereno e coperto. Le simulazioni sono state effettuate secondo lo schema sottostante, dove vengono definiti i tre giorni di riferimento, 21 dicembre - 21 marzo - 21 giugno, oltre al profilo di occupazione del capannone.



Per i livelli di soglia di riferimento, abbiamo secondo la norma UNI EN 12464-1 un requisito di illuminamento fotopico  $E_{wp} = 500 \text{ lux}$  sul piano di lavoro nel caso di un ambiente con attività di produzione e logistica, sia in condizione di cielo sereno che coperto. E secondo il protocollo WELLv2, Q1-Q2 2024 vengono definiti dei livelli di luce che vengono raggiunti sul piano verticale all'altezza degli occhi per simulare la luce che entra nell'occhio dell'occupante, con una soglia minima di **mel-EDI  $\geq 109$  o  $163 \text{ lux}$**  melanopico o con una soglia minima di **mel-EDI  $\geq 136$  o  $250 \text{ lux}$**  per almeno 4 ore al giorno, a seconda se la media  $sDA_{300,50\%}$  viene raggiunta per  $\geq 75\%$  della

superficie occupata nel capannone esaminato. I primi due grafici illustrano i risultati ottenuti dalle simulazioni su ALFA relative all'illuminamento medio  $E_{wp}$  sul piano di lavoro, sia in condizione di cielo sereno che cielo coperto, per i tre scenari analizzati. Inizialmente, si nota che l'edificio complessivo, che tiene conto sia del sistema zenitale che verticale, soddisfa il requisito di  $E_{wp} = 500 \text{ lux}$  in tutte le condizioni, ma con valori molto inferiori nel periodo di dicembre in condizione di cielo coperto. A differenza del sistema zenitale a shed, il contributo del sistema a lucernario fornisce un illuminamento sul piano di lavoro nettamente superiore al contributo verticale nei tre giorni presi in considerazione, soprattutto in condizioni di cielo coperto.

Sulla base dei risultati ottenuti dalle simulazioni su ClimateStudio riguardo le condizioni di illuminazione naturale del contributo complessivo nel capannone (scenario 1), si può registrare un valore medio di  $sDA_{300,50\%}$  pari al 100%, quindi superiore alla soglia minima di 75% della superficie occupata, verrà quindi considerato secondo il protocollo WELL il requisito medio **mel-EDI  $\geq 109 - 163 \text{ lux}$**  per almeno 4 ore nel giorno. Dai grafici presenti nelle pagine successive, emerge che il sistema zenitale offre il maggiore contributo di  $mel-EDI_{medio}$  sia in condizioni di cielo sereno che coperto, rispetto al sistema verticale. Tuttavia, è essenziale considerare non solo il valore medio di  $mel-EDI$ , ma anche la percentuale di superficie che supera i requisiti  $mel-EDI$  per garantire il rispetto dei criteri WELL.

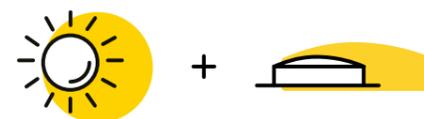


Grafico: confronto dell'illuminamento orizzontale  $E_{wp,medio}$  per i tre scenari di illuminazione nell'edificio industriale con il sistema a lucernario, in condizione di cielo sereno

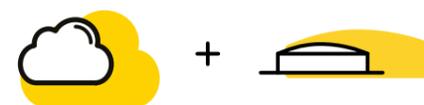
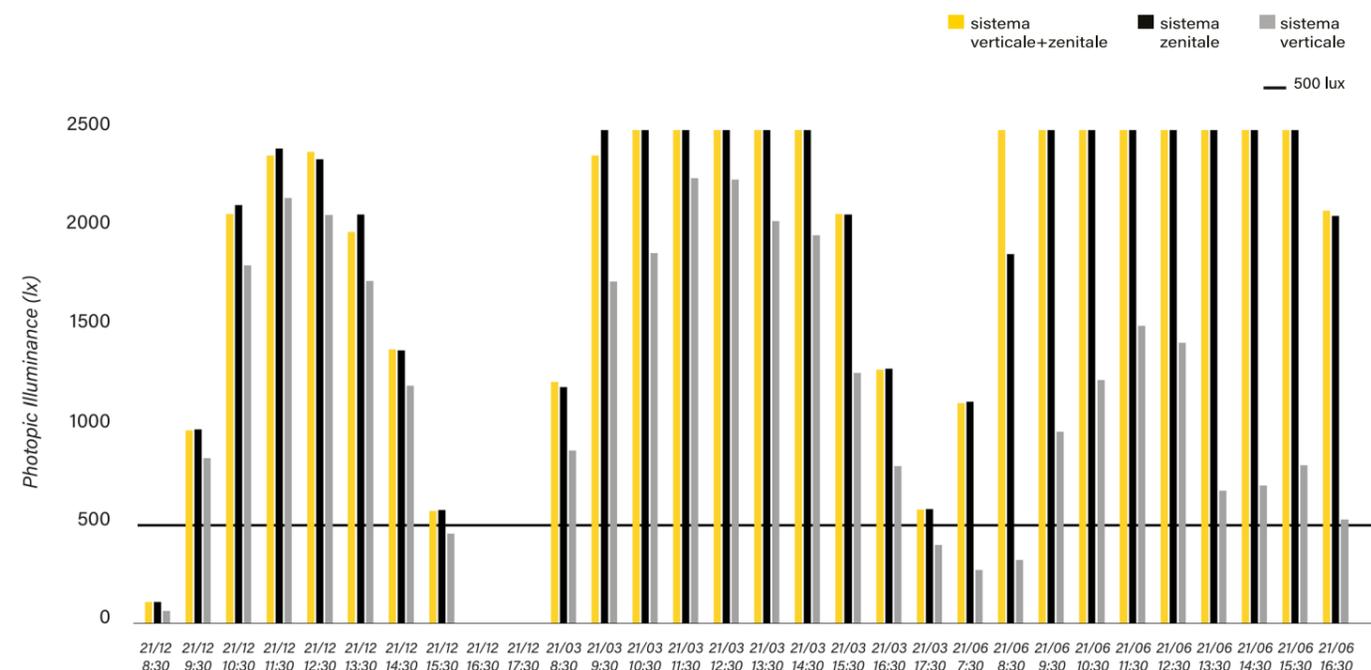
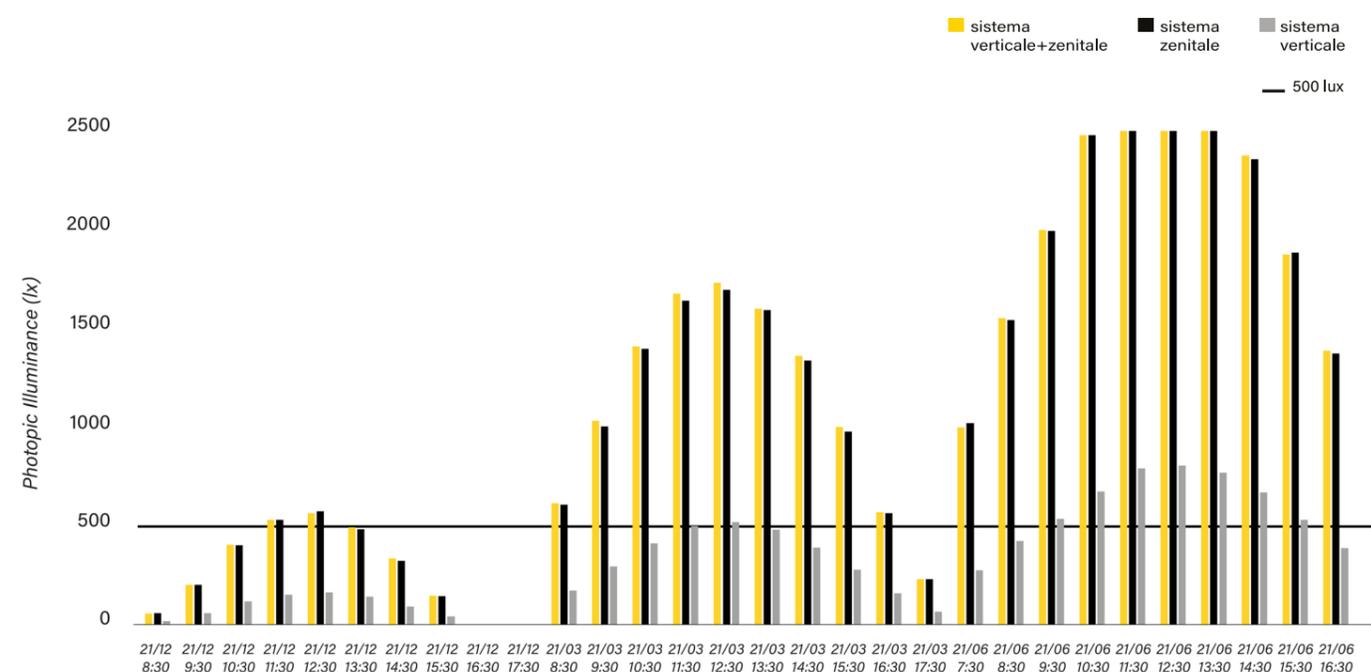


Grafico: confronto dell'illuminamento orizzontale  $E_{wp,medio}$  per i tre scenari di illuminazione nell'edificio industriale con il sistema a lucernario, in condizione di cielo coperto



# condizioni illuminazione naturale / effetti non visivi

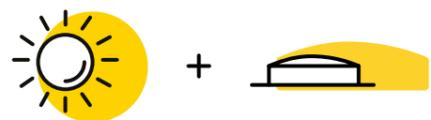


Grafico: confronto del valore  $mel-EDI_{medio}$  per i tre scenari di illuminazione nell'edificio industriale con il sistema a lucernario, in condizione di cielo sereno

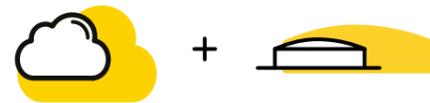
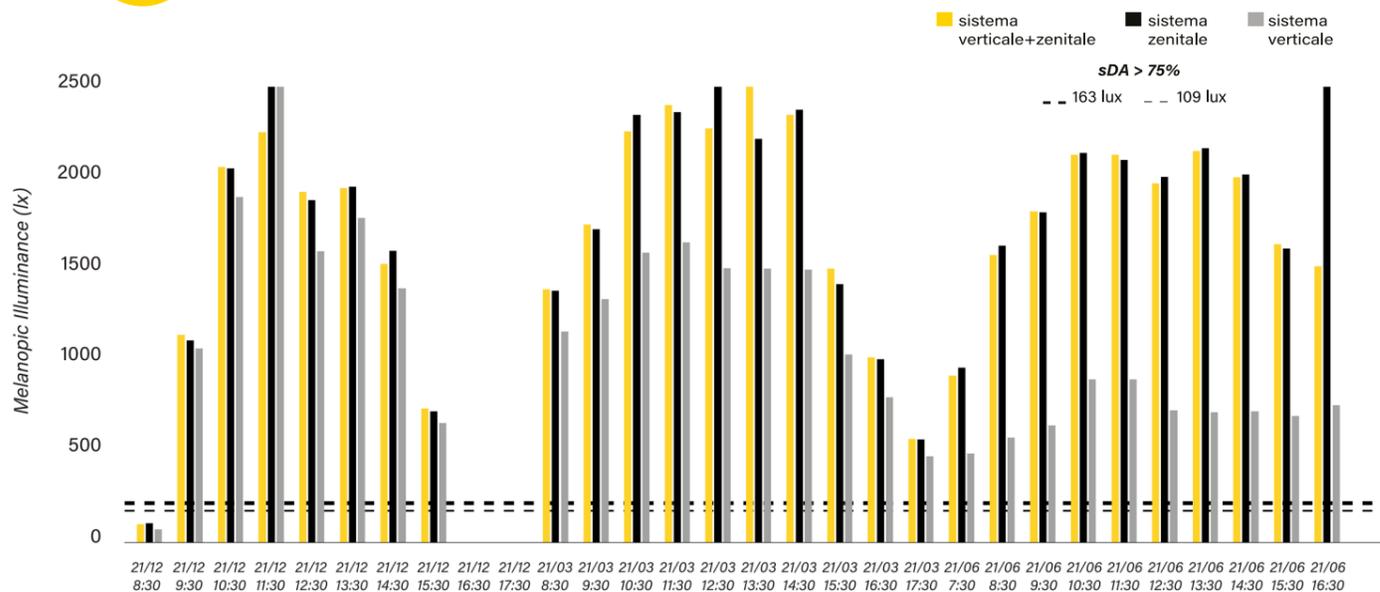
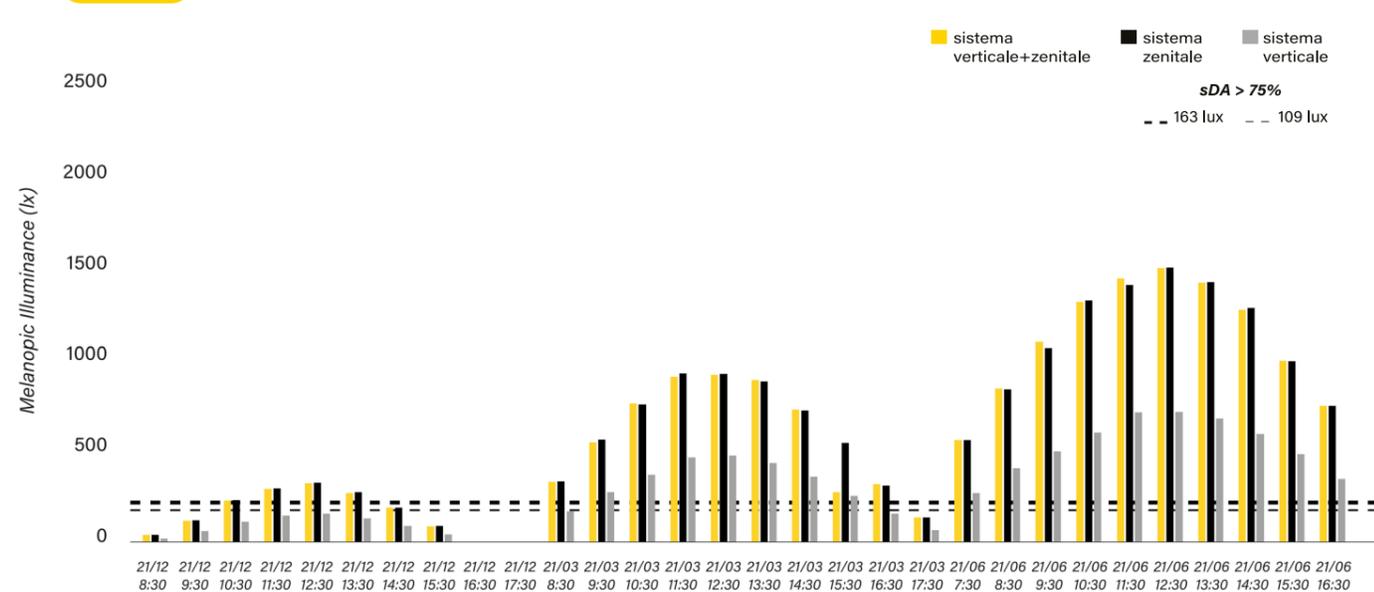


Grafico: confronto del valore  $mel-EDI_{medio}$  per i tre scenari di illuminazione nell'edificio industriale con il sistema a lucernario, in condizione di cielo coperto



GIORNO	TEMPO	SISTEMA DI ILLUMINAZIONE NATURALE		
		VERTICALE + ZENITALE	ZENITALE	VERTICALE
21 dicembre	08:30	26%	26%	19%
	09:30	91%	89%	71%
	10:30	100%	99%	79%
	11:30	100%	100%	81%
	12:30	100%	100%	82%
	13:30	100%	100%	81%
	14:30	99%	99%	79%
	15:30	88%	88%	64%
	16:30	0%	0%	0%
21 marzo	08:30	100%	100%	69%
	09:30	100%	100%	74%
	10:30	100%	100%	80%
	11:30	100%	100%	81%
	12:30	100%	100%	82%
	13:30	100%	100%	80%
	14:30	100%	100%	81%
	15:30	100%	100%	79%
	16:30	100%	100%	76%
21 giugno	07:30	100%	100%	69%
	08:30	100%	100%	70%
	09:30	100%	100%	72%
	10:30	100%	100%	78%
	11:30	100%	100%	76%
	12:30	100%	100%	75%
	13:30	100%	100%	78%
	14:30	100%	100%	77%
	15:30	100%	100%	77%
16:30	100%	100%	78%	

Tabella: percentuale di superficie in cui l'illuminamento è superiore a 109 mel-EDI [lux] per ottenere **1PT WELL**

GIORNO	TEMPO	SISTEMA DI ILLUMINAZIONE NATURALE		
		VERTICALE + ZENITALE	ZENITALE	VERTICALE
21 dicembre	08:30	4%	3%	2%
	09:30	30%	34%	13%
	10:30	90%	89%	26%
	11:30	96%	96%	30%
	12:30	97%	97%	34%
	13:30	95%	95%	29%
	14:30	78%	77%	21%
	15:30	16%	17%	9%
	16:30	0%	0%	0%
21 marzo	08:30	97%	97%	36%
	09:30	100%	100%	49%
	10:30	100%	100%	58%
	11:30	100%	100%	63%
	12:30	100%	100%	64%
	13:30	100%	100%	63%
	14:30	100%	100%	57%
	15:30	100%	100%	46%
	16:30	97%	97%	33%
21 giugno	07:30	100%	100%	49%
	08:30	100%	100%	62%
	09:30	100%	100%	66%
	10:30	100%	100%	69%
	11:30	100%	100%	73%
	12:30	100%	100%	75%
	13:30	100%	100%	74%
	14:30	100%	100%	70%
	15:30	100%	100%	66%
16:30	100%	100%	55%	

Tabella: percentuale di superficie in cui l'illuminamento è superiore a 109 mel-EDI [lux] per ottenere **1PT WELL**

GIORNO	TEMPO	SISTEMA DI ILLUMINAZIONE NATURALE		
		VERTICALE + ZENITALE	ZENITALE	VERTICALE
21 dicembre	08:30	16%	16%	12%
	09:30	78%	77%	64%
	10:30	94%	94%	71%
	11:30	98%	98%	72%
	12:30	98%	99%	69%
	13:30	98%	98%	74%
	14:30	92%	91%	73%
	15:30	70%	71%	52%
	16:30	0%	0%	0%
21 marzo	08:30	96%	96%	60%
	09:30	99%	99%	66%
	10:30	100%	100%	69%
	11:30	100%	100%	72%
	12:30	100%	100%	71%
	13:30	100%	100%	71%
	14:30	100%	100%	72%
	15:30	100%	100%	72%
	16:30	99%	99%	70%
21 giugno	07:30	81%	81%	57%
	08:30	98%	98%	60%
	09:30	100%	100%	62%
	10:30	100%	100%	67%
	11:30	100%	100%	66%
	12:30	100%	100%	65%
	13:30	100%	100%	68%
	14:30	100%	100%	68%
	15:30	100%	100%	69%
16:30	100%	100%	70%	

Tabella: percentuale di superficie in cui l'illuminamento è superiore a 163 mel-EDI [lux] per ottenere **3PT WELL**

GIORNO	TEMPO	SISTEMA DI ILLUMINAZIONE NATURALE		
		VERTICALE + ZENITALE	ZENITALE	VERTICALE
21 dicembre	08:30	2%	1%	1%
	09:30	13%	14%	9%
	10:30	57%	58%	18%
	11:30	80%	80%	22%
	12:30	86%	86%	25%
	13:30	74%	74%	21%
	14:30	39%	38%	14%
	15:30	8%	8%	5%
	16:30	0%	0%	0%
21 marzo	07:30	0%	0%	0%
	08:30	89%	86%	25%
	09:30	98%	98%	36%
	10:30	100%	100%	46%
	11:30	100%	100%	53%
	12:30	100%	100%	55%
	13:30	100%	100%	52%
	14:30	100%	100%	46%
	15:30	98%	98%	35%
21 giugno	07:30	18%	19%	10%
	08:30	100%	100%	50%
	09:30	100%	100%	54%
	10:30	100%	100%	58%
	11:30	100%	100%	63%
	12:30	100%	100%	65%
	13:30	100%	100%	63%
	14:30	100%	100%	61%
	15:30	100%	100%	56%
16:30	100%	100%	42%	

Tabella: percentuale di superficie in cui l'illuminamento è superiore a 163 mel-EDI [lux] per ottenere **3PT WELL**

## Prime conclusioni sul sistema a lucernario/

Dall'analisi del capannone industriale, con il sistema zenitale a lucernario, relativo all'illuminamento melanopico al livello dell'occhio con il valore mel-EDI<sub>medio</sub> in condizioni di cielo sereno e cielo coperto, viene fatta un'ulteriore verifica del contributo dei sistemi di illuminazione attraverso il sistema di punteggio in riferimento al protocollo WELL per tutti e tre i giorni e nelle due condizioni di cielo, che tiene in conto il 100% della superficie del capannone. Anche se nei requisiti del protocollo WELL questa verifica deve tener conto di tutti i giorni dell'anno, nel nostro caso vengono considerati tre giorni (il solstizio d'estate, il solstizio d'inverno e l'equinozio di primavera) che presentano condizioni di illuminamento estremamente diverse per un migliore confronto sul contributo del sistema di illuminazione zenitale rispetto a quello verticale.

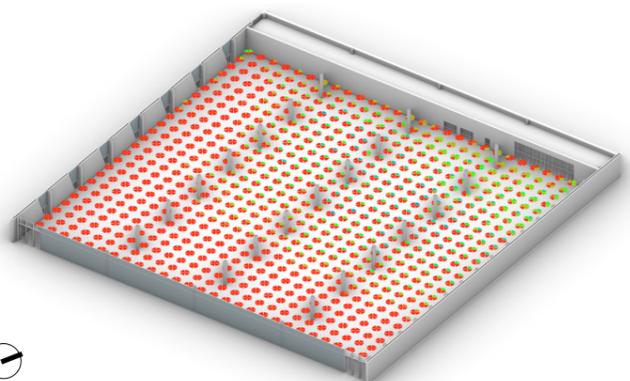
Questa verifica viene riassunta in due grafici dove viene evidenziato il funzionamento del sistema di conteggio:

Si ottiene 1 punto se si verifica il raggiungimento di un valore minimo di 109 mel-EDI per almeno 4 ore della giornata in tutte le condizioni di cielo con una media  $sDA_{300,50\%} > 75\%$  della superficie occupata.

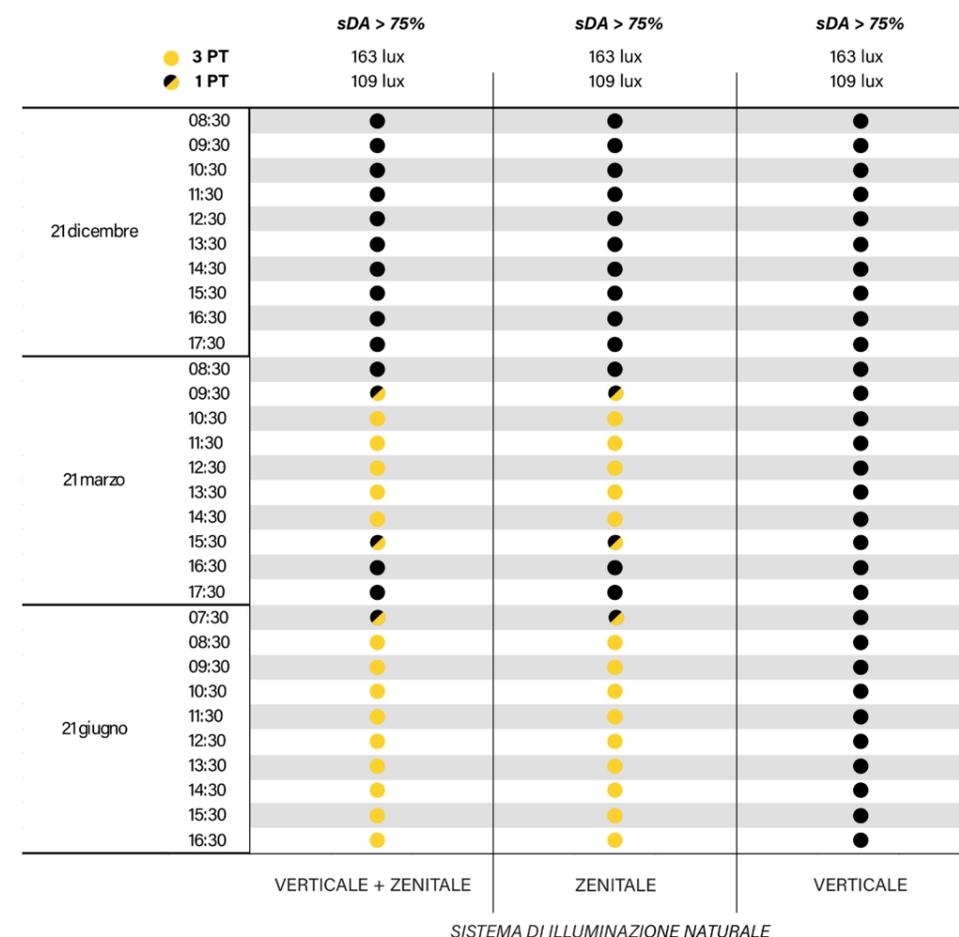
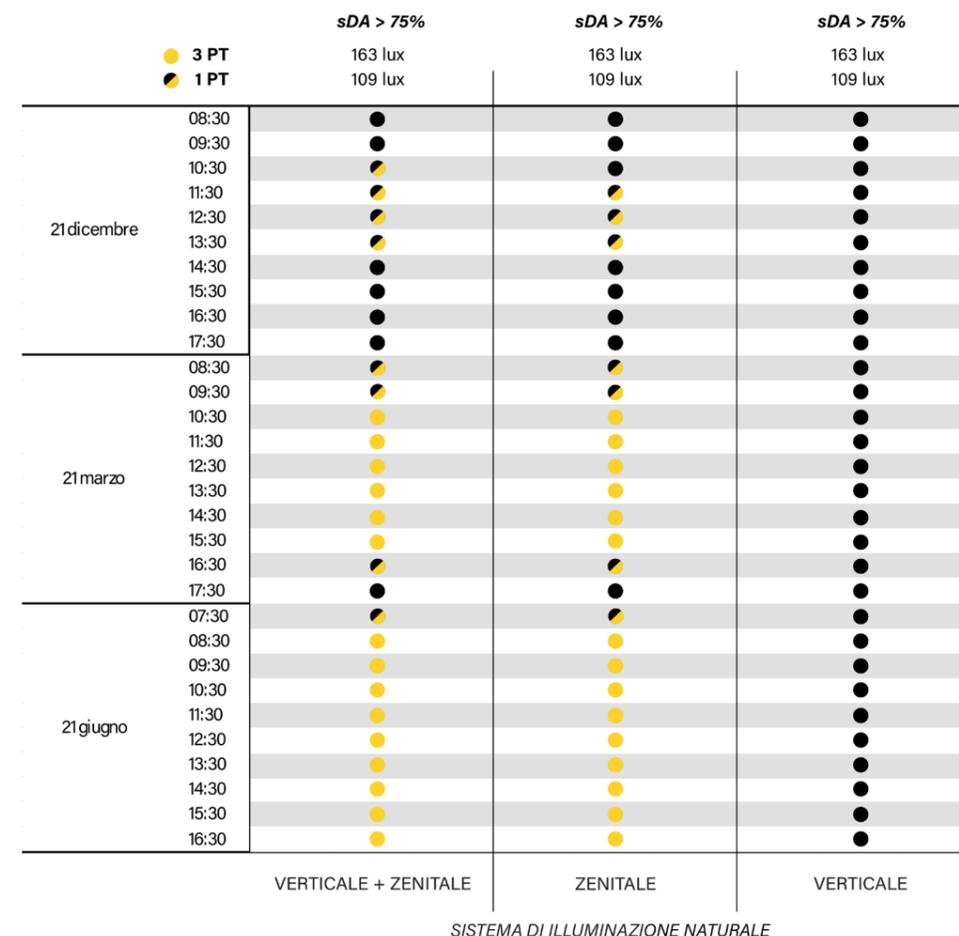
Si ottiene 3 punti se si verifica il raggiungimento di un valore minimo di 163 mel-EDI per almeno 4 ore della giornata in tutte le condizioni di cielo con una media  $sDA_{300,50\%} > 75\%$  della superficie occupata della superficie occupata.

Dal primo grafico, si può notare che, in condizione di cielo sereno, l'edificio complessivo, che tiene conto sia del sistema zenitale che verticale, soddisfa i requisiti necessari per ottenere 1PT nei tre giorni considerati, per almeno 4 ore al giorno. Mentre nel periodo di marzo e giugno, l'edificio ottiene anche 3PT. Il contributo maggiore che permette all'edificio di soddisfare i requisiti è dato dal sistema zenitale a lucernario, rispetto a quello verticale. Questo è dovuto al fatto che le componenti vetrate verticali sono presenti solo su due pareti dell'edificio, a differenza del sistema zenitale che copre una maggiore superficie, il che non permette una distribuzione uniforme della luce su tutta la superficie occupata. Di conseguenza, la percentuale di superficie dove l'illuminamento è superiore al requisito mel-EDI non raggiunge mai il 100%, come evidenziato nelle tabelle della pagina precedente e l'immagine sottostante, e quindi non viene assegnato alcun punto.

Dal secondo grafico si evidenzia che, in condizioni di cielo coperto, l'edificio complessivo non ottiene nessun punto perché nel mese di dicembre non vengono soddisfatti nessuno dei requisiti, nel periodo di marzo e giugno però il capannone prende almeno 3PT. Anche in questo caso si può notare che il contributo maggiore rispetto a quello complessivo dell'edificio è fornito dal sistema zenitale.



Risultato mel-EDI / scenario sistema a lucernario, 21marzo, 12:30, cielo sereno



Risultati condizioni di illuminazione - capannone a lucernario con vetro diffondente

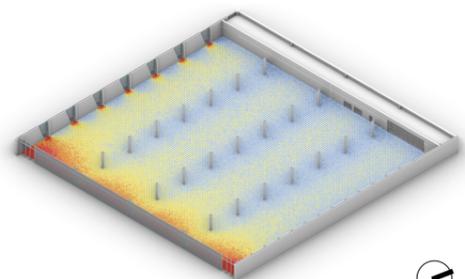
### SCENARIO 1

sistema di illuminazione / verticale e zenitale

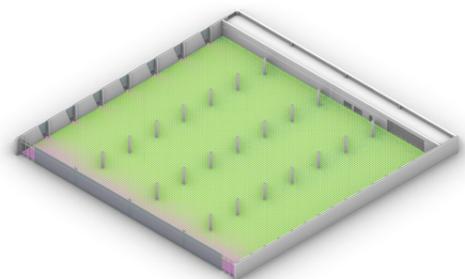
Nel caso del capannone a lucernario, l'analisi è iniziata con un sistema vetrato trasparente con una trasmissione luminosa del 60%. I risultati delle condizioni di illuminazione relative allo scenario 1 hanno mostrato che la percentuale di superficie del pavimento regolarmente occupata illuminata dalla luce diurna ha raggiunto un sDA del 100%, il valore massimo possibile. Inoltre, la componente zenitale ha dato il contributo maggiore rispetto alla componente verticale, come evidenziato dal fattore di luce diurna medio  $DF_m$  del 3.30% contro il 3.90% complessivo dell'edificio. Tuttavia, sono emersi problemi significativi, evidenziati dall'ASE che ha superato la soglia critica del 10% e dal DGP, che ha rilevato che il 48% dell'area del pavimento regolarmente occupata è soggetta a un abbagliamento fastidioso o intollerabile ( $DGP > 38\%$ ) per almeno il 5% del tempo di occupazione. Ciò indica una criticità in termini di abbagliamento, che potrebbe anche suggerire, sebbene non analizzato nel dettaglio, un potenziale rischio di surriscaldamento significativo.

Per affrontare questo problema, è stata presa la decisione di effettuare un'analisi considerando il solo contributo complessivo del capannone, che tiene conto sia del sistema zenitale che verticale. Si è optato per l'uso di un sistema zenitale diffondente, anziché trasparente, al fine di valutare le variazioni nei risultati. Per questa analisi, è stato scelto un vetro diffondente con una trasmissione luminosa ridotta al 30% per il lucernario.

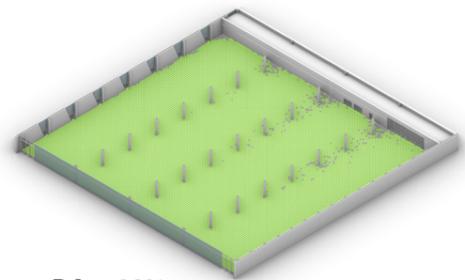
I risultati ottenuti evidenziano che l'uso di un componente diffondente nel sistema zenitale ha portato a una riduzione significativa del Fattore di luce diurna medio ( $DF_m$ ), che è passato dal 3.90% all'1.90%. Tuttavia, il valore del sDA ha mostrato una perdita minima, scendendo solo dal 100% al 96%. Per quanto riguarda il problema



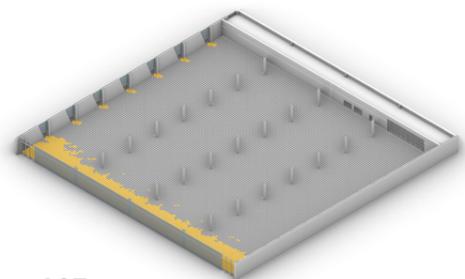
DF 1.90%



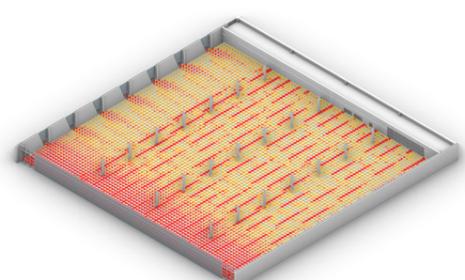
UDI 65%



sDA 96%



ASE 11%



sDG 24%

Grafico: illuminazione orizzontale  $E_{wp,medio}$  per il scenario1 con lucernario con vetro diffondente, in condizione di cielo sereno e cielo coperto

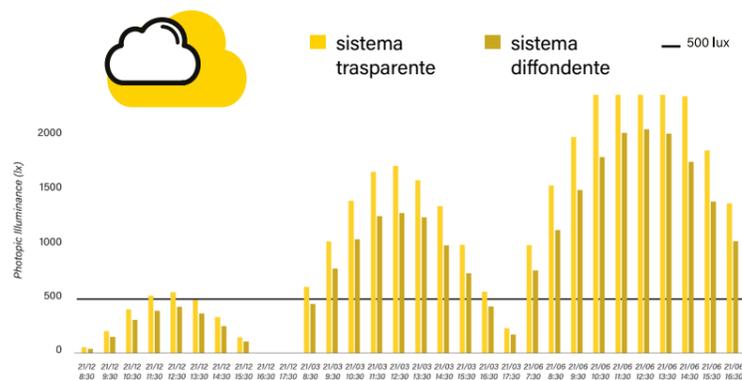
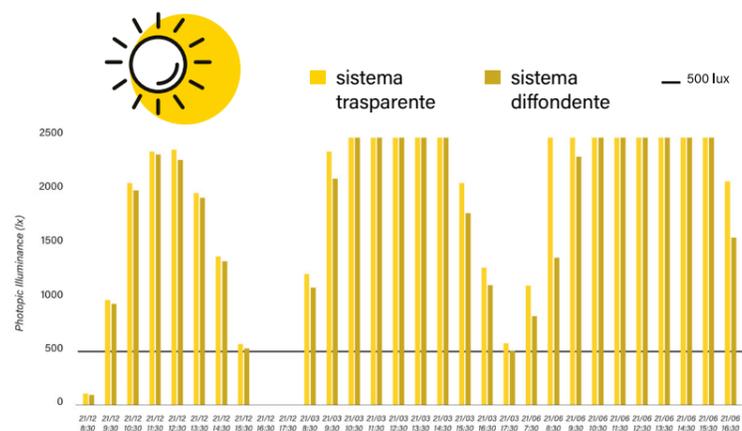
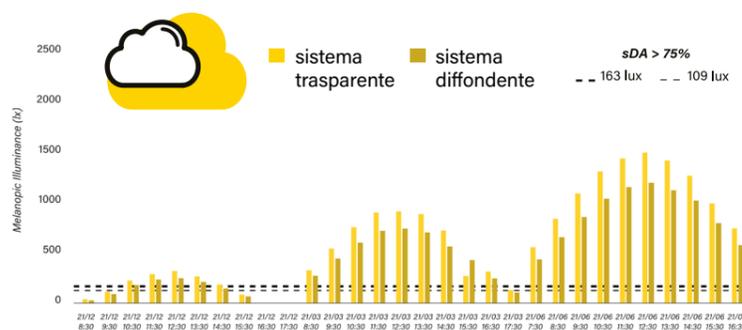
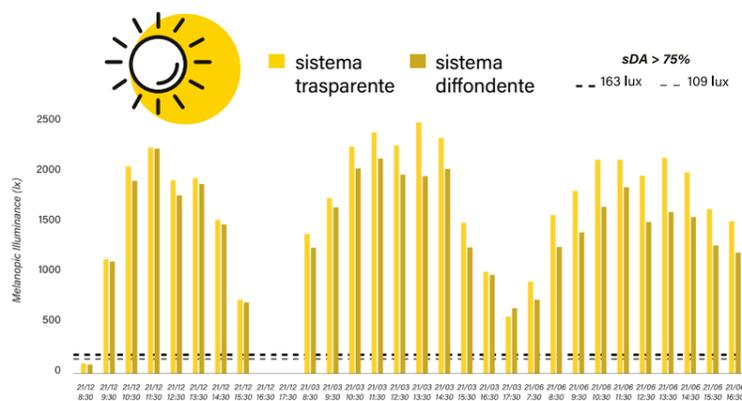


Grafico: valore mel-EDI<sub>medio</sub> per il scenario1 con lucernario con vetro diffondente, in condizione di cielo sereno e cielo coperto



più critico, ovvero l'abbagliamento, l'ASE è rimasto quasi invariato, suggerendo che il contributo all'abbagliamento proviene principalmente dal sistema verticale. Al contrario, il valore del DGP ha subito una riduzione marcata, con il sDG che è sceso al 24%, rispetto al precedente 48% con il vetro trasparente.

Un ulteriore aspetto analizzato riguarda le condizioni di illuminazione orizzontale sul piano di lavoro e il contributo melanopico della luce nei tre scenari ipotizzati, considerando sia cielo sereno che coperto nei giorni di riferimento. I grafici qui riportati, che confrontano i risultati ottenuti con il lucernario trasparente rispetto a quello diffondente, evidenziano una riduzione dei valori medi sia dell'illuminazione orizzontale sul piano di lavoro, sia di quello verticale all'altezza degli occhi, specialmente nei periodi di marzo e giugno. Tuttavia, i livelli di mel-EDI restano per lo più superiori alla soglia minima richiesta dal protocollo WELL, sia in condizioni di cielo sereno che coperto.

In sintesi, l'analisi dei risultati basati su metriche di valutazione della disponibilità di luce, come sDA, ASE, DGP, e quelle relative al contributo fotopico e melanopico della luce naturale, indica che l'impiego di un vetro trasparente favorisce un maggiore ingresso di luce solare diretta nel capannone, ma aumenta anche il rischio di abbagliamento. Al contrario, l'adozione di vetro diffondente permette di mitigare questi rischi, mantenendo comunque un adeguato livello di illuminazione necessario per le attività svolte. Questo approccio contribuisce a migliorare il comfort visivo e non visivo degli occupanti.

Il lavoro di questa tesi è stato di valutare il tema di illuminazione naturale attraverso i sistemi zenitali, e verificare quali possono essere le condizioni di comfort, benessere e effetti non visivi della luce se si utilizzano dei sistemi zenitali, in confronto a un sistema tradizionale verticale.

Questa valutazione è stata svolta in un contesto di analisi simulativo per determinare le prestazioni dei sistemi di illuminazione zenitali rispetto a un insieme più ampio di esigenze, sia di carattere visivo che non visivo. L'analisi della luce naturale è stata effettuata mediante una serie di simulazioni su due casi studio: un edificio scolastico e uno industriale, caratterizzati da due tipologie distinte di sistemi zenitali. Questa analisi comparativa è stata sviluppata attraverso l'uso di software come ClimateStudio e ALFA, che consentono di quantificare il contributo fotopico e melanopico della luce naturale negli edifici. Lo studio relativo alle grandezze melanopiche ha preso in considerazione tre giorni chiave che caratterizzano due condizioni estreme durante l'anno e una intermedia (solstizio d'estate, solstizio d'inverno ed equinozio di primavera) sotto due condizioni di cielo, sereno e coperto, mentre lo studio relativo alle grandezze fotopiche è stato fatto su base annua.

Per valutare le prestazioni di questi sistemi zenitali è stato necessario fare riferimento a requisiti specifici legati alla luce naturale. Questi requisiti comprendono:

- la determinazione della disponibilità di luce diurna attraverso diverse metriche che misurano la distribuzione dell'illuminamento all'interno degli spazi durante tutto l'anno, valutando se la luce diurna è adeguata per consentire lo svolgimento di attività lavorative negli edifici. Tra cui il requisito del Fattore di luce diurna  $DF_m$  (secondo i Decreti Ministeriali Italiani), lo Spatial Daylight Autonomy sDA che considera accettabile se  $sDA > 55\%$  e ottimale  $sDA > 75\%$  (in riferimento al protocollo LEED), o ancora l'Annual Sunlight Exposure ASE che non deve superare la soglia del 10% per evitare rischi di abbagliamento.

- l'illuminamento orizzontale medio  $E_m$  sul piano di lavoro deve soddisfare il requisito di 300 lux nel caso scolastico e 500 lux nel caso industriale

in conformità con la norma UNI EN 12464-1.

- per l'illuminamento melanopico sul piano verticale all'altezza degli occhi mel-EDI, il protocollo WELL v2 "*Feature L03-Circadian Lighting Design*" attribuisce 1 o 3 punti se il mel-EDI supera una certa soglia per almeno 4 ore al giorno, a seconda se la media  $sDA_{300,50\%}$  viene raggiunta per almeno 75% della superficie occupata.

A valle dei risultati ottenuti dalle varie simulazioni è possibile effettuare una prima valutazione sulle condizioni di illuminazione nei due casi studio, considerando il ruolo del sistema zenitale rispetto a quello verticale nel contesto complessivo dell'edificio. I due casi analizzati si presentano in condizioni estremamente diverse, perciò saranno valutati uno alla volta.

### Caso scolastico

L'edificio scolastico considerato è dotato di un sistema zenitale orizzontale, caratterizzato da una superficie trasparente relativamente piccola rispetto alla superficie totale utile (con un rapporto del 0.02), e di un sistema verticale con una superficie vetrata più ampia (con un rapporto del 0.26). La condizione dello scenario 1, che corrisponde a come è stato progettato l'edificio, risponde ai requisiti per la disponibilità di luce naturale durante tutto l'anno, garantendo un'illuminazione adeguata per lo svolgimento delle attività visive all'interno delle aule, come indicato dai seguenti risultati ottenuti: un  $DF_m > 2\%$  nel caso di tutte le aule in assenza di sistema schermante (e inferiore al 2% in sua presenza), un  $sDA_{300,50\%} > 75\%$  ottimale per tutte le aule (sia in presenza che in assenza di sistema schermante) tranne per le aule C2 e C3 che, con un orientamento nord-ovest sono meno esposte alla luce solare diretta, presentano un  $sDA_{300,50\%} > 40\%$  sufficiente, e infine, un  $ASE < 10\%$  in tutte le condizioni per tutte le nove aule esaminate. Per quanto riguarda l'aspetto fotopico della luce naturale, analizzato nelle rispettive aule C2, C5 e C8, si può dire che il contributo zenitale è maggiore rispetto a quello verticale, principalmente per le tre aule sia in condizioni di cielo coperto per i tre giorni di riferimento sia nel periodo di giugno in condizione di cielo se-

reno. Sull'aspetto melanopico della luce naturale invece, il sistema verticale contribuisce a più del 70% dell'illuminamento sul piano verticale dell'occhio, principalmente nelle rispettive aule C5 e C8 con orientamento sud-ovest e sud in condizione di cielo sereno. Si può dunque considerare che il contributo del sistema zenitale nell'apporto di luce solare diretta all'interno delle aule risulta limitato, a causa della ridotta dimensione della superficie vetrata orizzontale in rapporto alla superficie totale occupata.

### Caso industriale

L'edificio industriale considerato è dotato di un sistema verticale con grandi superfici vetrate trasparenti e opache (con un rapporto del 0.14), e di un sistema zenitale sulla copertura: nel primo caso si tratta di un sistema verticale a shed (con un rapporto del 0.22) e nel secondo caso si tratta di sistema orizzontale a lucernario (con un rapporto del 0.08).

Nel caso del sistema a shed, la condizione dello scenario 1 risponde in parte ai requisiti per la disponibilità di luce naturale durante tutto l'anno per lo svolgimento delle attività visive nel capannone, come indicato dai seguenti risultati ottenuti: un  $DF_m$  pari al **2.20%**, un  $sDA_{300,50\%} > 55\%$  accettabile, e infine, un  $ASE < 10\%$ . Per quanto riguarda l'aspetto fotopico della luce naturale, il sistema zenitale a shed contribuisce al 10% dell'illuminamento orizzontale sul piano di lavoro in condizione di cielo sereno, a confronto di un 60% in condizione di cielo coperto sul contributo complessivo dell'edificio. Per l'aspetto melanopico invece, il sistema zenitale a shed fornisce meno del 50% dell'illuminamento verticale dell'occhio, rispetto al sistema verticale che offre un contributo maggiore. Questo è dovuto all'orientamento a nord degli shed, il quale impedisce l'ingresso diretto della luce solare. Sebbene questo orientamento riduca il rischio di abbagliamento, comporta anche una distribuzione non uniforme della luce solare sulla superficie utile di lavoro.

Nel caso del sistema a lucernario, la condizione dello scenario 1 risponde anch'esso in parte ai requisiti per la disponibilità di luce naturale

durante tutto l'anno per lo svolgimento delle attività visive nel capannone, come indicato dai seguenti risultati ottenuti: un  $DF_m$  pari al **3.90%**, un  $sDA_{300,50\%} > 75\%$  ottimale, e infine, un **ASE > 10%** ed un alto valore di DGP che crea un ambiente con elevato rischio elevato di abbagliamento, dovuto all'utilizzo di un lucernario trasparente, tuttavia, come evidenziato dalle ultime analisi, questo problema può essere risolto adottando un lucernario diffondente. Per quanto riguarda l'aspetto fotopico della luce naturale, il sistema zenitale a lucernario garantisce più del 50% dell'illuminamento orizzontale sul piano di lavoro, rispetto al sistema verticale, sia in condizione di cielo sereno che di cielo coperto per i tre giorni presi in considerazione. Per l'aspetto melanopico invece, il sistema zenitale a lucernario contribuisce ugualmente a più del 50% dell'illuminamento verticale dell'occhio, rispetto al sistema verticale, sia in condizioni di cielo coperto che sereno. E questo si deve alla posizione orizzontale del sistema zenitale, che consente un ingresso significativo di luce solare diretta nello spazio di lavoro. Tuttavia, se non adeguatamente controllato, può comportare un rischio di disagio sia visivo che non visivo per gli occupanti.

Alla luce di questi risultati emerge il ruolo del sistema zenitale in diversi contesti architettonici, partendo dall'edificio scolastico al capannone industriale; e la sua implicazione nelle diverse tematiche legate alla luce naturale come fonte primaria, con il tema di apporto di luce, il tema di glare e quello di uniformità della luce, al fine di rispondere alle condizioni di comfort visivo e non visivo e di benessere negli spazi di lavoro. L'analisi comparativa delle prestazioni dei diversi sistemi di illuminazione zenitale, supportata dai risultati delle simulazioni, evidenzia l'importanza di questi sistemi nell'illuminazione dei piani di lavoro e nell'illuminazione circadiana, in confronto al contributo dei sistemi verticali. Approfondire ulteriormente le prestazioni dei sistemi zenitali, considerando le diverse soluzioni disponibili, risulterebbe essenziale per garantire condizioni di illuminazione ottimali che migliorino la produttività, il comfort e il benessere negli ambienti di lavoro.

# bibliografia & sitografia

[1] Houser KW. and Esposito T., *Human-Centric Lighting: Foundational Considerations and a Five-Step Design Process*, 2021, *Front. Neurol.* 12:630553. doi: 10.3389/fneur.2021.630553

[2] Isabella Turati, *Analisi di illuminazione circadiana in aule del Politecnico di Torino. Risultati sperimentali e simulativi = Analysis of circadian lighting in classrooms of the Politecnico di Torino. Experimental and simulation results*, 2023.

[3] Pietro Palladino, Cesare Coppedè, *La luce in Architettura, Guida alla progettazione*, Sant'Arcangelo di Romagna, Maggioli Editore, Ottobre 2012.

[4] Matteo Cresto, *Human-centric lighting. Luce per la salute, il benessere e la produttività delle persone. Dalla teoria alla sua applicazione = Human centric lighting. Light as a support to health, wellbeing and productivity of people. From theory to application*, 2023.

[5] William M.C. LAM, *Perception and lighting as formgivers for architecture*, McGraw-Hill, New York, 1977

[6] Kort, de, Y. A. W., & Veitch, J. A., 2014, *From blind spot into the spotlight. Journal of Environmental Psychology*, 39, 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2014.06.005>

[7] Leontina Sassi, *Appunti di Gestalt. Il tutto è più della somma delle parti*, Collana: Leader morbidi e crea-attivi, 2019.

[8] Gabriella Giudici, *La percezione: storia e analisi del processo cognitivo*, 2020. <https://gabriellagiudici.it/la-percezione-elementi-di-storia-della-psicologia-e-di-analisi-del-processo-cognitivo/>

[9] <https://www.delmarfans.com/educate/correlated-color-temperature-kelvin-application-in-home-decor>

[10] Niko Gentile, Marie-Claude Dubois, B1-Daylight for Humans, *Visual Comfort*, 2022, Nlited.

[11] Maddalena Martina, *La verifica delle condizioni di illuminamento in ambienti confinati: approcci semplificati vs. approcci avanzati = The verification of illuminance conditions in confined spaces: simplified approaches vs. advanced approaches*, 2020.

[12] Juan Manuel Monteoliva, Julieta A. Yamín Garretón, Andrea E. Pattini, *Comparative Investigation of Daylight Glare Probability (DGP) Comfort Classes in Clear Sky Condition*, *Journal of Daylighting* 8, 2021, 284-293. <https://dx.doi.org/10.15627/jd.2021.22>

[13] F. Abd-Alhamid, M. Kent, Y. Wu, *Evaluating the impact of viewing location on view perception using a virtual environment Build. Environ.*, 2020.

[14] Jo, H., Song, C., & Miyazaki, Y., 2019, *Physiological Benefits of Viewing Nature: A Systematic Review of Indoor Experiments*, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(23), 4739.

[15] View and visual interest, Stein R. Building (Ed.), *Daylighting Handbook II. Daylight Simulations. Dynamic Facades*, vol. 2, Technology Press, Cambridge MA (2018), pp. 146-157.

[16] Giulio Camiz, B2-Daylight culture and design, *Daylight provision in building*, 2022, Nlited.

[17] Boyce, P., and M. Rea., *Lighting and human performance II: Beyond visibility models toward a unified human factors approach to performance*. Palo Alto, CA. ERPI, 2001

[18] Niko Gentile, B1-Daylight for Humans, *Benefits of daylight*, 2022, Nlited.

[19] CIE, Commissione Internazionale de l'Eclairage, *"CIE S 017:2020 ILV: International Lighting Vocabulary, 2nd edition"*, 2020.

[20] D. Iatauro, B. Mattoni, A. Mangione, F. Bisegna, M. Zinzi, *Analisi critica per l'individuazione di correlazioni tra il Fattore di luce Diurna e le condi-*

*zioni di cielo*, ENEA, 2016.

[21] Wienold, J., 2009, *Dynamic Daylight Glare Evaluation*. Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, 27-30 July 2009, 944-951.

[22] Russel Foster, *"The Vital Daylight"* documentary, 2021. <https://www.daylightandarchitecture.com/the-vital-daylight/>

[23] Laura Bellia, Alessia Pedace, Giuseppe Barbato, *Effetti visivi e non visivi della luce naturale e artificiale*, 2013.

[24] Lucas, R. J., Peirson, S. N., Berson, D. M., Brown, T. M., Cooper, H. M., Czeisler, C. A., Figueiro, M. G., Gamlin, P. D., Lockley, S. W., O'Hagan, J. B., Price, L. L. A., Provencio, I., Skene, D. J., & Brainard, G. C., 2014, *Measuring and using light in the melanopsin age*. *Trends in Neurosciences*, 37(1), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2013.10.004>

[25] Veitch J.A., Galasiu, A.D. *The physiological and psychological effects of windows, daylight, and view at home: Review and research agenda*. Ottawa, ON: NRC Institute for Research in Construction, 2012.

[26] Gkouvelou, E., Moskoveli, D., & Khanie, M. S., 2023, *Non-visual daylight potential in offices: a parametric study*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1196(1), Article 012081. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1196/1/012081>

[27] Blume, C., Garbazza, C., & Spitschan, M., 2019, *Effects of light on human circadian rhythms, sleep and mood*. *Somnologie*, 23(3), 147-156. <https://doi.org/10.1007/s11818-019-00215-x>

[28] Anna Wirz-Justice, Debra J. Skene, Mirjam Münch, *The relevance of daylight for humans*, *Biochemical Pharmacology*, 191(3):114304, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.bcp.2020.114304>

[29] M. Boubekri, I. N. Cheung, K. J. Reid, C.-H. Wang, and P. C. Zee, *"Impact of windows and*

daylight exposure on overall health and sleep quality of office workers: a case-control pilot study," Journal of clinical sleep medicine: JCSM: official publication of the American Academy of Sleep Medicine, 2014.

<http://dx.doi.org/10.5664/jcsm.3780>

[30] Giulia Sodano, *Luce e Sostenibilità ambientale : aspetti tecnici e normativi*, EnergyMed 13e edizione, 2022. [https://www.energymed.it/conviniz/atti2022/Giulia\\_Sodano.pdf](https://www.energymed.it/conviniz/atti2022/Giulia_Sodano.pdf)

[31] Mariana G. Figueiro, Kassandra Gonzales, and David Pedler, 2016, "Designing with Circadian Stimulus." LD+A, October. pp. 31-34.

[32] Brown, T. M., Brainard, G. C., Cajochen, C., Czeisler, C. A., Hanifin, J. P., Lockley, S. W., Lucas, R. J., Münch, M., O'Hagan, J. B., Peirson, S. N., Price, L. L. A., Roenneberg, T., Schlangen, L. J. M., Skene, D. J., Spitschan, M., Vetter, C., Zee, P. C., & Wright, K. P., 2022, *Recommendations for daytime, evening, and nighttime indoor light exposure to best support physiology, sleep, and wakefulness in healthy adults*. PLoS Biology, 20(3), Article e3001571. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001571>

[33] CEN, Comité Européen de Normalisation, European Standard EN 12464-1:2021, *Luce e illuminazione - Illuminazione dei posti di lavoro - Parte 1: Posti di lavoro in interni*, 2021.

[34] CEN, Comité Européen de Normalisation, European Standard EN 17037:2018, *Luce diurna negli edifici*, 2018.

[35] CEN, Comité Européen de Normalisation, European Standard EN 15193-1:2018, *Prestazione energetica degli edifici-Requisiti energetici per illuminazione-Parte 1: Specificazioni*, M9, 2018.

[36] CEN, Comité Européen de Normalisation, European Standard EN 11630:2016, *Luce e illuminazione - Criteri per la stesura del progetto illuminotecnico*, 2016.

[37] Criteri Ambientali Minimi (CAM), parte 2.3.7 Gazzetta Ufficiale, serie generale n° 259 del 6 ottobre 2017.

[38] ITACA, Istituto per l'Innovazione e Trasparenza degli Appalti e la Compatibilità Ambientale, Sostenibilità ambientale nelle costruzioni - *Strumenti operativi per la valutazione della sostenibilità - Edifici non residenziali*, UNI/PdR 13.2:2019.

[39] LEED, Leadership in Energy and Environmental Design, *v4.1 Building Design and Construction*, US Green Building Council, 2020.

[40] WELL Building Standard, *WELL v2 Q1-Q2*, International WELL Building Institute, 2023.

[41] Mottura Giovanna, Pennisi Alessandra, *Progetti di luce-Luce naturale e luci artificiali in ambienti interni ed esterni*, edizioni Maggioli Editore collana Ambiente territorio edilizia urbanistica , 2010.

[42] Giulio Camiz, *Zenit: Progettare con la luce naturale*, Tecniche Nuove, 2023.

[43] Elías Torres, *Zenithal light*, Distributed Art Pub., Barcelona, 2006.

[44] VELUX Daylight, *Energy and Indoor Climate Basic Book*, Version 3.0, 2014

[45] Lamilux skylights, roofs of light. <https://www.lamilux.com/skylights.html>

[46] Mark Karlen, James R. Benya, Christina Spangler, *Lighting Design Basics*, 2nd edition, Wiley, 2012.

[47] Marietta Millet, "Light and Materials", Daylight & Architecture #3, 2006.

[48] Bagdonas, V.; Daukšys, M.; Mockiene, J. *The Selection of Skylight Type for a Certain Building Using Evaluation Criteria and the Multi-Criteria Decision-Making Method*. Buildings 2022, 12, 2058. <https://doi.org/10.3390/buildings12122058>

[49] Valerio R.M. Lo Verso, Alessandra Reggiani, B2-Daylight culture and design, *Materials for luminous environment*, 2022, Nlited.

[50] Hui Xiao, Huiling Cai, Xuefeng Li, *Non-visual effects of indoor light environment on humans: A review*, 2020. doi: 10.1016/j.physbeh.2020.113195

[51] Claudia Bin, *The Natural Light and the Daylight Factor in a Non-Residential Building-Case Study of the Classroom of an Educational Center*, 2019.

[52] Sacht, H.M.; Bragança, L.; Almeida, M.; Caram, R. *Specification of Glazings for Façades Based on Spectrophotometric Characterization of Transmittance*. Sustainability 2021, 13, 5437. <https://doi.org/10.3390/su13105437>

[53] VELUX Skylight, *Advanced Glazing Technologies for Glass*. <https://commercial.veluxusa.com/products/metal-framed/advanced-glazing>

[54] Produttori di materie polimeriche: Lanzaomma, Kalwall, VELUX.

[55] Caroline Louise Paradise, *Daylight and glazing specification: The impact on non-visual processes*, 2014.

[56] Wang, D., Lu, L., Zhang, W., *Overall Energy Performance Assessment of a New Heat Blocking Coating*, J. sustain. dev. energy water environ. syst., (7)1, pp 1-12, 2019, DOI: <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d6.0224>

[57] Measurement of Optical Characteristic of Plastic by UH4150 Spectrophotometer; [https://www.hitachi-hightech.com/products/images/8414/uh4150\\_data1\\_e.pdf](https://www.hitachi-hightech.com/products/images/8414/uh4150_data1_e.pdf).

[58] <https://www.renierarchitetto.com/riqualificazione-energetica/it/servizi/calcoli-fisica-tecnica/schermature-solari.html>

[59] Serena Castelli, *Schermature solari e architettura - Analisi qualitative e quantitativa del loro*

utilizzo, 2015.

[60] Ceccherini Nelli L., *Schermature solari*, Firenze, Alinea editrice, 2007

[61] ES-SO, *Solar shading for low energy and healthy buildings*, Edition 2, February 2018

[62] CEN, Comité Européen de Normalisation, European Standard EN 14501, *Blinds and Shutters – Thermal and Visual Comfort – Performance Characteristics and Classification*, European Committee for Standardization, 2005.

[63] Solemma - ClimateStudio software, user guide. <https://climatestudiodocs.com/index.html>

[64] Solemma - ALFA software, user guide. <https://www.solemma.com/alfa>

[65] EUROLUX Guideline "Daylighting by rooflights", 2017. [https://www.eurolux-eu.com/wp-content/uploads/2020/04/2018\\_06\\_11\\_eurolux\\_guideline\\_daylighting\\_final-002.pdf](https://www.eurolux-eu.com/wp-content/uploads/2020/04/2018_06_11_eurolux_guideline_daylighting_final-002.pdf)

#### **DISPOSITIVI SCHERMANTI / Reference**

[a] Ceccherini Nelli L., *Schermature solari*, Firenze, Alinea editrice, 2007, p46.

[b] <https://www.frangisoleorientabile.it/frangisole-orientabile-alluminio/light-shelf-daylight-illuminazione-naturale/>

[c] C. Baumschlager, D. Eberle, Casa Kern, Austria, 1996.

[d] Livio Vacchini, Ecole d'architecture de Nancy, 1995.

[e] Ceccherini Nelli L., *Schermature solari*, Firenze, Alinea editrice, 2007, p48.

[f] Hartwig Schneider Architects, Asilo Winnenden, 1995.

[g] Ceccherini Nelli L., *Schermature solari*, Firenze, Alinea editrice, 2007, p41.

[h] DesignInc, The Council House CH2, Melbourne, 2006.

[i] BP architectures, M9-C, Paris Rive Gauche, 2012.

[j] Serena Castelli, *Schermature solari e architettura - Analisi qualitative e quantitativa del loro utilizzo*, 2015, p96.

[k] Jean Nouvel, Louvre Abu Dhabi, Emirati Arabi Uniti, 2017.

[l] Louis Kahn, Kimbell Art Museum, Stati Uniti, 1972.

[m] Mario Cucinella Architects, Sede Arpa, Ferrara, 2018.

(1) <https://www.solemma.com/alfa>

(2) Mark Rea, B1-Daylight for Humans, Nonvisual effects of light, 2022, Nlited.

(3) Lucas, R. J., Peirson, S. N., Berson, D. M., Brown, T. M., Cooper, H. M., Czeisler, C. A., Figueiro, M. G., Gamlin, P. D., Lockley, S. W., O'Hagan, J. B., Price, L. L. A., Provencio, I., Skene, D. J., & Brainard, G. C. ,2014, Measuring and using light in the melanopsin age. Trends in Neurosciences, 37(1), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2013.10.004>

(4) Diepens, J., Bakker, F., Zonneveldt, L.: Daylight design variations book. TNO-TUE Centre for Building Research (en desarrollo, última actualización Octubre 2000).

(5) <https://mercortecresa.com/en/smoke-exhaust-systems/natural-lighting/fixed-skylight>

(6) [https://www.archdaily.com/catalog/us/products/16912/velux-modular-skylights-in-roskilde-katedralskole-velux-commercial?ad\\_source=neufert&ad\\_medium=gallery&ad\\_name=close-gallery](https://www.archdaily.com/catalog/us/products/16912/velux-modular-skylights-in-roskilde-katedralskole-velux-commercial?ad_source=neufert&ad_medium=gallery&ad_name=close-gallery)

(7) <https://www.emmonsroofing.com/residential-services/roofing/skylight-installation/>

(8) <https://oakhurstblinds.com/conservatory-blinds/roller-blinds/>

(9) <https://www.archdaily.com/239524/tianjin-art-museum-ksp-jurgen-engel-architekten>

(10) <https://www.archdaily.com/160390/ad-classics-bagsvaerd-church-jorn-utzon>

(11) <https://www.archdaily.com/12674/brione-house-wespi-de-meuron>

(12) <https://britishart.yale.edu/architecture>

(13) [https://www.ukdoorsonline.co.uk/wp-content/uploads/Room-Windows-brochure-2031\\_compressed.pdf](https://www.ukdoorsonline.co.uk/wp-content/uploads/Room-Windows-brochure-2031_compressed.pdf)

(14) [https://www.arcat.com/cad/art-sky/086000\\_-6-4--ccm.pdf](https://www.arcat.com/cad/art-sky/086000_-6-4--ccm.pdf)

(15) <https://www.lamilux.com/skylights/products/continuous-rooflight-systems.html>

(16) <https://www.lamiluxskylights.co.uk/rooflights/glass-skylight-pyramid.html>

(17) <https://www.archdaily.com/797754/secret-garden-house-wallflower-architecture-plus-design>

(18) <https://commercial.velux.com/products/smoke-and-natural-ventilation>

(19) <https://mojah.com.sa/2024/01/12/>

(20) <https://caoduro.it/en/natural-zenithal-lighting/>

(21) <https://www.archdaily.com/catalog/us/products/13689/velux-modular-skylights-in-sagbacksgymnasiet-velux>

(22) elaborazione personale tratta da <https://metropolismag.com/projects/why-light-matters-designing-with-circadian-health-in-mind/>

(23) estratto immagini: <https://www.traverso-vigghy.com/project/spidi-showroom/>

(24) estratto immagini: Seda Kacel, Benson Lau, Investigation of the Luminous Environment in Louis I. Kahn's Kimbell Art Museum: A qualitative and quantitative study, 2013.

(25) estratto immagini: <https://arquitecturaviva.com/works/ampliacion-del-museo-de-arte-kimbell-9>

(26) estratto immagini: <https://archello.com/it/project/new-vimar-headquarters-and-logistic-pole>

(27) estratto immagini: <https://www.archdaily.com/55546/rosales-del-canal-kindergarten-magen-arquitectos>

(28) estratto immagini : <https://www.archdaily.com/578622/hawe-factory-kaufbeuren-bar-kow-leibinger>



*Alla Professoressa Anna Pellegrino, per avermi dato l'opportunità di sviluppare questa tesi su un argomento che mi appassiona, nonostante le difficoltà iniziali, e per aver sempre avuto fiducia in me.*

*Al Professore Valerio Lo Verso, per aver condiviso con me il suo prezioso sapere e per il suo costante sostegno lungo tutto il percorso.*

*Ai miei cari genitori, che con il loro supporto incondizionato mi hanno permesso di raggiungere questo traguardo, e che mi hanno aiutata a diventare la persona che sono oggi.*

*A mio fratellino, con cui abbiamo condiviso tante cose insieme e per essere la persona su cui potrò sempre contare, così come io lo sarò per lui.*

*A miei zii, per essere stati sempre presenti, nei momenti belli e in quelli più difficili, e per il loro infinito affetto.*

*Alla tutta la mia famiglia, per essermi stata accanto, nonostante la distanza che ci potesse separare.*

*Alle mie amiche, per aver reso questi anni di università unici, per esserci sempre sopportate e supportate ma senza il quale non sarebbe una vera amicizia, e che spero durerà ancora a lungo.*

*A tutte le persone che fanno parte della mia vita, e che in un modo o nell'altro sono stati presenti.*

*Alle memoria di coloro che non ci sono più, ma che porto sempre con me, nella speranza di renderli fieri.*

**Grazie di cuore.**





