

ENEA

Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente

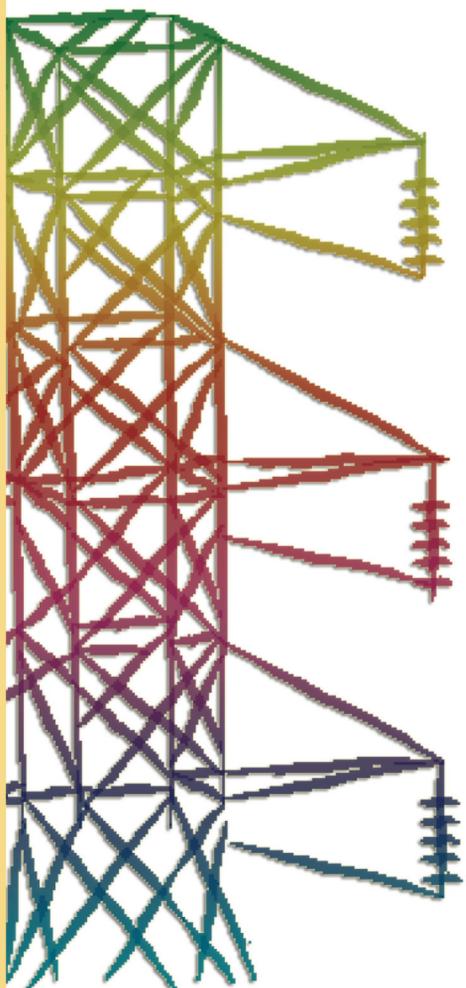


Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Integrazione luce naturale/artificiale in ambito terziario e abitativo

Franco Gugliermetti, Fabio Bisegna





Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Integrazione luce naturale/artificiale in ambito terziario e abitativo

Franco Gugliermetti, Fabio Bisegna

INTEGRAZIONE LUCE NATURALE/ARTIFICIALE IN AMBITO TERZIARIO E ABITATIVO

Franco Gugliermetti, Fabio Bisegna (Università di Roma La Sapienza, Dipartimento di Fisica Tecnica)

Marzo 2009

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Usi finali

Tema: Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto, in particolare nella stagione estiva e per uso terziario e abitativo e loro razionalizzazione.

Interazione condizionamento e illuminazione

Responsabile Tema: Marco Citterio, ENEA

ATTIVITA' DI RICERCA
INTEGRAZIONE LUCE NATURALE / ARTIFICIALE IN
AMBITO TERZIARIO E ABITATIVO; PARTECIPAZIONE
ATTIVITÀ IEA CONNESSE ALL'ILLUMINAZIONE

Nell'ambito del Tema di ricerca 5.4.1.1/2 "Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto, in particolare nella stagione estiva e per uso terziario e abitativo e loro razionalizzazione, interazione condizionamento e illuminazione", di cui all'art 11 del decreto 8 marzo 2006

ACCORDO DI COLLABORAZIONE TRA

ENEA
Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e
l'Ambiente

E IL

DIPARTIMENTO DI FISICA TECNICA
DELLA "SAPIENZA" UNIVERSITA' DI ROMA

RELAZIONE FINALE

Roma, Marzo 2009

SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA



Dipartimento di Fisica Tecnica

CONTENUTI

Introduzione pag. 1

Cap. 1:

Data base di componenti, sistemi e tecnologie utilizzate per l'integrazione di luce naturale pag. 3

Appendice al Cap. 1:

Sistemi PSALI e HSL pag. 124

Cap. 2:

Tecniche di modellazione avanzate e tradizionali per l'analisi dell'ambiente visivo in presenza di sistemi tradizionali e innovativi pag. 130

Cap.3:

Linee guida per la progettazione pag. 158

Cap. 4:

Presentazione di casi studio pag. 165

Cap. 5:

Attività svolte in ambito IEA pag. 185

Componenti, sistemi e tecnologie per l' integrazione e la gestione della luce naturale negli edifici non residenziali: comfort visivo e risparmio energetico

Introduzione

La necessità di ridurre i consumi energetici e l'accresciuta richiesta di ambienti sempre più confortevoli e più articolati, dal punto di vista funzionale, sono stati gli elementi che hanno dato impulso, in questi ultimi anni, all'approfondimento delle tematiche legate ai criteri di valutazione e di progettazione ambientale, nonché allo sviluppo di nuovi componenti, sistemi e tecnologie.

Gli indicatori della qualità ambientale visiva, termo-igrometrica e di qualità dell'aria sono divenuti sempre più complessi, numerosi ed intercorrelati. In particolare nell'ambiente luminoso i livelli di illuminamento e l'abbagliamento sono ormai considerati come elementi di primo livello per la valutazione del comfort e vengono sempre più spesso affiancati da parametri di secondo livello, atti ad affinare la caratterizzazione ambientale: gli aspetti colorimetrici nella loro distribuzione spaziale, integrando le informazioni relative alle rese cromatiche ed alle temperature di colore delle sorgenti luminose, rappresentano un esempio del secondo livello. Una metodologia efficace e affidabile di progettazione, orientata alla realizzazione di ambienti confortevoli ed al tempo stesso energeticamente efficienti, non è ancora stata sviluppata.

Al fine di trarre i massimi vantaggi di comfort visivo che di risparmio energetico, derivanti da un maggior utilizzo della luce naturale disponibile, ai più tradizionali metodi di controllo solare, ottenuto attraverso elementi architettonici esterni (frangisole e sistemi esterni di ombreggiamento fissi) ed elementi di schermatura interni (tende e veneziane), si sono affiancate, negli ultimi anni, differenti tipologie di materiali trasparenti e sistemi di controllo attivo della luce, nonché sistemi di captazione e conduzione della luce esterna mediante fibre ottiche e superfici riflettenti, che aumentano la possibilità di progettare e gestire l'ambiente visivo e termico. In particolare sono attualmente disponibili rivestimenti selettivi posti su vetro o su substrati polimerici. e sistemi vetrati intelligenti ("smart windows") capaci di cambiare la propria trasparenza in risposta a parametri ambientali; la possibilità di integrare tali sistemi con sistemi commerciali di controllo della luce è ormai realizzabile.

In questa tematica più generale si inserisce la problematica relativa agli ambienti di grandi dimensioni e profondi, oppure con superfici vetrate insufficienti, che hanno generalmente bisogno di integrare l'illuminazione naturale con quella artificiale in maniera permanente (impianti PSALI, Permanent Supplementary Artificial Light for Interiors) oppure saltuaria. In ambedue i casi si pone il problema della contemporanea presenza di sorgenti di luce, quella naturale e artificiale, che possono avere, se non opportunamente studiate, caratteristiche spettrali e distributive totalmente diverse, tali da creare un ambiente luminoso non gradevole e/o inadeguato ai compiti visivi svolti. Pertanto gli apparecchi e le sorgenti luminose artificiali vanno scelte in maniera opportuna per

evitare fenomeni di discomfort visivo; tali scelte sono fortemente condizionate, in termini di resa cromatica e di distribuzione spettrale, non solo dalla variabilità della luce naturale esterna, ma anche dalla presenza delle superfici vetrate e dai sistemi di ombreggiamento, statici e dinamici, che ne possono alterare la composizione: un'influenza non trascurabile, in ambienti in cui è richiesta un'alta resa cromatica, risulta essere l'effetto introdotto dalla colorazione delle pareti e dei soffitti degli ambienti stessi.

Le problematiche connesse all'interazione ed al controllo della luce naturale tramite sistemi tradizionali e/o superfici trasparenti di tipo innovativo, ovvero all'integrazione della luce naturale con impianti di illuminazione artificiale (PSALI), sono essenzialmente caratterizzate dalla diversità degli spettri di emissione, dalla variabilità temporale delle caratteristiche spettrali e di flusso, e dalla diversa provenienza della luce naturale ed artificiale. L'utilizzo invece di lampade a diversa tecnologia, tradizionale e/o innovativa (Led, o-led, sistemi biodinamici etc..) all'interno di uno stesso impianto d'illuminazione (MTLS, Multi-Type Lamps System), in alternativa ai più tradizionali STLS (Single-Type Lamps System), può opportunamente essere perseguito quando esiste incompatibilità delle esigenze ambientali con i periodi di messa a regime delle lampade, necessità di risparmio energetico, ovvero necessità di controllo colorimetrico.

I vantaggi in termini estetici, di esigenze visive o tecniche, e di risparmio energetico, introdotti da soluzioni di questo tipo d'altra parte introducono una serie di problematiche dovuto alle diverse caratteristiche prestazionali delle differenti lampade, ed alla integrazione di differenti spettri, il naturale e l'artificiale.

L'effetto della luce naturale come regolatore chiave dei processi biologici, della produttività negli ambienti commerciali e lavorativi, dei SAD (Seasonal Affective Disorder) è da molti anni conosciuta, anche se studi sistematici e statisticamente significativi sono piuttosto recenti; questa importante funzione della luce naturale ha fatto nascere in questi anni, grazie alle tecniche ormai disponibili, una nuova tipologia di illuminazione ibrida, nota come HSL (Hybrid Solar Lighting), i cui componenti e sistemi stanno facendo il loro primo ingresso nel mercato; scopo della HSL è quello di portare la luce naturale anche nelle zone più lontane dalle aperture esterne, per le quali sino ad ora si ricorreva a impianti PSALI con apparecchi tradizionali. Gli HSL sono caratterizzati da captatori solari esterni (ad inseguimento solare oppure statici) e da un sistema di conduzione della luce (pozzo o più comunemente fibre ottiche) e da un diffusore interno ("stand alone" oppure integrato con lampade tradizionali).

Infine dal punto di vista progettuale l'ottimizzazione visiva ed energetica, basata su parametri di primo e secondo livello, può essere ottenuta solo attraverso l'analisi di numerosi parametri intercorrelati. I metodi di ottimizzazione generalmente usati richiedono che la funzione obiettivo, di cui si vuole trovare un massimo, sia differenziabile, e forniscono di conseguenza una soluzione del problema che rappresenta un ottimo locale per tale funzione. La presenza di molti parametri tuttavia comporta la definizione di una funzione obiettivo caratterizzata da molti massimi locali, e non necessariamente continua e differenziabile in tutto il dominio, impone l'uso di tecniche di ottimizzazione globale attualmente scarsamente applicate in campo illuminotecnica, quali gli algoritmi genetici e le simulazioni annealing.

Capitolo I

Data base di componenti, sistemi e tecnologie utilizzate per l'integrazione di luce naturale

Negli ultimi anni, l'innovazione tecnologica ha portato sempre più in architettura allo sviluppo di sistemi di controllo dell'illuminazione naturale di tipo innovativo, che siano in grado di esercitare un controllo sia sull'ingresso di luce naturale, sia sul guadagno termico passivo. L'elemento finestrato viene così a caratterizzarsi come elemento multifunzionale integrato, formato da un insieme di componenti ognuno dei quali preposto al controllo distinto di una funzione: areazione, schermatura, vista verso l'esterno, quantità e distribuzione della luce naturale trasmessa.

I materiali innovativi possono essere a comportamento passivo o attivo: nel primo caso variano le proprie prestazioni termiche e ottiche in funzione dei parametri di intensità luminosa e temperatura; nel secondo caso le prestazioni variano attraverso dispositivi impiantistici. L'elemento di involucro trasparente è gestito in modo integrato con le varie funzioni e i vari sistemi dell'edificio portando così anche a rilevanti risparmi energetici.

I nuovi materiali che costituiscono i sistemi di controllo, coadiuvati da tecnologie specifiche, sono in grado di garantire prestazioni elevate in termini di schermatura degli ambienti interni e ridistribuzione della luce naturale in ambiente, sfruttando principi fisici quali la riflessione, la rifrazione e la diffrazione della luce.

Per definire le diverse tipologie di controllo della luce naturale, è opportuno innanzitutto effettuare una classificazione delle funzioni che tali sistemi di controllo devono svolgere:

- controllo della quantità di luce in ambiente
- controllo della radiazione solare diretta
- controllo della luminanza della superficie vetrata
- controllo del colore della luce naturale in ambiente

L'espletamento di queste funzioni è assicurato attraverso:

- l'attenuazione della radiazione solare incidente (schermatura)
- il ridirezionamento della radiazione solare incidente che può avvenire per:
 - riflessione verso l'esterno e/o verso l'interno
 - rifrazione
 - diffrazione

dove per rifrazione della luce si intende la deviazione nella direzione di propagazione della luce che essa subisce quando passa da un mezzo ad un altro a densità diversa; per diffrazione si intende quel fenomeno fisico per cui la radiazione, una volta attraversato un ostacolo, non si propaga in linea retta ma secondo direzioni diverse, producendo un effetto semidiffuso; per diffusione, infine, si intende quel fenomeno fisico per cui la radiazione, attraversato un mezzo, viene deviata in tutte le direzioni: tale comportamento può essere assunto dalla radiazione luminosa sia in relazione alla trasmissione che alla riflessione, secondo quanto mostrato in Fig. 1.1.

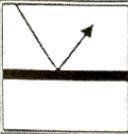
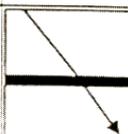
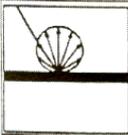
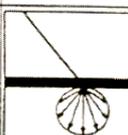
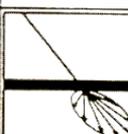
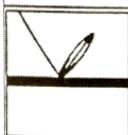
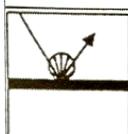
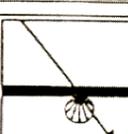
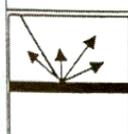
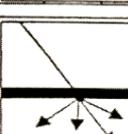
RIFLESSIONE		TRASMISSIONE
	<p>S P E SPECULARE $\text{delta} = 0^\circ$</p>	
	<p>D I F DIFFUSO $45^\circ < \text{delta} < 60^\circ$</p>	
	<p>S C A W SEMI DIFFUSO A FASCIO LARGO $15^\circ < \text{delta} < 45^\circ$</p>	
	<p>S C A N SEMI DIFFUSO A FASCIO STRETTO $0^\circ < \text{delta} < 15^\circ$</p>	
	<p>D I F + S P E DIFFUSO + SPECULARE</p>	
	<p>C M P PRISMATICO COMPLESSO</p>	

Figura 1.1. Modalità di trasmissione e riflessione della radiazione luminosa.

Le funzioni vengono svolte da elementi di controllo che possono essere costituiti dai cosiddetti sistemi di illuminazione diurna ovvero da componenti schermanti opache o trasparenti. Riguardo la scelta di queste forme di controllo nelle diverse situazioni, è necessario fare riferimento agli scopi per cui la superficie deve essere scelta e alle prestazioni che si prevedono nello studio del ciclo di vita della struttura.

I sistemi di illuminazione diurna e i componenti schermanti attualmente disponibili per il controllo della luce naturale sono vari e diversi per prestazioni, potenzialità e applicabilità.

L'elemento vetrato si caratterizza come elemento multi-funzionale integrato, composto da un insieme di componenti ciascuno dei quali preposto al controllo di una funzione: aerazione, schermatura, vista verso l'esterno, quantità e distribuzione della luce naturale trasmessa. Sul mercato sono presenti materiali tradizionali e innovativi in grado di garantire, sfruttando le caratteristiche di riflessione, rifrazione e diffrazione della luce, le prestazioni più adeguate alle varie e variabili esigenze degli ambienti interni. Per la caratterizzazione luminosa dei componenti trasparenti, in relazione alle principali funzioni di controllo precedentemente introdotte, si definiscono i seguenti parametri:

- coefficiente di trasmissione luminosa
- coefficiente di riflessione luminosa
- temperatura di colore correlata della luce naturale trasmessa
- indice di resa cromatica della luce naturale trasmessa
- modalità di trasmissione e riflessione

Tutte le aperture trasparenti, in edilizia, si possono considerare come superfici vetrate e in particolare sono:

- materiali trasparenti, vetro o sostanze plastiche;
- telai e colonnine divisorie;
- schermature esterne ed interne ;
- sistemi integrali di ombreggiamento.

Le superfici vetrate hanno un compito importante nella struttura edilizia perchè:

- soddisfano la necessità umana di contatto e "comunicazione" col mondo esterno;
- consentono il passaggio della radiazione solare, provvedendo così ad un ausilio "naturale", in termini di illuminazione, riscaldamento e, in alcuni casi, di aria esterna;
- assicurano una via d'uscita in caso d'incendio o altro tipo di emergenza in edifici ad altezza contenuta;
- migliorano l'aspetto interno ed esterno dell'edificio.

Il progettista nel momento in cui deve scegliere questi elementi deve tenere conto di vari aspetti:

- **architettonico**, indicando tra le diverse alternative di progetto la più adeguata, soprattutto in termini di risparmio energetico, rendendo possibile l'utilizzo di illuminazione naturale, ma anche elettrica, con possibili sistemi di controllo, che siano in grado di diminuire automaticamente l'illuminazione elettrica quando è disponibile quella naturale;
- **termico**, progettando in funzione dei carichi termici e delle temperature superficiali, in modo che risultino compatibili con le necessità di risparmio energetico e di benessere degli occupanti;
- **economico**, valutando i costi d'installazione e su tutto il ciclo di vita di vari progetti alternativi;
- **ergonomico**, andando a soddisfare le necessità umane, appagando così il bisogno (fisico) ed il desiderio (psicologico) di contatto con il mondo esterno, attraverso superfici trasparenti, di rispetto delle norme di illuminazione per l'ambiente progettato, assicurando una condizione di benessere per gli occupanti.

I materiali trasparenti più comuni sono pannelli o lastre di vetro o sostanze plastiche ed altri materiali con buone proprietà illuminotecniche. Il controllo dei flussi termici per conduzione, convezione e irraggiamento verso l'interno e l'esterno, avviene attraverso l'utilizzo di una o più lastre di materiale trasparente (isolante) e di sistemi di schermatura interna e esterna. Analogamente, si possono controllare la luce solare e/o della volta celeste attraverso l'uso di lastre oscurate o di schermatura fisse e/o mobili. Invece con l'utilizzo di vetri oscurati e/o tende opache si può modificare l'ambiente esterno nei casi in cui esso sia poco attraente o tale da disturbare o distogliere l'attenzione. Allo stesso modo si può assicurare la privacy con l'opportunità di vedere all'esterno, nel caso in cui il grado di illuminazione esterna sia maggiore rispetto a quello interno.

I componenti trasparenti tradizionali sono costituiti da vetri chiari, vetri trattati in massa (colorati), vetri trattati in superficie (sia tramite pellicole che vetri riflettenti). Per cercare di rispondere a tutte le esigenze presenti nella maniera più efficace, sono però in fase di sviluppo, dimostrazione o commercializzazione, una serie di materiali trasparenti innovativi che presentano delle qualità specifiche e delle proprietà molto interessanti sia da un punto di vista funzionale che estetico. I componenti trasparenti innovativi sono i vetri cromogenici, più nello specifico composti da: vetri fotocromici, vetri termocromici, vetri elettrocromici, vetri a cristalli liquidi.

La Fig. 1.2 mostra le diverse tipologie di materiali trasparenti attualmente presenti in commercio o in fase di pre-commercializzazione.

CLASSIFICAZIONE DEI COMPONENTI

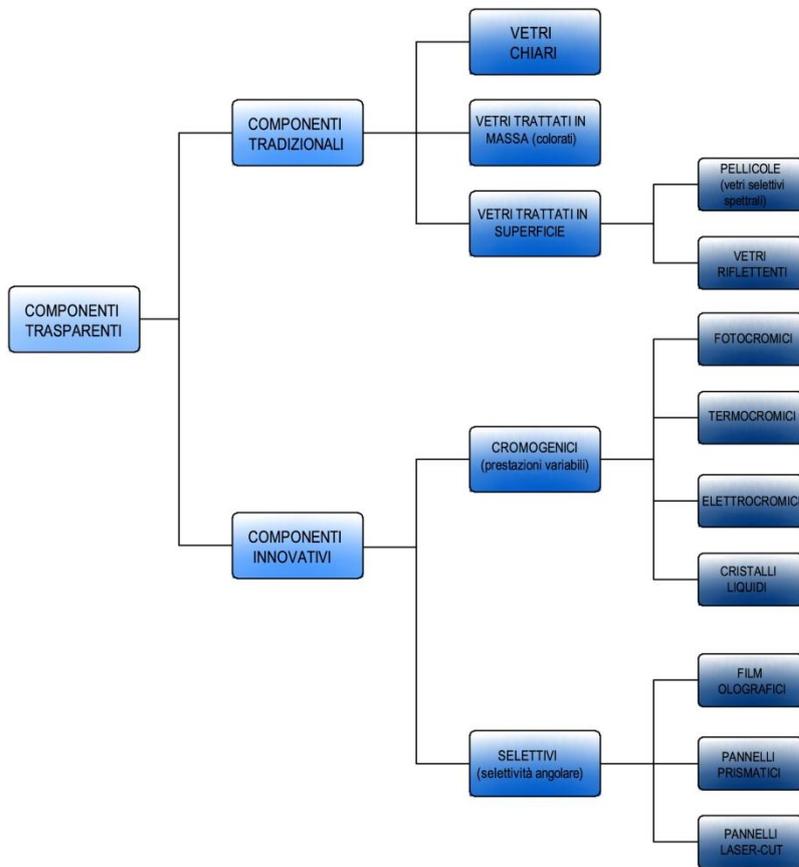


Figura 1.2. Classificazione dei materiali trasparenti.

I sistemi di schermatura si presentano come il necessario complemento agli elementi vetrati: i primi consentono l'immissione di luce naturale all'interno, gli altri consentono un controllo della luce naturale immessa in ambiente per la protezione contro abbagliamento ed eventualmente contro eccessivi carichi termici. Con riferimento agli elementi schermanti, è possibile procedere ad una classificazione basata su diversi criteri:

1. Posizione dell'elemento schermante rispetto al componente trasparente:

- sistemi interni (fissi o mobili):
 - vantaggi:
 - possibilità di una facile regolazione da parte degli utenti (nel caso di sistemi interni mobili) che permette di adeguare in ogni momento l'azione schermante alle condizioni di irraggiamento solare

- schermatura della radiazione solare diffusa e soprattutto diretta, con attenuazione dei fenomeni di abbagliamento
- economicità
- svantaggi:
 - minore attenuazione del carico termico rilevato, rispetto ai sistemi di schermatura esterni
 - possibile limitazione della vista verso l'esterno dell'edificio (per alcune tipologie)
- sistemi esterni (fissi o mobili):
 - vantaggi:
 - possibilità di una facile regolazione da parte degli utenti (nel caso di sistemi interni mobili) che permette di adeguare in ogni momento l'azione schermante alle condizioni di irraggiamento solare
 - schermatura della radiazione solare diffusa e soprattutto diretta, con attenuazione dei fenomeni di abbagliamento
 - maggiore attenuazione del carico termico rilevato, rispetto ai sistemi di schermatura interni
 - economicità
 - svantaggi:
 - possibile limitazione della vista verso l'esterno dell'edificio (per alcune tipologie)
- schermi esterni/interni (fissi o mobili)
 - vantaggi (con riferimento agli schermi esterni):
 - efficacia nell'attenuare il carico termico dell'edificio
 - schermatura della radiazione solare diffusa e soprattutto diretta
 - possibilità di regolare manualmente o automaticamente la loro posizione e orientamento in funzione dell'angolo di incidenza dei raggi solari nelle diverse stagioni (nel caso di sistemi esterni mobili)
 - possibilità di arricchire esteticamente il prospetto dell'edificio
 - svantaggi (con riferimento agli schermi esterni):
 - costi elevati di installazione e di manutenzione (soprattutto se ci sono dispositivi di controllo automatico della posizione e dell'orientamento)
 - presenza comunque invasiva nelle facciate degli edifici
- sistemi in intercapedine (fissi o mobili):

- vantaggi:
 - controllo della radiazione solare: in ambiente entra sia la componente diretta, in parte riflessa dalle lamelle, sia la componente diffusa. L'illuminazione naturale del locale risulta distribuita in maniera uniforme.
 - controllo del surriscaldamento tipico dei mesi estivi
- svantaggi:
 - costi elevati di installazione e di manutenzione (nel caso ci siano dispositivi di controllo automatico della posizione e dell'orientamento) comunque inferiori rispetto a quelli dei sistemi esterni

2. Flessibilità di movimento:

- sistemi fissi
 - vantaggi:
 - garantiscono prestazioni ottimali se vengono posizionati all'esterno delle facciate piuttosto che al loro interno
 - costi di installazione e di manutenzione minori rispetto ai sistemi mobili
 - svantaggi:
 - non possono variare la loro posizione nel corso della giornata e delle diverse stagioni: questa mancanza di flessibilità ne limita in alcuni casi le prestazioni
- sistemi mobili
 - vantaggi:
 - possono variare la loro posizione nel corso della giornata e delle diverse stagioni
 - svantaggi:
 - costi di installazione e di manutenzione più elevati rispetto ai sistemi fissi dovuti alla presenza del sistema di controllo e movimentazione

3. Configurazione geometrica dello schermo:

- sistemi continui: sono da considerarsi tali gli aggetti, sia orizzontali che verticali, e i light-shelves. Sono costituiti da elementi opachi formanti un'unica superficie schermante senza interruzioni. Sono capaci di assicurare la schermatura totale della radiazione solare incidente nella direzione e secondo gli angoli con cui sono collocati
- sistemi discontinui: sono costituiti da una serie di lamelle opportunamente orientate in modo da schermare la radiazione solare incidente, consentono anche il passaggio dei flussi di aria e il conseguente smaltimento del calore che si accumula in corrispondenza della finestra

4. Comportamento rispetto alla radiazione incidente:

- sistemi speculari (materiali lucidi): si comportano come uno specchio, con un angolo di riflessione della radiazione uguale all'angolo di incidenza
 - vantaggi:
 - ridirezionamento della luce verso le zone volute, caratterizzate altrimenti da bassi livelli di illuminamento
 - svantaggi:
 - possibili problemi di abbagliamento
- sistemi diffondenti (materiali opachi): riflettono la radiazione luminosa incidente in maniera uniformemente distribuita in tutte le direzioni dello spazio circostante
 - vantaggi:
 - illuminazione uniformemente distribuita all'interno degli ambienti
 - svantaggi:
 - bassi livelli di illuminamento

Per la caratterizzazione luminosa dei componenti schermanti si definiscono i seguenti parametri prestazionali:

- coefficiente di trasmissione luminosa
- coefficiente di riflessione luminosa
- temperatura di colore correlata della luce naturale trasmessa
- indice di resa cromatica della luce naturale trasmessa

- modalità di trasmissione e riflessione
- fattore di ombreggiamento luminoso, definito come:

$$FL = \frac{\Phi_{\text{luminoso incidente sulla vetrata con schermo}}}{\Phi_{\text{luminoso incidente sulla vetrata senza schermo}}}$$

- fattore di apertura

$$OF = \frac{\text{area aperta tra le fibre}}{\text{area totale del tessuto}}$$

In particolare, per il fattore di apertura, vale la seguente Tab. 1.1:

Tabella 1. Valori caratteristici di OF

	Fattore di Apertura (OF)
Trama stretta	$0 \leq OF \leq 0.07$
Trama media	$0.07 \leq OF \leq 0.25$
Trama larga	$0.25 \leq OF \leq 1$

La Fig. 1.3 mostra le diverse tipologie di materiali schermanti attualmente presenti in commercio o in fase di pre-commercializzazione.

I COMPONENTI SCHERMANTI

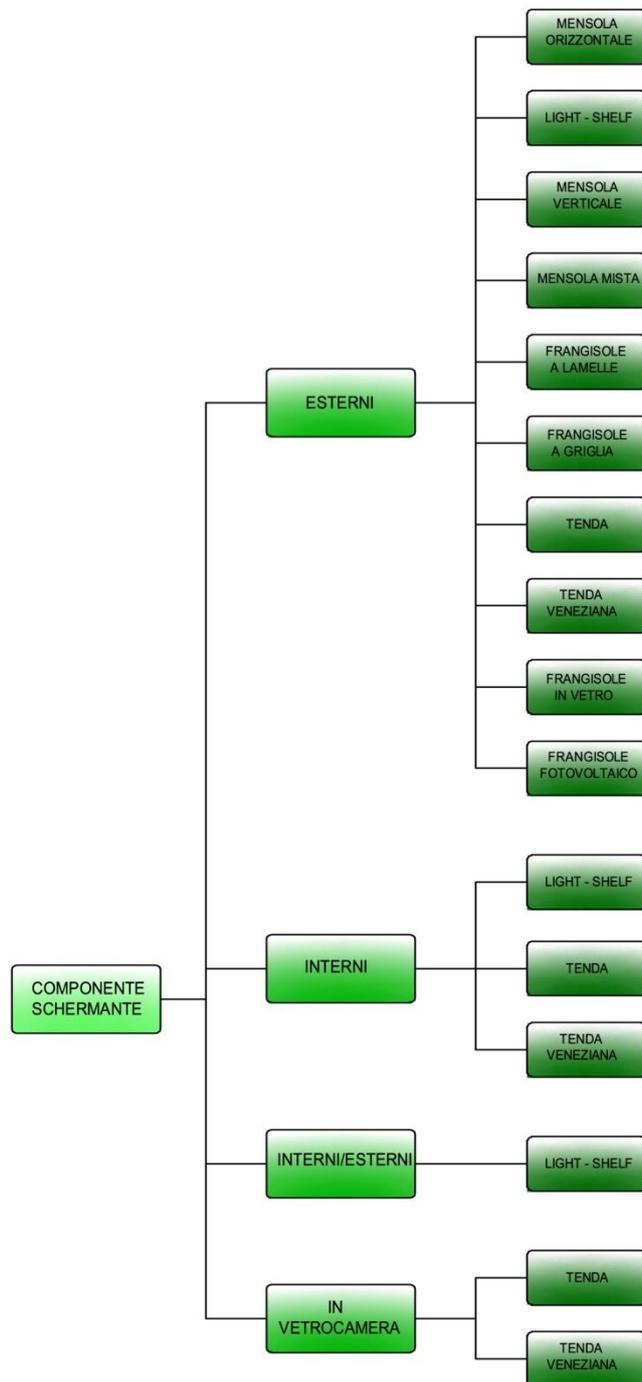


Figura 1.3. Classificazione dei componenti schermanti.

I sistemi di trasporto della luce naturale raccolgono e trasportano la luce solare per grandi distanze al centro dell'edificio attraverso fibre ottiche o condotti di luce. Il loro funzionamento è basato sulla raccolta e concentrazione della luce naturale in copertura (o comunque all'esterno, anche in facciata) attraverso dispositivi di captazione e nel successivo trasporto, tramite elementi di conduzione, della medesima negli spazi di lavoro posizionati altrove.

I sistemi di illuminazione diurna che captano e conducono la luce solare all'interno di un edificio sono composti da tre unità funzionali:

1. **l'elemento di captazione**, il componente collocato all'esterno con funzione di raccogliere e indirizzare la componente diretta (a volte anche diffusa) della radiazione solare;
2. **l'elemento di conduzione**, il componente che trasporta la luce captata fino all'ambiente da illuminare;
3. **l'elemento di diffusione**, il componente posizionato all'interno dell'ambiente da illuminare, con funzione di controllo del flusso luminoso trasportato dall'elemento di conduzione.

Si possono distinguere i sistemi di trasporto della luce naturale in due differenti gruppi in funzione del tipo di elemento captatore impiegato:

- **Sistemi passivi (fissi):** sistemi che utilizzano elementi di captazione fissi, che non sono in grado di seguire il percorso solare. Per ottimizzare la componente diretta della radiazione in questi sistemi, è importante individuare un momento preciso rispetto al quale posizionare ed inclinare l'elemento di captazione, per massimizzare la quantità di luce intercettata. Il comportamento di questi captatori non è costante durante l'arco dell'anno, e sono in grado di assicurare prestazioni soddisfacenti solo per un periodo di tempo definito. La luce viene indirizzata non in un punto preciso, ma su un'area ristretta e variabile. Per questi sistemi non è possibile usare elementi di conduzione a sezione ed ingombro ridotti (come le fibre ottiche), ma solamente elementi con sezione ed ingombro maggiori quali i condotti, che hanno una sezione di dimensioni proporzionali all'area da illuminare. Si possono classificare secondo due tipologie:
 - **condotti solari:** sistema efficace per il trasporto della componente diretta della luce solare, ma non della diffusa; è un tipo di sistema che funziona bene in condizioni di cielo sereno ma non in condizioni di cielo coperto.
 - **light pipes:** un sistema ottimale in presenza di illuminazione naturale a basse altezze solari.

- **Sistemi attivi (mobili):** sistemi che utilizzano elementi di captazione mobili, in grado di seguire in ogni istante il percorso solare. Gli elementi di captazione possono essere costituiti da lenti e specchi alimentati da motori elettrici e controllati da dispositivi elettronici che consentono di seguire il movimento del sole. Una volta captate, le radiazioni luminose sono riflesse o deviate nella direzione voluta all'interno dell'edificio su un'area o un punto preciso. A tal fine, è possibile usare sia elementi di conduzione, come lenti e fibre ottiche, che consentono di coprire distanze notevoli e di concentrare i raggi in punti precisi, sia elementi con sezione ed ingombro maggiori (come i condotti) che permettono di illuminare aree più estese. I sistemi attivi comportano notevoli costi di installazione e di gestione, si possono classificare in due tipologie:
 - **eliostato:** sistema dotato di specchi riflettenti; può essere ad un elemento o a due elementi (in quest'ultimo caso è in grado di convogliare la luce diretta del sole verso punti altrimenti irraggiungibili);
 - **sistema "Himawari" (fibre ottiche):** un sistema in cui l'elemento di captazione è costituito da una serie di lenti Fresnel, che alimentano delle fibre ottiche.

A seconda del tipo di sistema di cui fanno parte e della funzione che sono chiamate a svolgere, le tre unità funzionali che costituiscono i sistemi di conduzione della luce possono essere quindi di diversi tipi e avere differenti caratteristiche.

L'elemento di captazione può essere:

- **fisso:** l'obiettivo di questo elemento è di considerare da un lato la possibilità di acquisire la maggior quantità di luce all'interno dell'ambiente in un dato istante, dall'altro di garantire adeguati livelli di illuminamento nel corso di tutto l'anno. La sua forma e le sue dimensioni derivano dal miglior compromesso tra l'ottimizzazione dell'ingresso della luce solare diretta e diffusa;
- **mobile:** in questo caso lo scopo è quello di seguire la posizione del sole nel tempo. Di conseguenza, la progettazione viene guidata dalla ricerca di una posizione ottimale rispetto alla direzione, mutevole, dei raggi solari (la componente diffusa della luce di solito non viene considerata).

L'elemento di conduzione può essere costituito da:

- **un condotto,** dove la conduzione della luce avviene per mezzo della semplice riflessione su superfici speculari o diffondenti;

- **le lenti e le fibre ottiche**, dove la luce naturale viene utilizzata come quella artificiale: una sorgente luminosa diffusa (la volta celeste) viene trasformata in una sorgente puntiforme che può essere indirizzata verso un qualsiasi punto dell'ambiente.

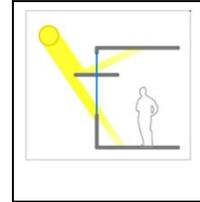
L'elemento di diffusione è previsto solo in alcune applicazioni, quando prevale lo scopo di controllare il flusso luminoso introdotto per garantire il comfort visivo all'interno dell'ambiente. L'elemento di diffusione può essere:

- **un elemento di chiusura trasparente** in vetro, policarbonato o metacrilato;
- **un elemento riflettore** realizzato con pellicole, rivestimenti riflettenti e diffondenti;
- **un elemento ottico** definito da lenti convergenti o divergenti, lenti Fresnel e pannelli diffusori.

Il parametro fondamentale a cui far riferimento è la trasmittanza, ovvero la capacità del sistema di trasmettere la radiazione luminosa globale, nelle componenti diretta e diffusa; essa viene calcolata separatamente per le due componenti, in funzione della geometria del condotto, del coefficiente di riflessione delle superfici interne del condotto e della posizione del sole sull'orizzonte. La trasmittanza rappresenta anche il rendimento o efficienza del sistema, poichè descrive il rapporto tra flusso luminoso uscente e quello entrante.

Sistemi di illuminazione diurna

1. LIGHT-SHELF



Un light-shelf è un sistema di daylighting progettato per schermare la luce e rifletterla sulla sua superficie superiore e per riparare dall'abbagliamento diretto proveniente dal cielo. È una mensola orizzontale o quasi orizzontale (leggermente inclinata), opaca, riflettente, posta nel mezzo di un'apertura di facciata esternamente e/o internamente rispetto ad essa, in modo tale da dividerla in due parti che possono essere trattate con tipologie diverse di superfici vetrate: la parte inferiore di questo elemento costituisce l'aggetto della finestra inferiore, la parte superiore è rifinita in materiale riflettente (speculare o, più spesso, diffusante) in modo da indirizzare la radiazione solare incidente verso il soffitto (chiaro), passando attraverso la finestra superiore, e dal soffitto distribuirla in ambiente attraverso una seconda riflessione diffusante (Fig. 1.4 e 1.5). Il light-shelf può essere parte integrante della facciata o essere fissato all'edificio.

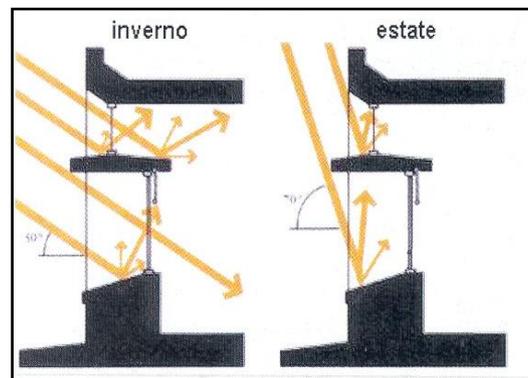


Figura 1.4. Principio di funzionamento di un light-shelf

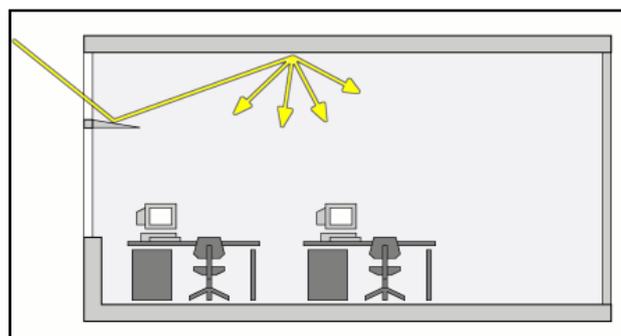


Figura 1.5. Light-shelf interno/esterno di riflessione dal soffitto in ambiente

I light-shelf non sono prodotti standard, e devono quindi essere costruiti per adattarsi alla situazione architettonica in cui sono usati. Un light-shelf di solito è posizionato al di sopra del livello degli occhi e divide la finestra in un'area per la vista (sottostante) e in un'area per la luce (sopra). La scelta, generalmente indipendente, del tipo di vetro nella finestra *claristorio* e nella finestra più bassa, usata per stabilire un contatto con l'esterno, ha influenza sui guadagni solari termici.

I light-shelves possono utilizzare sistemi ottici avanzati per portare la luce in profondità verso le zone più lontane dalla finestra. Generalmente sono impiegati per evitare l'abbagliamento e allo stesso tempo mantenere la vista verso l'esterno; la loro posizione è dettata dalla configurazione della stanza, dall'altezza del soffitto e dall'altezza degli occhi di una persona in piedi nella stanza. In generale, minore è l'altezza del light-shelf, maggiore sarà l'abbagliamento e la quantità di luce riflessa al soffitto.

Un light-shelf interno riduce la quantità di luce ricevuta all'interno dell'ambiente rispetto ad una finestra convenzionale; ha prestazioni limitate per quanto riguarda sia l'effetto schermante, che la riflessione diffusa. L'inserimento di un light-shelf all'interno di un edificio deve essere preso in considerazione all'inizio della fase progettuale, in quanto richiede un soffitto relativamente alto perché possa funzionare con una buona efficienza.

Un light-shelf esterno può far incrementare la quantità totale di luce diurna in ingresso in ambiente fino a valori confrontabili con quelli forniti dalle finestre tradizionali; presenta un buon effetto sia schermante che di antiabbagliamento, mentre i fenomeni di riflessione verso la parte dell'ambiente lontana dalla finestra risultano ridotti. Un light-shelf esterno presenta una maggiore superficie esposta alla zona di alta luminanza vicina allo zenit del cielo: a seconda della sua geometria, la luce diurna disponibile può risultare più uniformemente distribuita con un light-shelf esterno rispetto a una finestra non schermata di pari superficie.

In generale, i light-shelf mobili, specie se motorizzati, sono più costosi di quelli fissi, ma sono anche più flessibili per il controllo e l'applicazione.

I light-shelf devono essere progettati in funzione dell'orientamento di ogni finestra, configurazione della stanza, e latitudine. In Paesi con grande disponibilità di luce solare diretta, trovano applicazione in ambienti profondi con orientamento sud nell'emisfero nord (e viceversa); in caso di orientamento est-ovest, o in Paesi con condizioni di cielo prevalentemente nuvolose non risultano invece particolarmente vantaggiosi.

La tipologia, l'orientamento e il posizionamento di un light-shelf sono il risultato di un compromesso tra requisiti di schermatura da una parte, e di accessibilità della luce naturale dall'altra. Le prestazioni migliori sono assicurate da light-shelf interni/esterni, come risulta dalla Fig. 1.6.

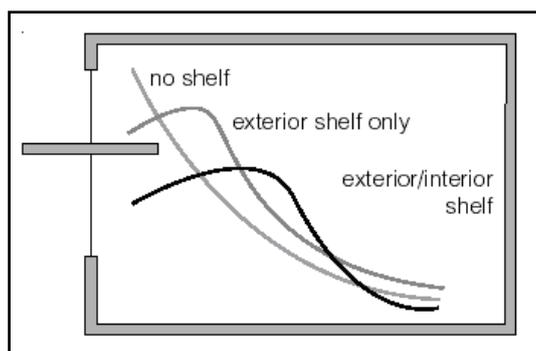


Figura 1.6. Gradiente di illuminamento in assenza e in presenza di un light-shelf

In termini di dimensionamento, la profondità della mensola interna dovrebbe essere almeno pari all'altezza della finestra superiore, la profondità dell'oggetto esterno dovrebbe essere pari alla sua altezza rispetto al piano di lavoro. Un'inclinazione delle mensole verso l'alto produce un miglioramento della penetrazione della luce riflessa, e una riduzione dell'effetto schermante; viceversa, un'inclinazione verso il basso produce un miglioramento dell'effetto schermante e una riduzione della penetrazione della luce riflessa.

L'altezza delle vetrate e la profondità del light-shelf devono essere scelte in funzione di latitudine e clima. A basse latitudini, la profondità di un light-shelf può essere relativamente estesa per bloccare la luce solare diretta che penetra attraverso la finestra *claristorio* in qualunque momento.

A latitudini maggiori (bassa elevazione solare), e in stanze con esposizione est/ovest, per evitare estensioni eccessive dell'elemento, si può lasciare che una certa quantità di luce solare diretta penetri all'interno degli ambienti, attraverso lo spazio tra il light-shelf e il soffitto, prevedendo dispositivi di schermatura aggiuntivi per limitare il rischio di fenomeni di abbagliamento. Aumentando la profondità della mensola, si riduce questo problema, ma si impedisce la penetrazione della luce diurna e la visuale verso l'esterno. La possibile soluzione di schermare la finestra inclinando la mensola verso il basso comporta una riduzione di luce riflessa sul soffitto. Un'inclinazione verso l'alto migliora in questi casi la penetrazione di luce diurna riflessa, riducendo gli effetti di schermatura del sistema. In generale, un light-shelf orizzontale rappresenta il miglior compromesso tra requisiti di schermatura e distribuzione di luce del giorno (Fig. 1.7).

Il soffitto rappresenta un'importante aspetto, di carattere secondario, del sistema light-shelf, in quanto la luce è riflessa dal light-shelf verso il soffitto e successivamente verso la stanza. La penetrazione della luce dipende quindi anche dalla pendenza del soffitto: nel caso di soffitti piatti la luce è prevalentemente riflessa nello spazio circostante la finestra, con una penetrazione all'interno molto più limitata.

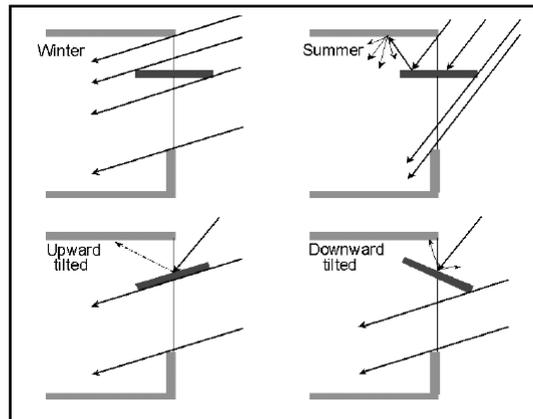


Figura 1.7. Funzionamento di un light-shelf

La finitura del light-shelf ne influenza l'efficienza e il direzionamento della luce verso il soffitto: una finitura opaca produce una riflessione diffusa (non direzionale), mentre con una finitura altamente riflettente la radiazione viene riflessa con un angolo praticamente uguale a quello incidente (riflessione speculare). Una finitura semi-speculare può talvolta risultare la soluzione migliore. Una possibilità alternativa può essere quella di trattare il light-shelf con film prismatico riflettente, che consente alla luce di arrivare più in profondità all'interno della stanza.

Una versione semplice di light-shelf orientabile in base alla posizione solare o alla luminanza del cielo è il light-shelf esterno mobile, in grado di ruotare attorno al suo asse orizzontale (Fig. 1.8).



Figura 1.8. Esempio di light-shelf mobile esterno.

Nuovi tipi di light-shelf sono poi stati sviluppati nel corso degli anni, con nuove caratteristiche e componenti migliorative rispetto alle soluzioni tradizionali, come i light-shelf trattati otticamente e i light-shelf ad inseguimento solare.

La quantità totale di luce diurna può essere accresciuta usando un light-shelf esterno, in misura maggiore o minore a seconda della geometria della mensola e del trattamento della superficie. In generale, la maggior parte dei light-shelf tradizionali non producono alti livelli di illuminamento in profondità all'interno di un ambiente, così i risparmi energetici sono modesti. Invece una stanza in cui viene applicato un light-shelf trattato otticamente usa un quantitativo minore di elettricità annua totale per l'illuminazione rispetto ad una stanza in cui è applicato un light-shelf convenzionale.

I light-shelf necessitano di una pulizia regolare. Nel caso di light-shelf trattati otticamente, dal momento che questi sono completamente sigillati, non richiedono altra manutenzione ordinaria oltre alla pulizia del vetro esterno e interno.

Nelle Fig. 1.9 e 1.10 sono illustrate due applicazioni di light-shelf a edifici pubblici.



Figura 1.9. Biblioteca pubblica Airy, Chicago (USA)



Figura 1.10. Scuola Fay, Southborough, Maryland (USA)

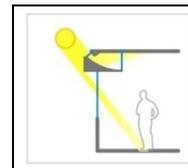
Riassumendo:

le mensole orizzontali riflettenti (o light-shelf) sono un elemento schermante che può essere **esterno, interno, interno/esterno, fisso o mobile, continuo, speculare o diffondente**, orizzontale o inclinato. L'orientamento ottimale di questi elementi schermanti situati nelle finestre verticali, è a **sud**. Risulta efficiente con elevate altezze solari e condizioni di cielo sereno. In Tab. 1.2 sono indicati i vantaggi e gli svantaggi del sistema.

Tabella 1.2. Vantaggi e svantaggi del light-shelf.

Vantaggi	Svantaggi
Riduzione carichi termici in estate	Possibili problemi di abbagliamento in inverno per le ore a bassa altezza solare: prestazioni inefficienti per facciate esposte ad est e ad ovest
Sfruttamento dei guadagni solari in inverno	Malfunzionamento del sistema in condizioni di cielo coperto: disuniforme distribuzione e ridotta disponibilità di luce naturale
Protezione dall'abbagliamento in estate e in inverno	Tecnologia adatta per ambienti di una certa altezza (almeno 3.5m)
Uniforme distribuzione della luce diurna	Problemi di pulizia e manutenzione
Elevata disponibilità di luce naturale	
Ridirezionamento della luce naturale in profondità verso le zone più lontane dalla finestra	
Vista verso l'esterno	
Risparmi energetici sulla luce artificiale	
Aspetto estetico-architettonico	
Possibilità di integrazione con gli altri sistemi di un edificio esistente (retrofitting) a condizione che il sistema possa adattarsi alle caratteristiche architettoniche preesistenti	
Per light-shelf trattati otticamente	
Schermatura della luce solare diretta a tutte le ore	
Aumento del livello di illuminamento fino a 10m a partire dalla parete della finestra	
Miglioramento dell'uniformità della luce diurna e del gradiente di luminanza in tutta la stanza in condizioni variabili di luce solare diretta	
Maggiori risparmi energetici sulla luce artificiale	
Tecnologia adatta per ambienti di altezza maggiore di 2.5m	
Interventi di pulizia e manutenzione ordinari	
Per light-shelf ad inseguimento solare	
Schermatura della luce solare diretta a tutte le ore	
Miglioramento dell'uniformità della luce diurna e del gradiente di luminanza in tutta la stanza in condizioni variabili di luce solare diretta	
Maggiori risparmi energetici sulla luce artificiale	
Interventi di pulizia e manutenzione ordinari	

1.1. Light-shelf trattato otticamente (Light-shelf optically treated)



I light-shelf trattati otticamente offrono due significativi miglioramenti rispetto ai light-shelf di tipo convenzionale utilizzati nei Paesi soleggiati:

- 1) la geometria di tipo curvo e segmentato del light-shelf riflette passivamente la luce solare per altitudini solari specifiche;
- 2) i film ottici semispeculari, dotati di elevato potere riflettente, possono incrementare l'efficienza complessiva.

Un light-shelf trattato otticamente è composto da un riflettore principale inferiore e un riflettore secondario superiore (Fig. 1.11). Il riflettore inferiore segmentato è composto da superfici inclinate rifinite con un film, provvisto di scanalature lineari che riflettono la luce solare entro un angolo di uscita di 12°-15° rispetto all'incidenza normale alle scanalature; i segmenti sono inclinati per favorire la riflessione della radiazione sul soffitto. Il riflettore superiore è posto sopra il riflettore principale sul piano del soffitto vicino la finestra, per intercettare la luce entrante a bassi angoli solari in inverno e rifletterne i raggi verso il riflettore principale inferiore. Questo riflettore è rivestito con un film speculare altamente riflettente e può a volte diventare una piccola fonte di abbagliamento.

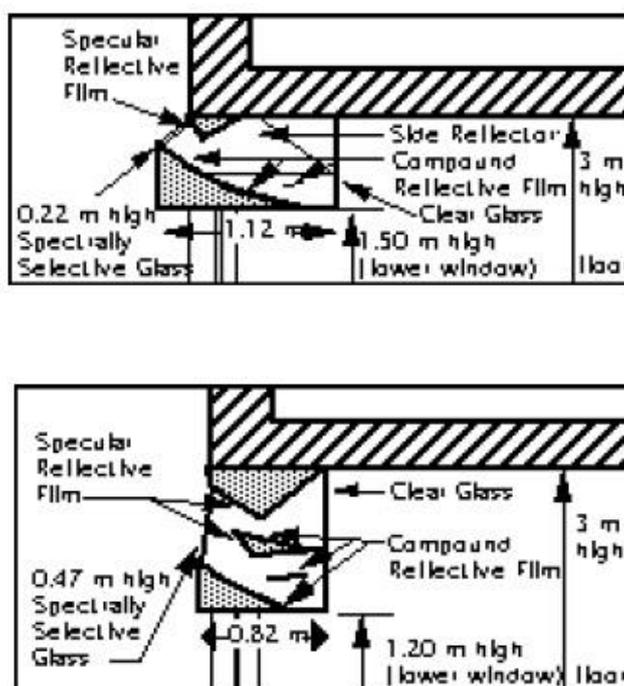
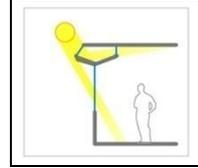


Figura 1.11. Light shelf trattato otticamente ad un livello (in alto) e a due livelli (in basso)

Nell'applicazione di questi elementi, si considerano come obiettivi progettuali: bloccare la luce solare diretta per tutte le ore del giorno, aumentare il livello di illuminamento della luce diurna fino a 10m dalla parete della finestra, minimizzare il guadagno termico solare attraverso un adeguato dimensionamento delle finestre, migliorare l'uniformità di distribuzione della luce diurna e il gradiente di luminanza in tutta la stanza in condizioni variabili di luce solare diretta. Nessun aggiustamento o controllo attivo è richiesto o previsto.

Per l'applicazione a finestre verticali, un efficiente comportamento del sistema richiede un'altezza della stanza, dal pavimento al soffitto, maggiore di 2.5 m. È possibile disegnare ed adattare un light-shelf trattato otticamente agli edifici esistenti, anche se deve essere fatto con molta attenzione per integrarlo alle caratteristiche architettoniche preesistenti.

1.2. Light-shelf ad inseguimento solare (Sun-tracking Light-shelf)



Un sistema light-shelf ad inseguimento solare è rappresentato da una superficie a geometria variabile che riflette la luce (Fig. 1.12). Il sistema usa una superficie con un film plastico riflettente sistemato su un assemblaggio composto da un rullo che scorre per seguire il percorso solare, posto all'interno di un light-shelf fisso. La superficie equipaggiata con il film può assumere diverse posizioni a seconda dell'angolo di incidenza della radiazione solare.

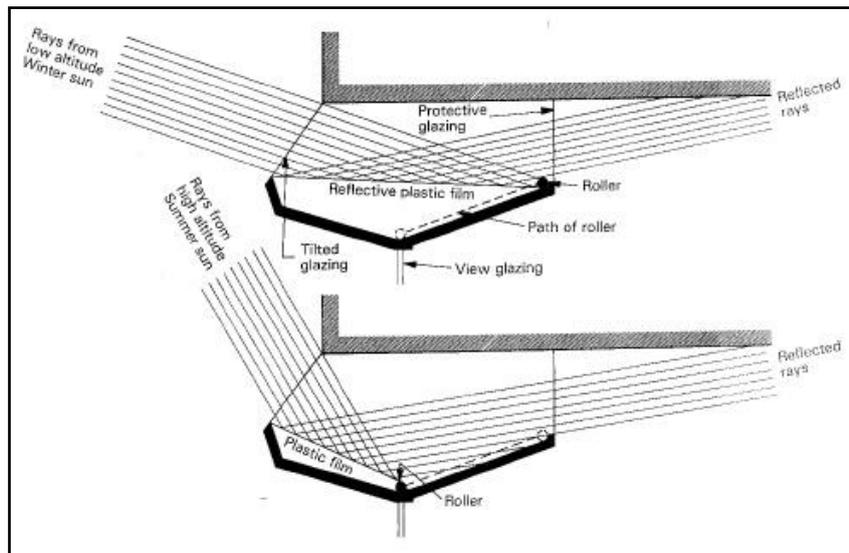
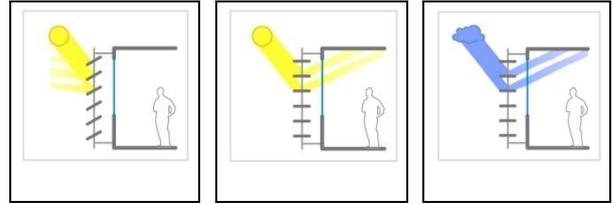


Figura 1.12. Schema di un light-shelf ad inseguimento solare

Questo sistema estende le capacità di un light-shelf fisso in quanto funziona per tutti gli angoli solari. Tuttavia, fino ad oggi, non è stato mai installato in un edificio.

2. LAMELLE (Louvers)



Le lamelle sono un sistema di daylighting classico che può essere applicato per la schermatura solare, per proteggere contro l'abbagliamento e per riorientare la luce.

Le lamelle sono un tipo di sistema costituito da una successione di stecche, eventualmente inclinate, orizzontali o verticali, realizzate solitamente in materiale metallico, disposte verticalmente lungo una struttura che le sostiene, caratterizzate da sezioni anche molto diverse (ellissoidale, circolare, a "C", ecc.).

Esistono vari tipi di lamelle, alcune delle quali fanno uso di forme e finiture di superficie molto sofisticate. Rappresentano un sistema di controllo che consente di schermare gli ambienti dalla radiazione solare proveniente dal sole in posizione sia alta che bassa sull'orizzonte. Le stecche possono essere sia piane che curve e sono generalmente disposte ad intervalli regolari ad una distanza che è inferiore alla loro larghezza, cosicché esse si sovrappongono quando sono chiuse. A seconda dell'inclinazione delle stecche, le lamelle possono impedire parzialmente o del tutto la visione verso l'esterno. Quindi molti tipi di lamelle sono progettate per essere totalmente o parzialmente ritratte.

Le lamelle possono essere utilizzate con ogni orientamento e a tutte le latitudini e possono essere apposte ad una finestra ogni qualvolta lo si ritenga necessario, tenendo conto che sistemi esterni influenzano il design architettonico e strutturale dell'edificio. In pratica le lamelle orizzontali sono utilizzate con ogni orientamento, mentre le verticali sono utilizzate per lo più per finestre rivolte verso est o verso ovest. Disegni innovativi rispetto a quelli convenzionali presentano diversi requisiti.

Le lamelle possono ostacolare, assorbire, riflettere e/o trasmettere la radiazione solare (diffusa e diretta) all'interno dell'edificio. I loro effetti dipendono dalla posizione del Sole, dall'angolo delle stecche, e dalle caratteristiche di riflettanza della superficie delle stecche. Per questo, le proprietà termiche e ottiche di una finestra equipaggiata con lamelle sono altamente variabili. Le lamelle possono aumentare la penetrazione della luce diurna proveniente dalla luce solare diretta, mentre quando il cielo è coperto promuovono una distribuzione uniforme della luce diurna. In condizioni soleggiate, alcuni sistemi permettono di incrementare la penetrazione della luce diurna, ridurre i carichi dovuti al raffreddamento, rendere più uniforme la variazione tra le condizioni di luce dell'area prossima alla finestra (generalmente più luminosa) e la zona più interna (generalmente più buia). Costi e risparmio energetico sono correlati ad un uso più efficiente della luce senza avere effetti indesiderati (come ad esempio l'aumento dei carichi termici solari).

I sistemi fissi sono generalmente progettati per schermare il sole: sono posizionati cioè secondo un'angolazione studiata sulla base dei percorsi solari. I sistemi regolabili invece possono essere usati per controllare i guadagni termici, proteggere dall'abbagliamento e ridirezionare la luce

diurna, gli elementi che li costituiscono possono essere ruotati nel corso della giornata in modo da risultare sempre normali ai raggi del sole. I sistemi mobili devono essere completamente o parzialmente retraibili per operare in maniera ottimale in funzione delle condizioni esterne. A seconda dell'angolo delle stecche, del loro trattamento superficiale, della distanza tra di esse, sia la luce solare che la luce del cielo possono essere riflesse all'interno.

Le lamelle possono essere azionate sia manualmente che automaticamente. In particolare, i sistemi automatici possono aumentare l'efficienza energetica, se controllati in modo da ridurre il guadagno solare e far entrare la luce diurna nel corso delle variazioni della posizione del Sole sia giornaliera che stagionale. Sistemi a controllo manuale hanno generalmente una efficienza energetica inferiore in quanto gli utilizzatori non sono necessariamente in grado di utilizzarle al meglio.

La manutenzione può risultare difficoltosa specialmente quando hanno stecche riflettenti.

Nelle Fig. 1.13 e 1.14 sono illustrati due esempi di applicazione dei sistemi a lamelle.



Figura 1.13. Sistema a lamelle mobili della Ambasciata dei Paesi Scandinavi, Berlino



Figura 1.14. Applicazione di lamelle fisse di grandi dimensioni

Riassumendo:

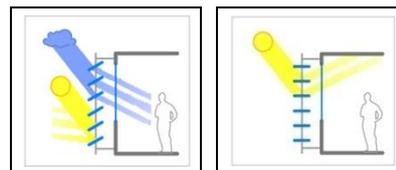
è una tipologia di sistema **esterna, fissa o mobile, discontinua, speculare o diffondente**, verticale. Le lamelle possono essere posizionate sia su finestre verticali che su lucernari e coperture trasparenti, con risultati ottimali per tutti gli orientamenti: **est, sud/est, sud, sud/ovest, ovest** per lamelle con stecche orizzontali (ma nel caso di lamelle con stecche verticali il sistema è efficace solo per finestre esposte ad **est o ovest**). È un sistema efficiente a tutte le altezze solari (solo con basse altezze solari se le stecche sono verticali), e tutte le condizioni di cielo. In Tab. 1.3 sono indicati i vantaggi e gli svantaggi del sistema.

Tabella 1.3. Vantaggi e svantaggi delle lamelle.

Vantaggi	Svantaggi
Riduzione carichi termici in estate	Scarso sfruttamento dei guadagni solari in inverno (lamelle chiuse)
Sfruttamento dei guadagni solari in inverno (lamelle aperte)	Possibili problemi di abbagliamento
Protezione dall'abbagliamento in estate e in inverno	La parte dell'ambiente più lontana dalle finestre rimane buia (specie se si usano lamelle tradizionali o se vengono messe in posizione molto inclinata)
Ridirezionamento della luce naturale in profondità nella stanza	Ridotta disponibilità di luce naturale (lamelle chiuse o condizioni di cielo coperto)
Uniforme distribuzione della luce diurna	Vista verso l'esterno ridotta (soprattutto se le lamelle sono orientabili: queste potrebbero essere anche in posizione chiusa o molto inclinata) ad eccezione delle lamelle in vetro
Elevata disponibilità di luce naturale	Manutenzione frequente e delicata
Aspetto estetico-architettonico	Possibili problemi meccanici dovuti all'azione del vento
Possibilità per sistemi mobili di regolazione del flusso di luce entrante e di flessibilità nel seguire il movimento del sole	Possibile rumorosità dovuta alla vibrazione delle lamelle causata dal vento
Flessibilità di applicazione	
Possibilità di integrazione con gli altri sistemi di un edificio esistente (retrofitting)	
Per lamelle in vetro	
Vista verso l'esterno	
Aumento dell'ingresso di luce naturale come luce diffusa	
Risparmi energetici sull'illuminazione artificiale	
Per lamelle con sistema fotovoltaico integrato	
Possibilità di assorbire la luce solare e convertirla in energia termica o elettrica	Soluzioni applicabili solo in climi caldi, caratterizzati da frequenti condizioni di soleggiamento durante il corso dell'anno
Risparmi energetici per la riduzione del consumo di energia elettrica (grazie alla produzione di energia data dai pannelli fotovoltaici)	Costo elevato

Oltre ai sistemi tradizionali descritti, ci sono diversi altri tipi di lamelle, con caratteristiche differenti a seconda dello scopo che si prefiggono.

2.1. Lamelle in vetro (Glass louvers)



Si tratta di un tipo di frangisole esterno costituito da lamelle fisse o mobili realizzate in vetro o in materiale trasparente che possono essere regolate manualmente o attraverso un sistema automatizzato (Fig. 1.15). Sulla faccia superiore delle lamelle che costituiscono il frangisole, solitamente viene applicata una pellicola riflettente che fa in modo di ridirezionare la radiazione solare incidente verso il soffitto e, attraverso questo, ridistribuirlo in profondità nell'ambiente come luce diffusa. Viene posizionata sulle finestre verticali. L'orientamento ideale è est, sud/est, sud/ovest, ovest.



Figura 1.15. Frangisole a lamelle di vetro

2.2. Lamelle con sistema fotovoltaico integrato (Louvers with integrated photovoltaic system)

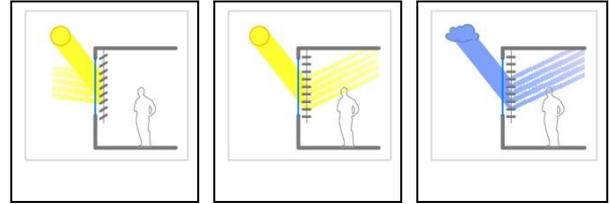
Sistema identico alle normali lamelle, con la differenza che in queste vengono inseriti dei moduli fotovoltaici. L'orientamento migliore è sud, sud/ovest. Il sistema funziona in modo ottimale a latitudini con elevate altezze solari e in condizioni di cielo sereno. È un tipo di sistema che può tranquillamente essere inserito in edifici già esistenti o di nuova realizzazione, perché l'insieme risultante è indipendente dal fabbricato.

Al fine di ottenere la massima funzionalità del sistema è necessario inclinare le lamelle in modo tale da raggiungere un buon compromesso tra il ricevere al meglio la luce solare (con una posizione il più possibile ortogonale rispetto alla radiazione solare incidente) e garantire un'efficace azione di ombreggiamento (Fig. 1.16).



Figura 1.16. Sistema a lamelle con fotovoltaico integrato: lato esterno (sinistra) e lato interno (destra)

3. TENDE VENEZIANE (Blinds)



Le tende sono sistemi di daylighting classici che possono essere applicati per la schermatura solare, per proteggere contro l'abbagliamento e per riorientare la luce.

Le tende veneziane sono costituite da una serie di stecche in materiale plastico o metallico o in legno che possono essere sia traslate verticalmente (alzate o abbassate), che orizzontalmente (solo nel caso in cui le stecche siano verticali), sia inclinate (manualmente o meccanicamente). Le stecche possono essere sia piane che curve e sono generalmente disposte ad intervalli regolari ad una distanza che è inferiore alla loro larghezza, cosicché esse si sovrappongono quando sono chiuse. La loro dimensione varia a seconda di dove vengono posizionate: all'esterno, all'interno o tra due vetri.

Tale sistema presenta una grande flessibilità al variare delle condizioni di luce naturale presenti, data dalle molteplici possibilità di movimento. Permette una regolazione graduale fino ad ottenere un completo oscuramento, in modo tale da offrire sempre un'efficace azione di schermatura e salvaguardia della privacy (Fig. 1.17). Esistono vari tipi di tende, alcuni dei quali fanno uso di forme e finiture di superficie molto sofisticate.



Figura 1.17. Particolare di una tenda veneziana

Le tende sono posizionate all'interno o tra due vetri. A seconda dell'inclinazione delle stecche, le tende possono impedire, parzialmente o del tutto, la visione verso l'esterno. Quindi molti tipi di tende sono progettate per essere totalmente o parzialmente ritratte.

In condizioni soleggiate, le tende possono produrre linee estremamente brillanti lungo le stecche che causano fenomeni di abbagliamento. Con tende poste secondo un angolo orizzontale sia la

luce solare diretta che quella diffusa del cielo possono aumentare l'abbagliamento della finestra dovuto all'accresciuto contrasto di luminanza tra le stecche e le superfici adiacenti delle pareti. Inclinando le tende verso l'alto aumenta l'abbagliamento ma anche la visibilità del cielo; inclinandole verso il basso si fornisce l'ombreggiamento e si riducono i problemi di abbagliamento.

Le tende possono essere utilizzate con ogni orientamento e a tutte le latitudini e possono essere apposte ad una finestra ogni qualvolta lo si ritenga necessario. Sistemi esterni influenzano il design architettonico e strutturale dell'edificio, mentre quelli interni hanno un minore impatto. In pratica le tende orizzontali sono utilizzate con ogni orientamento mentre le tende verticali sono utilizzate per lo più per finestre rivolte verso est o verso ovest. Disegni innovativi rispetto a quelli delle tende convenzionali presentano diversi requisiti.

Le tende possono ostacolare, assorbire, riflettere e/o trasmettere la radiazione solare (diffusa e diretta) all'interno dell'edificio. I loro effetti dipendono dalla posizione del Sole, dalla loro collocazione (esterna o interna), dall'angolo delle stecche, e dalle caratteristiche di riflettanza della superficie delle stecche. Per questo, le proprietà termiche e ottiche di una finestra equipaggiata con tende sono altamente variabili. Le tende possono aumentare la penetrazione della luce diurna proveniente dalla luce solare diretta, mentre quando il cielo è coperto promuovono una distribuzione uniforme della luce diurna. In condizioni soleggiate, alcuni sistemi permettono di incrementare la penetrazione della luce diurna, ridurre i carichi dovuti al raffreddamento, rendere più uniforme la variazione tra le condizioni di luce dell'area prossima alla finestra (generalmente più luminosa) e la zona più interna (generalmente più buia). Costi e risparmio energetico sono correlati ad un uso più efficiente della luce senza avere effetti indesiderati (come ad esempio l'aumento dei carichi termici solari).

I sistemi fissi sono generalmente progettati per schermare il sole: sono posizionati cioè secondo un'angolazione studiata sulla base dei percorsi solari. I sistemi regolabili invece possono essere usati per controllare i guadagni termici, proteggere dall'abbagliamento e ridirezionare la luce diurna, gli elementi che li costituiscono possono essere ruotati nel corso della giornata in modo da risultare sempre normali ai raggi del Sole. Sistemi mobili devono essere completamente o parzialmente retraibili per operare in maniera ottimale a seconda delle condizioni esterne. A seconda dell'angolo delle stecche, del loro trattamento superficiale, della distanza tra di esse, sia la luce solare che la luce del cielo possono essere riflesse all'interno.

Le tende possono essere azionate sia manualmente che automaticamente. In particolare, i sistemi automatici possono aumentare l'efficienza energetica, se controllati in modo da ridurre il guadagno solare e far entrare la luce diurna nel corso delle variazioni della posizione del Sole sia giornaliera che stagionale. Sistemi a controllo manuale hanno generalmente una efficienza energetica inferiore in quanto gli utilizzatori non sono necessariamente in grado di utilizzarle al meglio. Nel caso di tende veneziane convenzionali, non c'è vantaggio nel controllo dell'abbagliamento nel chiudere le stecche oltre 45°, mentre ci sono svantaggi significativi in termini di livelli di illuminamento della stanza.

La manutenzione delle tende può essere difficoltosa specialmente quando hanno stecche riflettenti. I sistemi chiusi tra due vetri hanno il vantaggio di richiedere una pulizia minore e di correre meno rischi di essere danneggiati rispetto ai sistemi esterni e interni.

Nelle Fig. 1.18 e 1.19 sono illustrate delle applicazioni del sistema.



Figura 1.18. Tower Credit Lyonnais, Lille, Francia



Figura 1.19. World Port Center, Rotterdam, Olanda

Riassumendo:

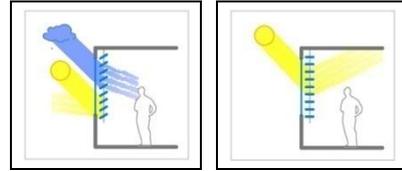
le tende veneziane sono una tipologia di schermatura che può essere **esterna, interna** e anche montata **in intercapedine, mobile** e, se esterna, anche **fissa, discontinua, speculare e diffondente**, verticale. Vengono posizionate su finestre verticali e lucernari. Sono utilizzate con ogni orientamento: **est, sud/est, sud, sud/ovest, ovest** (le tende con stecche verticali invece sono utilizzate per lo più per finestre rivolte verso **est** o verso **ovest**). È un sistema efficiente con tutte le altezze solari e tutte le condizioni di cielo. In Tab. 1.4 sono indicati i vantaggi e gli svantaggi del sistema.

Tabella 1.4. Vantaggi e svantaggi delle tende veneziane.

Vantaggi	Svantaggi
Riduzione carichi termici in estate (ad esclusione del fish system)	Scarsa riduzione dei carichi termici in estate (lamelle interne)
Sfruttamento dei guadagni solari in inverno (lamelle aperte o tirate su, veneziana selettiva)	Scarso sfruttamento dei guadagni solari in inverno (lamelle chiuse)
Protezione dall'abbagliamento in estate e in inverno	Possibili problemi di abbagliamento
Direzionamento della luce naturale in profondità nella stanza	La parte dell'ambiente più lontana dalle finestre rimane buia (se si usa una veneziana tradizionale o se viene messa in posizione molto inclinata)
Illuminazione uniforme	Ridotta disponibilità di luce naturale (lamelle chiuse o condizioni di cielo coperto)
Elevata disponibilità di luce naturale	Vista verso l'esterno limitata (soprattutto se le lamelle sono chiuse o molto inclinate)- ad eccezione delle tende traslucide
Flessibilità d'impiego	Degrado del materiale e del colore nel tempo
Possibilità di integrazione con gli altri sistemi di un edificio esistente (retrofitting)	Frequenti e delicati interventi di pulizia e manutenzione (ad eccezione dei sistemi in intercapedine)
Per tende traslucide	
Vista verso l'esterno	
Aumento dell'ingresso di luce naturale come luce diffusa	
Risparmi energetici sull'illuminazione artificiale	
Per sistema Fish	
	Necessità di schermature aggiuntive quando i guadagni termici e l'immissione della luce solare devono essere limitati
Per veneziana selettiva	
	Costo elevato

Oltre ai sistemi tradizionali descritti, esistono diversi altri tipi di tende veneziane, con caratteristiche differenti a seconda dello scopo che si prefiggono.

3.1. Tende traslucide (Translucent blinds) [1]



Le lamelle possono essere trasparenti, realizzate in materiale prismatico diffondente in modo da aumentare l'ingresso di luce naturale come luce diffusa, uniforme e non abbagliante. In questo caso, il sistema assume il nome di tenda traslucida.

Le tende traslucide trasmettono una frazione di luce anche quando sono chiuse, consentendo così un maggiore ingresso di luce rispetto alle tende tradizionali. Il loro scopo è infatti quello di controllare l'abbagliamento facendo entrare allo stesso tempo più luce diffusa degli altri sistemi. Nella scelta e nel posizionamento, va comunque posta attenzione affinché non diventino una fonte secondaria di abbagliamento: in controluce esse possono infatti agire come una ampia superficie luminosa ad elevata luminanza, e pertanto risultare fonte di abbagliamento.

3.2. Lamelle che direzionano la luce (Light-directing louvers) [1]

Alcune tipologie innovative di tende veneziane sono dotate di lamelle rifinite superiormente in materiale riflettente con la funzione di ridirezionare la radiazione solare verso il soffitto e quindi in ambiente come luce diffusa (è importante che queste, così come il soffitto, siano di colore chiaro). Altri tipi di veneziana presentano una riflessione di tipo speculare solo nelle lamelle della parte superiore, mentre quelle della parte inferiore hanno una riflessione di tipo diffondente per evitare possibili problemi di abbagliamento. Tali lamelle presentano generalmente una superficie superiore ricoperta da materiale altamente riflettente, che talvolta ha delle perforazioni, e una curvatura concava dei profili che serve per ottimizzare le direzioni di riflessione. Questi sistemi sono usualmente posti tra due vetri: sono progettati per riflettere la massima quantità di luce possibile verso il soffitto, mentre producono una luminosità molto scarsa nel caso di radiazioni incidenti con angolo inferiore all'orizzontale (Fig. 1.20).

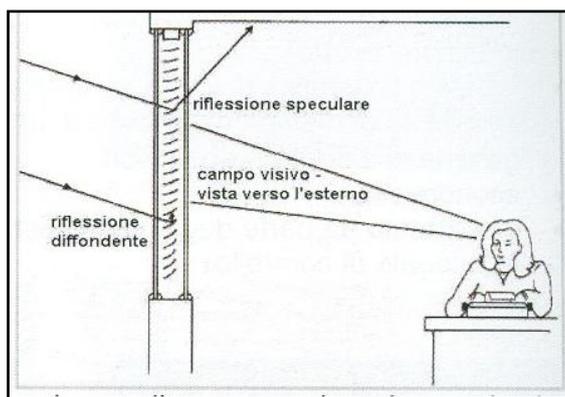
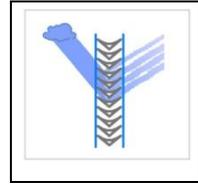


Figura 1.20. Schema di una veneziana innovativa in vetrocamera

Il comportamento complessivo risulta esaltato se viene realizzata una facciata a “doppia pelle”, con un livello interno a tenuta rispetto agli agenti atmosferici integrato da un livello esterno costituito da moduli fotovoltaici opachi. La doppia parete assicura la ventilazione e la dispersione del calore prodotto dal surriscaldamento dei pannelli solari.

Tra i diversi tipi, si distinguono il fish system e la veneziana selettiva.

3.2.1. Sistema Fish (Fish system) [1]



Il sistema “Fish” è un sistema fisso costituito da lamelle orizzontali di sezione triangolare e concavità rivolta verso l’alto, che viene impiegato solo per finestre verticali. E’ progettato per limitare l’abbagliamento e per ridirezionare la luce diffusa; schermature aggiuntive sono necessarie quando i guadagni termici e l’immissione della luce solare devono essere limitati. Le lamelle sono progettate in modo che la luce proveniente dalla parte superiore del cielo venga trasmessa alla parte alta della stanza (soffitto) (Fig. 1.21).

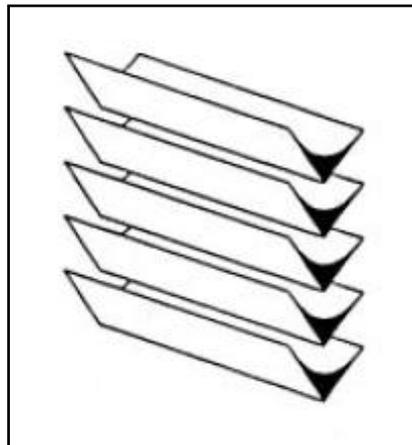
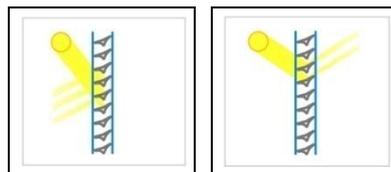


Figura 1.21. Assonometria di un sistema Fish.

3.2.2. La veneziana selettiva (Okasolar system) [1]



La veneziana selettiva (Fig. 1.22), detta anche sistema “Okasolar”, è un sistema fisso, costituito da numerose lamelle schermanti a 3 facce in alluminio altamente riflettente, poste tra due vetri, alla stessa distanza l’una dall’altra. La particolare forma ed inclinazione delle lamelle, diverso a seconda della latitudine a cui dovranno operare, permette l’ingresso di una quantità di radiazione solare diretta variabile in funzione dell’altezza solare: il sistema risulta infatti opaco ai raggi provenienti dal sole alto nel cielo (estate) che vengono assorbiti e riflessi verso l’esterno, e trasparente ai raggi provenienti dal sole basso nel cielo (inverno) che vengono deviati verso il soffitto. Il sistema è quindi realizzato in maniera tale da avere un effetto schermante in estate, e da riflettere la luce verso il soffitto in inverno.

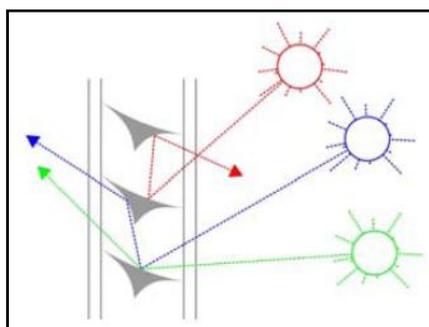
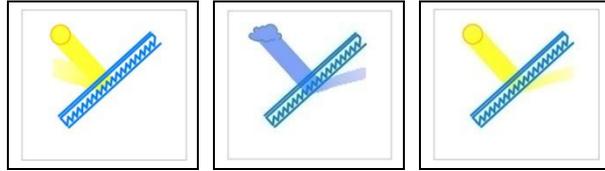


Figura 1.22. Veneziana selettiva

4. PANNELLI PRISMATICI (Prismatic panels)



I pannelli prismatici sono dispositivi sottili, piani, costituiti da una griglia di prismi trasparenti fatti in materiale acrilico chiaro, con sezione a dente di sega. Un pannello lineare prismatico è composto da una serie di prismi acrilici ognuno dei quali ha una superficie piana nota come appoggio del prisma (che forma insieme alle altre una grande superficie piana che costituisce uno dei due lati del pannello). All'altro lato del pannello ci sono due angoli rifrangenti. Molto spesso sono inseriti all'interno di un doppio vetro sigillato, ma a volte possono essere applicati anche su superfici vetrate, internamente. La sistemazione in intercapedine presenta alcuni vantaggi come la protezione dall'umidità e una maggiore rigidità meccanica. Al momento, esistono due diversi processi di produzione:

1. la modellatura a iniezione: i pannelli prismatici sono prodotti in quattro differenti configurazioni, cioè con quattro differenti inclinazioni dei denti in modo tale che si formino quattro diversi angoli di rifrazione della luce incidente (Fig. 1.23), dal polimero acrilico. Alcuni pannelli sono ricoperti parzialmente con uno strato sottile di alluminio e di conseguenza hanno un'alta riflettanza speculare sulla superficie di ogni prisma.
2. l'acquaforte specializzata: questo processo produce prismi che sono distanti meno di un millimetro. Il film acrilico risultante è leggero pur avendo tuttavia ancora buone proprietà ottiche. Lo strato sottile che si ottiene può essere applicato all'interno di un doppio vetro.

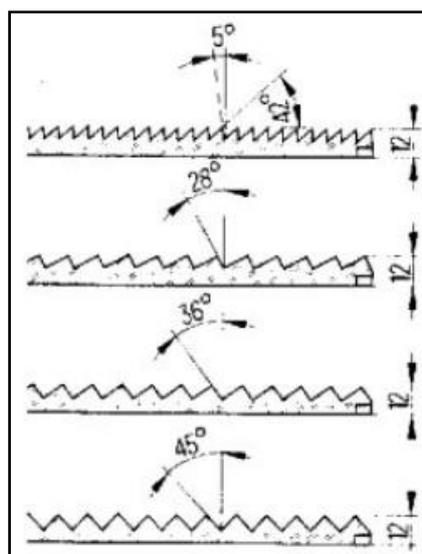


Figura 1.23. Tipi di pannelli prismatici disponibili in commercio.

I pannelli prismatici hanno due funzioni molto diverse:

- 1) schermatura solare
- 2) ridirezionamento della luce del giorno.

In generale, vengono usati in climi temperati per ridirezionare e rifrangere la luce del giorno. Quando invece vengono usati come sistema di schermatura, riflettono la luce diretta del sole e trasmettono la luce diffusa del cielo, che viene rifratta verso il soffitto.

Come sistema di schermatura solare, tali sistemi possono essere fissi o mobili. L'applicazione come sistema fisso è tipica dei tetti vetrati. La struttura prismatica è progettata conformemente al movimento del Sole, e i pannelli sono inseriti all'interno di un doppio vetro. Se i pannelli prismatici vengono usati come dispositivi di schermatura solare in una configurazione fissa, dei componenti aggiuntivi, come una lastra di vetro incisa all'acquaforte (poco diffondente) dietro al sistema, si rendono necessari per evitare la dispersione di colore. Per un'applicazione come sistema mobile, invece, i pannelli prismatici sono usati in forma di lamelle, posizionate davanti o dietro il doppio vetro in una sistemazione verticale o orizzontale (un doppio vetro non è in questo caso necessario). Quando i pannelli prismatici sono applicati come sistema di schermatura solare mobile, è generalmente richiesto un allineamento automatico dei pannelli lungo un'asse, in base al movimento del Sole.

Come sistema di direzionamento della luce, i pannelli prismatici possono essere usati per condurre la luce diffusa del giorno o la luce solare diretta (Fig. 1.24). Nel caso in cui si consideri la luce diffusa del giorno, i pannelli prismatici sono normalmente usati sul piano verticale della facciata per indirizzare la luce che viene dal cielo verso la metà superiore della stanza, generalmente il soffitto; allo stesso tempo, i pannelli riducono la luminosità della finestra. Con questo profilo, i pannelli funzionano meglio come sistema schermante antiabbagliamento con funzione simultanea di direzionamento della luce. Per facciate esposte al sole, comunque, è necessaria una schermatura solare aggiuntiva da porre di fronte ai pannelli. I pannelli prismatici possono però anche essere usati per direzionare la luce solare in un ambiente: per evitare l'abbagliamento, causato dalla possibilità dei pannelli di ridirezionare parte della luce solare verso il basso, e la dispersione di colore, sono essenziali il corretto profilo ed un'inclinazione dei pannelli diversa in funzione della stagione.

La funzione principale di una vetrata prismatica che direziona la luce è di raggiungere una buona profondità di penetrazione della luce naturale. Il pannello prismatico fa uso sia della riflessione che della rifrazione per utilizzare la luce diurna all'interno degli edifici. Il sistema può essere progettato in modo tale da riflettere la luce che proviene da una certa gamma di angoli, mentre trasmette la luce che proviene da altri angoli. Le frazioni di luce riflessa e rifratta dipendono dall'angolo di incidenza, dagli indici di rifrazione, dallo stato di polarizzazione della luce incidente. Per una penetrazione profonda della luce solare, un pannello prismatico deve adattarsi ad un'ampia gamma di altitudini solari. La luce rifratta si manifesta ad un angolo minore di 15° sopra

l'orizzonte, per ottenere la massima penetrazione senza creare raggi discendenti di luce solare che possono provocare abbagliamento. La performance del pannello è quindi determinata da un'appropriata configurazione degli angoli di rifrazione. Una configurazione specifica per il profilo prismatico è di solito richiesta per differenti situazioni geometriche e geografiche, per ottenere alti livelli di illuminamento sul fondo della stanza. Per ottimizzare le prestazioni del sistema, il soffitto deve essere caratterizzato da una superficie ad alta riflessione in particolare nella zona vicino la finestra (fino approssimativamente ad 1/3 della profondità della stanza).

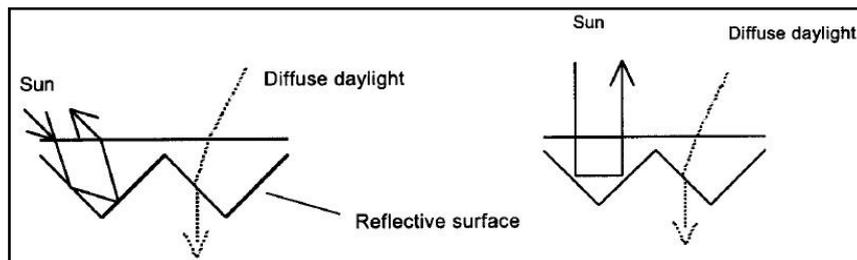


Figura 1.24. Comportamento della componente diretta e diffusa della luce diurna in un pannello prismatico che scherma la luce solare fisso (sinistra) e mobile (destra).

Affinché si comportino in maniera ottimale, i pannelli vanno disposti secondo superfici inclinate, in modo che la radiazione solare diretta incidente li colpisca perpendicolarmente. La loro applicazione ideale quindi è nelle coperture inclinate o nei sistemi mobili. I pannelli prismatici trovano inoltre limitata applicazione in climi dominati da condizioni di cielo coperto.

Rivestendo le singole superfici di un prisma con pellicole ad alta riflessione luminosa si sono ampliate le potenzialità dei sistemi prismatici; tuttavia, il costo ancora elevato è un importante barriera all'uso dei pannelli.

I pannelli prismatici, essendo collocati all'interno di un doppio vetro, non richiedono nessun altro intervento di manutenzione oltre la normale pulizia delle superfici vetrate esterna e interna. Se invece i pannelli sono esposti, la loro pulizia deve essere eseguita con molta cautela per non danneggiare le superfici ottiche e quindi comprometterne l'efficienza. Nelle Fig. 1.25 e 1.26 sono riportati due esempi di edifici pubblici che impiegano pannelli prismatici.



Figura 1.25. Edificio del Parlamento Tedesco, Bonn, Germania



Figura 1.26. Design Center, Linz, Austria

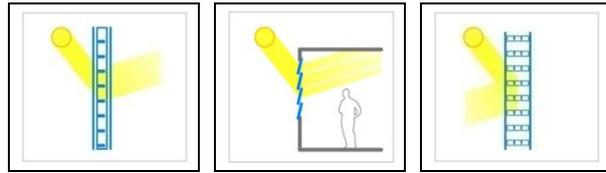
Riassumendo:

i pannelli prismatici sono caratterizzati da riflessione luminosa della componente solare diretta, da rifrazione luminosa della componente diffusa proveniente dal cielo, da modalità di trasmissione diffondente. Sono generalmente posti in intercapedine, ma possono anche essere esterni o interni (quando si tratta di lamelle). Possono essere applicati in dispositivi fissi o mobili, essere discontinui, oltre che continui, nel caso in cui vengano realizzati sotto forma di lamelle. Sono utilizzati per finestre verticali, lucernari e coperture trasparenti. Risultano efficienti con tutte le altezze solari e tutte le condizioni di cielo. In Tab. 1.5 sono indicati i vantaggi e gli svantaggi del sistema.

Tabella 1.5. Vantaggi e svantaggi dei pannelli prismatici.

Vantaggi	Svantaggi
Riduzione dei carichi termici in estate	Possibile presenza di abbagliamento (se non c'è un orientamento ottimale dei prismi, che potrebbero rifrangere la luce verso il basso e non verso l'alto)
Sfruttamento dei guadagni solari in inverno	Ridotta disponibilità di luce naturale (in condizioni di cielo coperto)
Protezione dall'abbagliamento in estate e in inverno	Applicazione limitata a lucernari, coperture trasparenti e porzioni superiori di finestre, a causa della visione trasparente ma distorta che si ha attraverso i pannelli (necessità di una protezione supplementare contro la luce solare diretta e l'abbagliamento per le finestre dedicate esclusivamente alla vista, in cui il sistema non viene applicato)
Ridirezionamento della luce naturale in profondità nella stanza	Possibile presenza di dispersione di colore nel caso in cui i pannelli prismatici vengano usati come dispositivi fissi di schermatura solare e per direzionare la luce solare: necessità di componenti aggiuntivi
Uniforme distribuzione della luce diurna	Manutenzione delicata (per pannelli prismatici esposti)
Elevata disponibilità di luce naturale (in condizioni di cielo sereno)	Costo elevato
Risparmi energetici sulla luce artificiale	
Assenza di alterazione cromatica della luce naturale	
Manutenzione minima (se inseriti in doppio vetro)	

5. PANNELLI LASER-CUT (Laser-cut panels)



Il pannello laser-cut è un sistema di ridirezionamento della luce diurna. I pannelli laser-cut sono costituiti da materiale acrilico trasparente (PMMA) su cui vengono fatte delle incisioni con raggio laser che permettono di ridirezionare la luce naturale: la superficie delle incisioni si comporta come un piccolo specchio che devia la luce che attraversa il pannello. In particolare, un pannello laser-cut è un pannello sottile che è stato diviso, tagliandolo, col laser in una serie di elementi rettangolari. La superficie di ogni taglio laser diviene un piccolo specchio interno che deflette la luce che passa attraverso il pannello. I tagli sono di solito fatti convenientemente attraverso i pannelli. E' possibile tagliarne solo parte attraverso il pannello (il 75% della profondità). In ogni caso, un perimetro solido si rende ancora necessario per conferire la necessaria forza strutturale. I pannelli sono infatti progettati in modo tale da includere un perimetro solido e supportare le sezioni dovute ai tagli. Il metodo di fabbricazione risulta flessibile e adatto per piccole e grandi quantità.

Le principali caratteristiche di un pannello laser-cut sono:

- proporzione molto alta di luce deflessa attraverso un angolo ampio ($>120^\circ$)
- mantenimento della vista attraverso il pannello.

La luce è deflessa in ogni elemento del pannello attraverso tre processi in successione (Fig. 1.26): prima per rifrazione (sulla faccia esterna dell'incisione), poi per riflessione totale (all'interno dell'incisione), e ancora per rifrazione (sulla faccia interna dell'incisione).

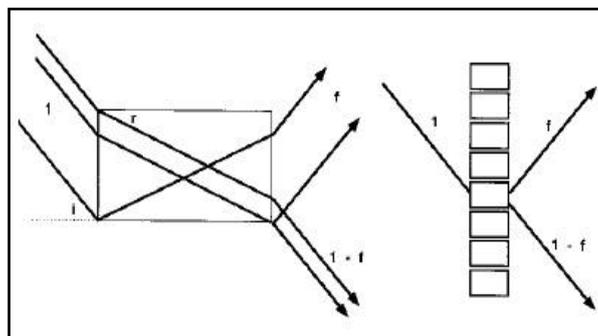


Figura 1.26. Schema di funzionamento di un pannello laser cut

Dal momento che tutte le deflessioni sono nella stessa direzione, la deflessione risulta altamente efficiente. I pannelli di solito sono fissati all'interno di vetri per un migliore effetto di protezione,

ma possono essere anche usati come vetri esterni se la superficie tagliata è protetta dalla laminazione tra due lastre di vetro. Normalmente i pannelli vengono tagliati secondo un angolo perpendicolare alla superficie, ma è possibile fare tagli anche secondo angoli diversi per avere un controllo aggiunto sulla direzione della luce deflessa.

Attraverso i pannelli si riesce a vedere fuori (Fig. 1.27). Nonostante però mantengano un'elevata trasparenza con una limitata distorsione della vista esterna è opportuno che siano usati principalmente per aperture dedicate all'ingresso della luce, e non per finestre dedicate alla vista, o al limite non quando gli occupanti sono vicini a queste ultime.



Figura 1.27. Vista attraverso un pannello laser-cut

I pannelli possono anche essere usati in disposizioni a lamelle o, se prodotti in larghezze ridotte, con disposizione in stile veneziana. Usato sotto forma di lamelle mobili, il sistema respinge la luce del Sole quando i pannelli sono nella posizione di lamelle aperte (generalmente in estate), e ridireziona la luce quando i pannelli sono nella posizione di lamelle chiuse (generalmente in inverno), come mostrato in Fig. 1.28.

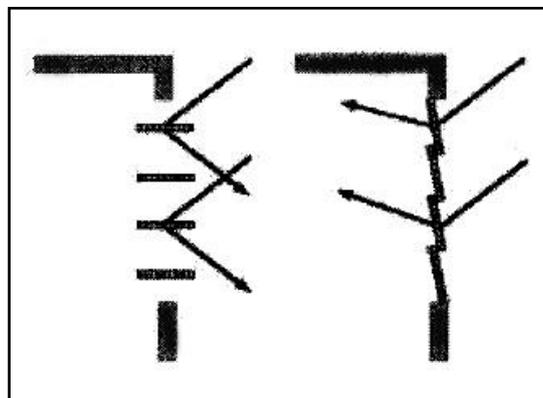


Figura 1.28. Pannelli laser-cut mobili a forma di lamelle: situazione estiva (aperti) e invernale (chiusi).

I pannelli laser-cut che deflettono la luce possono essere applicati come sistema di:

- schermatura solare per le finestre: se una serie di pannelli stretti è montata orizzontalmente su una finestra, con la faccia dei pannelli orizzontale, la luce del Sole, proveniente da altezze maggiori, è deflessa verso l'esterno (Fig. 1.29); il sistema risulta molto efficace per escludere la luce del Sole mentre rimane totalmente aperto per la vista;

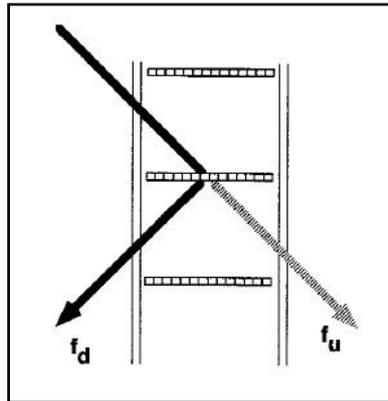


Figura 1.29. Pannelli laser-cut orizzontali: applicazione a finestra selettiva angolare con deflessione della luce verso l'esterno

- ridirezionamento della luce (fisso o mobile): Un pannello laser-cut verticale deflette verso l'alto la luce incidente proveniente da altezze maggiori, $>30^\circ$, mentre trasmette la luce ad un'incidenza quasi perpendicolare. In particolare, un pannello con un rapporto tra distanza e profondità dei tagli (D/W) di 0.7, fissato verticalmente su una finestra, deflette quasi integralmente la luce incidente con un angolo $\geq 45^\circ$, luce che viene rifratta verso il soffitto, e trasmette la maggior parte della luce incidente proveniente dai 20° in giù. Pur causando abbagliamento minimo, è consigliabile usare i pannelli laser-cut nella metà superiore delle finestre.
- schermatura solare/direzionamento della luce per finestre (sotto forma di lamelle o veneziana).

I pannelli laser-cut sono di solito utilizzati in configurazione fissa, come una seconda lastra interna nelle finestre o nei lucernari. Quando sono installati come lastra interna nelle finestre a ribalta, se le finestre sono aperte e di conseguenza inclinate verso l'esterno, la luce proveniente da un alto angolo di elevazione viene deflessa più profondamente nella stanza.

L'inclinazione del pannello può essere continuamente aggiustata per ottenere un'ottima penetrazione della luce solare. Comunque, dal momento che nella maggior parte dei casi questo sistema non è adatto per applicazioni in finestre dedicate esclusivamente alla contatto con

l'esterno, una protezione supplementare contro la radiazione solare diretta e l'abbagliamento risulta necessaria.

Se i pannelli sono fissi all'interno di vetrate o lucernari, non è richiesta alcuna manutenzione.

Il risparmio energetico ottenibile dipende dal tipo di applicazione: per pannelli laser-cut fissi nella metà superiore di una finestra con funzione di deflettere la luce più in profondità in una stanza, l'incremento di luce naturale può variare dal 10% al 30% a seconda delle condizioni del cielo; per pannelli inclinati al di fuori della finestra, la quantità di luce e la sua penetrazione nell'edificio possono aumentare notevolmente (Fig. 1.30).

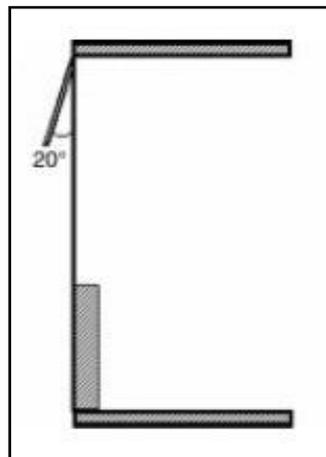


Figura 1.30. Pannello laser cut esterno ruotato

La principale barriera tecnica alla diffusione dei pannelli laser-cut è costituita dal costo piuttosto elevato. Nelle Fig. 1.31 e 1.32 è presentata un'applicazione di prova di pannelli laser-cut.



Figura 1.31. Vista esterna di una test room con pannelli laser cut ruotati nel terzo superiore della vetrata.



Figura 1.32. Vista interna di una stanza di prova con pannelli laser cut ruotati nel terzo superiore della vetrata.

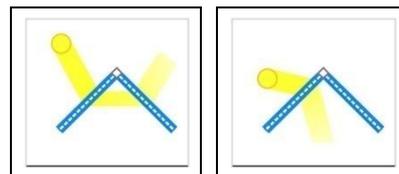
Riassumendo:

i pannelli laser-cut sono caratterizzati da riflessione e rifrazione luminosa e da riflessione speculare. Sono di solito posti in intercapedine. Possono essere usati in disposizioni fisse e mobili ed essere continui o discontinui (nel caso in cui vengano realizzati sotto forma di lamelle o in stile veneziana). Sono utilizzati per finestre verticali, lucernari, coperture trasparenti e condotti di luce. Risultano efficienti con tutte le altezze solari e tutte le condizioni di cielo. In Tab. 1.6 sono indicati i vantaggi e gli svantaggi del sistema.

Tabella 1.6. Vantaggi e svantaggi dei pannelli laser cut.

Vantaggi	Svantaggi
Sfruttamento dei guadagni solari in inverno	Possibile presenza di abbagliamento (per pannelli posti all'altezza degli occhi)
Protezione dall'abbagliamento in estate e in inverno (per pannelli installati in finestre poste al di sopra dell'altezza degli occhi)	Necessità di una protezione supplementare contro la luce solare diretta e l'abbagliamento per finestre dedicate esclusivamente alla vista (in cui il sistema non viene applicato)
Ridirezionamento della luce naturale in profondità nella stanza: la gran parte della luce viene deflessa attraverso un ampio angolo >120° (ad eccezione dei sistemi di schermatura solare, la cui deflessione avviene verso l'esterno dell'ambiente)	Costo elevato
Uniforme distribuzione della luce diurna	
Elevata disponibilità di luce naturale	
Vista verso l'esterno (la distorsione della vista esterna è limitata)	
Risparmi energetici sulla luce artificiale (variabili a seconda del tipo di applicazione)	
Assenza di alterazione cromatica della luce naturale	
Manutenzione minima	
Per sistemi di schermatura solare e sistemi di schermatura solare-direzionamento della luce per finestre	
Schermatura della luce solare diretta	
Riduzione dei carichi termici in estate	
Aspetto estetico-architettonico (solo per sistemi di schermatura solare/direzionamento della luce per finestre)	
Vista verso l'esterno totalmente aperta (solo per i sistemi di schermatura solare)	

6. LUCERNARIO ANGOLARE SELETTIVO (Angular selective skylight – lasercut panel)



Il lucernario angolare selettivo incorpora una configurazione piramidale o triangolare di pannelli laser-cut all'interno della copertura del lucernario.

Un lucernario angolare selettivo è un tipo di lucernario convenzionale chiaro di tipo piramidale o triangolare. I pannelli laser-cut che deflettono la luce sono incorporati dentro la copertura trasparente più esterna a formare un doppio vetro per fornire una trasmissione angolare selettiva.

I lucernari vengono installati sul tetto dell'edificio. I lucernari convenzionali trasmettono molto la luce ad alti angoli di elevazione, e debolmente a bassi angoli di elevazione. La funzione primaria di un lucernario angolare selettivo è quella di fornire un irradiazione relativamente costante all'interno durante il giorno e ridurre la tendenza a surriscaldare l'edificio nei giorni d'estate. I lucernari negli edifici con soffitti bassi di solito forniscono troppa luce direttamente sotto il lucernario e troppo poca ai lati. Se i pannelli laser-cut sono usati in una struttura a V rovescia o a piramide capovolta sotto il lucernario, la luce che scende verso il basso può essere riflessa sul soffitto, migliorando la distribuzione di luce all'interno. Questo sistema nasce quindi con l'obiettivo di trasmettere più luce a bassi angoli e meno luce ad alti angoli di elevazione (Fig. 1.33).

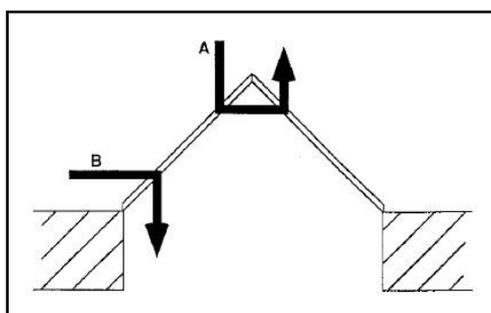


Figura 1.33. La luce ad alti angoli (A) viene respinta e quella a basso angolo (B) viene deflessa all'interno

I pannelli laser-cut per queste applicazioni vengono prodotti realizzando dei tagli sottili attraverso un pannello fino di acrilico. Di solito i pannelli sono tagliati da un acrilico spesso 6mm, e i tagli sono distanti 4mm. Gli angoli di inclinazione utili per i pannelli nei lucernari variano tra 45° e 55° per i tropici e per le regioni subtropicali (basse latitudini) dove respingere la luce solare ad alti angoli di elevazione è fattore critico per evitare il surriscaldamento. Ad alte latitudini, dove l'ingresso di luce a bassi angoli di elevazione è molto importante, vengono usati angoli di inclinazione tra 25° e 35°, rendendo così considerevole l'aumento dell'ingresso della luce a bassi angoli di elevazione.

La configurazione piramidale o triangolare dei pannelli laser-cut nei lucernari angolari selettivi riflette la luce a bassi angoli di elevazione in basso nel lucernario e aumenta la trasmissione di

questa luce all'interno dell'edificio. Quando l'angolo di inclinazione dei pannelli laser-cut è più grande di 45°, questi riducono la trasmissione della luce ad alti angoli di elevazione, riflettendola da un pannello trasversalmente al pannello opposto e di nuovo fuori dal lucernario. Le prestazioni dei lucernari angolari selettivi dipendono da:

- la spaziatura dei tagli nel pannello
- l'angolo di inclinazione della configurazione triangolare o piramidale dei pannelli
- la profondità del lucernario
- l'ora della giornata e la stagione
- le condizioni di cielo

All'aumentare della profondità del lucernario, la prestazione a bassi angoli di elevazione aumenta rapidamente.

I lucernari angolari selettivi sono sempre usati come sistemi fissi: la loro capacità di trasmissione dipendente dall'angolo fornisce un controllo dell'irraggiamento all'interno dell'edificio, che a sua volta dipende dall'ora (Fig. 1.34).

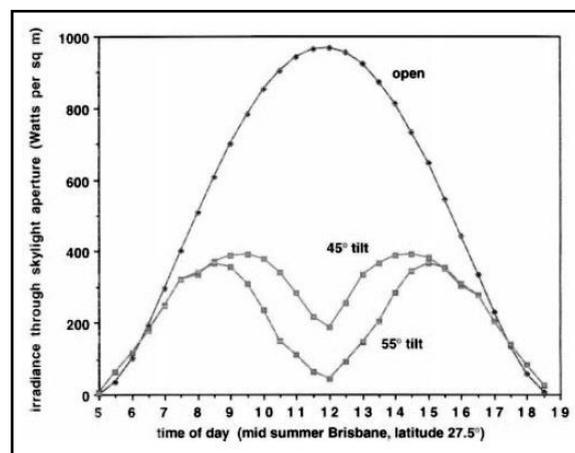


Figura 1.34. Irraggiamento vs ora del giorno attraverso un lucernario angolare selettivo: angoli ruotati rispettivamente a 45° e 55° in estate alla latitudine di 27° N.

Dal momento che i lucernari angolari selettivi respingono la luce ad alti angoli di elevazione, essi non risultano adatti in Paesi con cieli prevalentemente coperti, mentre sono progettati specificatamente per Paesi a basse latitudini con cieli chiari; questo tipo di lucernario può essere anche applicato in Paesi ad alte latitudini con cielo chiaro, come il Canada, per aumentare l'irraggiamento proveniente dalla luce solare invernale a bassi angoli di elevazione.

È una soluzione non adatta a tetti con elevate pendenze, bensì per l'illuminazione naturale di edifici con aria condizionata, o ventilati, con un'ampia superficie di pavimento e tetti con basse pendenze, come supermercati e scuole.

Il risparmio energetico può essere significativo, in quanto i lucernari angolari selettivi possono ridurre il surriscaldamento, allo stesso modo, anche l'uso della luce elettrica può essere ridotto se paragonato a quello di edifici senza o con piccoli lucernari per il controllo del surriscaldamento.

Un lucernario angolare selettivo è essenzialmente un lucernario convenzionale con un doppio vetro di pannelli laser-cut aggiunto e non richiedono particolare manutenzione aggiuntiva rispetto ad un normale lucernario.

Nelle Fig. 1.35 e 1.36, sono illustrate due applicazioni di lucernari selettivi angolari.

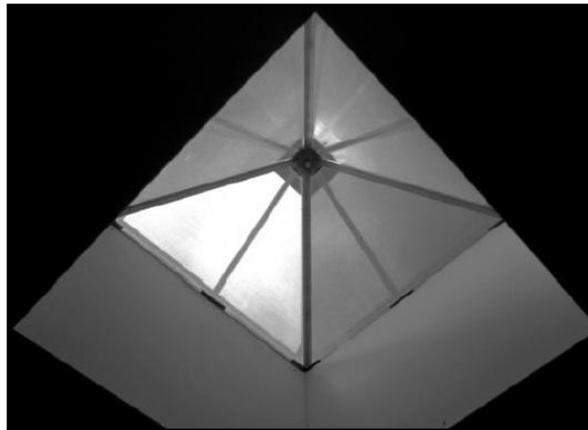


Figura 1.35. Scuola Waterford, Brisbane, Australia.



Figura 1.36. Lucernario selettivo angolare all'Erbario, Brisbane, Australia

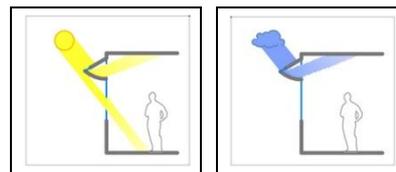
Riassumendo:

i lucernari angolari selettivi, equipaggiati con pannelli laser-cut posti in intercapedine, sono sempre usati come sistemi fissi e continui. Sono utilizzati esclusivamente per lucernari. Risultano efficienti con tutte le altezze solari e condizioni di cielo sereno. In Tab. 1.7 sono indicati i vantaggi e gli svantaggi del sistema.

Tabella 1.7. Vantaggi e svantaggi lucernario angolare selettivo.

Vantaggi	Svantaggi
Riduzione dei carichi termici in estate	Sistema non adatto per essere utilizzato in paesi con condizioni di cielo prevalentemente coperto e su tetti con elevate pendenze
Sfruttamento dei guadagni solari in inverno	Possibili problemi di abbagliamento
Ridirezionamento della luce naturale in profondità nella stanza (miglioramento della distribuzione di luce all'interno anche nel caso di ambienti con soffitti bassi grazie al possibile impiego di una configurazione dei pannelli a piramide capovolta sotto il lucernario: la luce che scende verso il basso può venire riflessa anche sul soffitto)	Costo elevato
Uniforme distribuzione della luce diurna	
Elevata disponibilità di luce naturale	
Vista verso l'esterno (la distorsione della vista esterna è limitata)	
Differentemente dai lucernari convenzionali, trasmettono fortemente la luce a bassi angoli di elevazione e debolmente ad alti angoli di elevazione	
Risparmi energetici sulla luce artificiale	
Risparmi energetici sui consumi necessari per il condizionamento in estate	
Assenza di alterazione cromatica della luce naturale	
Manutenzione minima	

7. SCHERMATURE A GUIDA DI LUCE (Light-guiding shades)



Una light-guiding shade è un sistema di schermatura esterna che ridireziona la luce solare e del cielo verso il soffitto. È composta da un'apertura con un vetro diffondente e due riflettori progettati per direzionare la luce diffusa dall'apertura all'interno dell'edificio ad angoli entro uno specifico raggio d'azione angolare (Fig. 1.37).

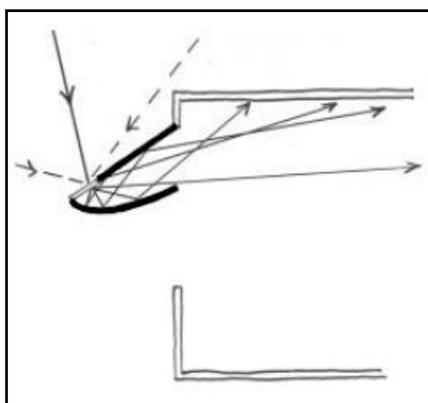


Figura 1.37. Schema di funzionamento di una schermatura a guida di luce

Il raggio d'azione angolare della distribuzione della luce nell'edificio è progettato per estendersi dall'orizzontale fino ad una elevazione di circa 60° . L'angolo di elevazione più basso è fissato a 0° o è orizzontale per evitare abbagliamento.

La light-guiding shade è fissa nello stesso modo di una schermatura esterna posta sopra una finestra: scherma la finestra dalla radiazione solare diretta come una normale schermatura. È però un sistema più complesso e più precisamente definito rispetto alle schermature convenzionali: per le sue superfici interne devono infatti essere usati materiali altamente riflettenti, come ad esempio l'alluminio reso riflettente. È generalmente installato sul terzo o la metà superiori di un sistema finestra. Le schermature hanno pannelli verticali ai lati che fungono da supporto e da schermatura aggiuntiva.

L'ostacolo principale all'applicazione e diffusione dei light-guiding shades sta nel loro costo, significativamente maggiore di quello delle schermature convenzionali, soprattutto a causa sia del prezzo del foglio di metallo altamente riflettente con cui vengono fabbricati, sia della necessità di plasmare accuratamente il materiale riflettente per limitare il diffondersi di luce emessa. Nella pratica, si è osservato che tendono ad essere soggetti a problemi di infiltrazioni d'acqua, a cui tuttavia si può ovviare praticando dei piccoli fori di drenaggio.

È possibile adattare la forma della schermatura esterna in modo tale che guidi all'interno dell'edificio un po' della luce che arriva sulla schermatura stessa. Se questo adattamento è fatto con cautela, in modo tale da evitare abbagliamento e direzionare la luce in profondità nella stanza, è possibile aumentare la luce diurna della stanza mentre si scherma la radiazione diretta solare, obiettivo del light-guiding shade.

I light-guiding shades possono essere usati in ogni edificio che usi sistemi di schermatura esterni delle finestre: tutta la luce del giorno che entra attraverso questi è diretta verso il soffitto. La schermatura diventa quindi una sorgente di luce diffusa, non luminosa quando è vista dagli occupanti della stanza, e quindi totalmente priva di abbagliamento (Fig. 1.38).



Figura 1.38. Confronto tra la luce del giorno presente in una stanza dotata di una schermatura convenzionale (sinistra) e in una con un light guiding shade (destra).

I light-guiding shades sono progettati per migliorare la luce diurna delle stanze negli edifici delle regioni subtropicali equipaggiate con schermature esterne destinate a ridurre il guadagno termico attraverso le finestre.

La luce che entra in un light-guiding shade viene da un'ampia gamma di direzioni, ma dal momento che l'apertura di ingresso è diffondente, la dipendenza direzionale della luce entrante non è più significativa. Dato che tale luce è diffusa, è possibile usare i principi dei sistemi ottici per progettare i riflettori dei light-guiding shades, in modo tale che la luce uscente cada in un campo d'azione angolare esattamente definito: il compromesso da accettare è tra la precisione con cui la luce deve essere direzionata nella stanza e la quantità di luce che viene direzionata. Dato che i sistemi di light-guiding shade sono progettati per aumentare la luce diurna in stanze fortemente schermate, è consigliabile direzionare la luce in un campo angolare di uscita relativamente ampio, da 0° a 60° , e di usare un più grande rapporto tra apertura di ingresso e apertura di uscita (di solito nel rapporto di 1:2) per massimizzare l'ingresso di luce diurna totale. Molta di questa luce cade sulla parte del soffitto vicino alla finestra, ma dal momento che i livelli di luce vicino alla finestra sono spesso molto bassi, a causa della schermatura esterna che costituisce il sistema stesso, il light-guiding shade può migliorare i livelli di luce interna. Se le superfici riflettenti della schermatura sono ben realizzate, il raggio di uscita risulta ben definito. Il controllo della direzione della luce è ottenuto con sistemi ottici, per cui non è necessario alcun tipo di manutenzione, eccetto la pulizia occasionale del vetro esterno dell'apertura d'ingresso.

I costi di produzione sono più alti di quelli delle schermature convenzionali, ma la prestazioni di illuminazione diurna sono molto superiori rispetto a queste. I costi di installazione e manutenzione sono invece praticamente gli stessi.

Dall'uso di un light-guiding shade si può ottenere un considerevole vantaggio energetico: i sistemi di schermatura esterna convenzionali infatti riducono in modo significativo l'ingresso della luce diurna, e sono progettati in modo da escludere tutta la radiazione solare diretta. In generale, il livello di luce diurna medio in una stanza con una finestra molto schermata è minore di 50 lux. In condizioni di cielo sereno, una light-guiding shade può produrre un illuminamento sul piano di lavoro di oltre 1000 lux a 5 metri di profondità nella stanza; in condizioni di cielo coperto, invece, l'illuminamento medio sarà ridotto, circa 250 lux. In pratica, i guadagni dipenderanno dalla forma e dalla dimensione della finestra, dall'inclinazione e dalla riflettanza del soffitto, delle pareti e del pavimento, dal tipo di vetro della finestra e dalle condizioni dell'ambiente.

Nelle Fig. 1.39 e 1.40 sono riportati due esempi di applicazione del sistema descritto.



Figura 1.39. Erbario "Mount Cootha", Brisbane, Australia



Figura 1.40. Interno di una residenza in cui sono installati light guiding shades

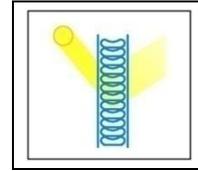
Riassumendo:

il light guiding shade è un sistema **esterno, fisso e continuo**. Viene utilizzato per finestre verticali. Risulta efficiente con tutte le altezze solari e condizioni di cielo sereno. In Tab. 1.8 sono indicati i vantaggi e gli svantaggi del sistema.

Tabella 1.8. Vantaggi e svantaggi delle schermature guide di luce.

Vantaggi	Svantaggi
Riduzione dei carichi termici in estate	Diminuzione dell'efficienza del sistema in condizioni di cielo coperto
Sfruttamento dei guadagni solari in inverno	Costo elevato (maggiore di quello delle schermature convenzionali)
Protezione dall'abbagliamento in estate e in inverno (dato che il sistema viene installato sopra un terzo o la metà superiori di un sistema di finestra e comunque sempre al di sopra dell'altezza degli occhi)	
Maggiore efficienza del sistema rispetto ad una schermatura esterna convenzionale	
Ridirezionamento della luce naturale in profondità nella stanza	
Uniforme distribuzione della luce diurna	
Elevata disponibilità di luce naturale	
La dipendenza direzionale della luce che entra non è importante, dato che l'apertura di ingresso è diffondente	
Possibilità di integrazione con gli altri sistemi di un edificio esistente (retrofitting)	
Risparmi energetici sulla luce artificiale	
Vista verso l'esterno	
Manutenzione minima	

8. VETRO CHE RIDIREZIONA LA LUCE SOLARE (Sun directing glass)



È un sistema che si basa su elementi acrilici concavi impilati verticalmente all'interno di un doppio vetro che ridirezionano sul soffitto la luce solare diretta proveniente da qualsiasi angolo di incidenza (Fig. 1.41).

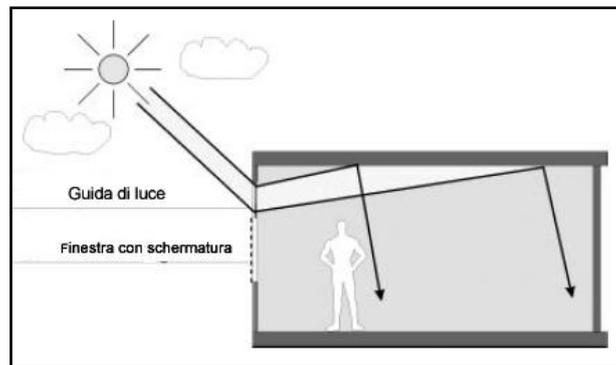


Figura 1.41. Guida di luce nella porzione claristorio della finestra

Il componente principale di un sistema vetrato di ridirezionamento della luce solare è un doppio vetro sigillato contenente gli elementi acrilici. Una struttura sinusoidale posta sulla superficie interna della finestra può essere usata per diffondere la luce con un angolo stretto orizzontale, azimutale. Analogamente, si può usare un film olografico sulla lastra di vetro esterna per concentrare la luce diurna incidente entro un angolo ristretto orizzontale.

Gli elementi acrilici, che direzionano la luce, sono prodotti per estrusione. Quando per deflettere la luce in maniera orizzontale sono usati film olografici (di cui alcuni cenni verranno dati a fine capitolo), essi sono prodotti impiegando un film che è esposto ad un disegno d'interferenza di due o più raggi laser. Il film è quindi posto tra due lastre di vetro che formano la lastra esterna del doppio vetro sigillato. La superficie sinusoidale invece, può essere prodotta in linea durante il processo di estrusione tramite un raggio laser di CO₂ oppure successivamente in modo meccanico tramite laser. Il vetro che ridireziona la luce solare è posto nella parte alta della finestra, al di sopra dell'altezza degli occhi, per evitare abbagliamento e altri fenomeni che possono peggiorare le condizioni di visibilità. Il sistema può essere anche posto davanti alla facciata o dietro di essa in situazioni di retrofit. L'altezza dell'area caratterizzata dalla presenza del sistema deve essere, nella maggior parte dei casi, circa il 10% dell'altezza della stanza. La parte inferiore della finestra, dedicata al contatto con l'esterno, può essere schermata con gli usuali metodi, mentre la parte alta, equipaggiata con questo sistema, non necessita di protezione dal Sole.

Un ruolo importante lo riveste il soffitto, che riceve la luce ridirezionata e la riflette in basso verso le zone di lavoro. Elementi riflettenti inclinati nel soffitto possono essere impiegati per

concentrare la luce riflessa su aree di lavoro specifiche. Anche un semplice soffitto bianco opaco è in grado di reindirizzare bene la luce: l'illuminazione risulterà solo più diffusa.

I vetri che ridirezionano la luce solare possono essere installati nei lucernari per aiutare la penetrazione della luce negli atri e negli ingressi. In questo caso, i vetri dovrebbero essere inclinati con un angolo di circa 20° verso il Sole, per poter indirizzare la luce solare anche quando il sole è basso (Fig. 1.42).

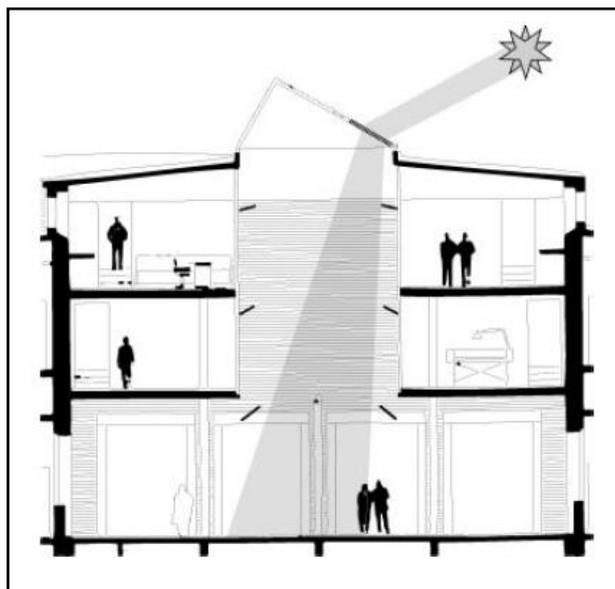


Figura 1.42. Sun directing glass usato in un tetto vetrato per illuminare un atrio

Il sistema è progettato per essere usato con luce solare diretta, e quindi funziona meglio nei climi più soleggiati. L'orientamento ottimale di una facciata è verso sud nelle zone a clima temperato (emisfero nord). Su facciate esposte ad ovest o ad est, è utile solo al mattino o al pomeriggio. Il sistema deflette anche la luce diffusa, ma il livello di illuminamento raggiunto è molto più basso che con la luce solare diretta. Per facciate esposte a nord, infatti, questi elementi devono essere molto più ampi. Per questo, per condizioni di cielo coperto o esposizioni solo a cielo chiaro l'effetto di questi vetri è modesto.

Il profilo degli elementi acrilici è progettato per essere utilizzato a specifiche latitudini. L'altezza solare ottimale per un vetro che ridireziona la luce solare è compresa tra 10° e 65° . Nelle zone tropicali, dove il sole è più alto, tali vetri devono essere installati in modo inclinato rispetto alla verticale, in modo da ridirezionare più luce. In questo caso, la geometria degli elementi che direzionano la luce solare dovrà essere modificata per evitare l'abbagliamento (Fig. 1.43).

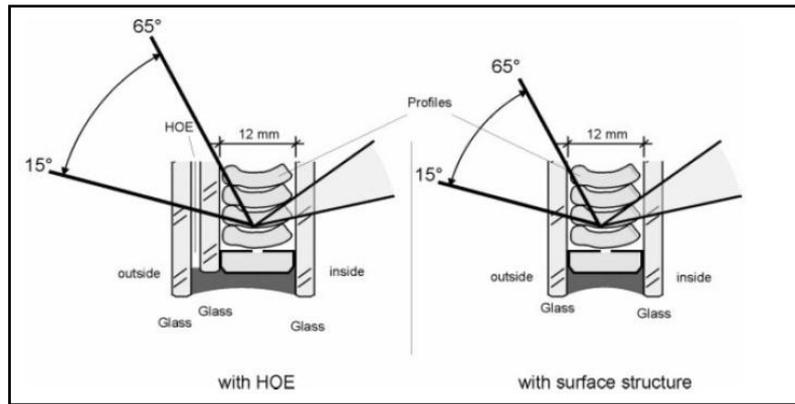


Figura 1.43. Sezione verticale di un sun directing glass

I vetri che ridirezionano la luce solare deflettono la luce sia nel piano orizzontale che in quello verticale. La luce in questo modo può raggiungere la profondità della stanza per tutte le posizioni solari senza la necessità di avere parti mobili nella facciata dell'edificio. La deflessione verticale è ottenuta agendo sulla forma degli elementi acrilici: la luce incidente viene focalizzata dalla prima superficie degli elementi acrilici e reindirizzata per riflessione totale sulla superficie inferiore del profilo, propagandosi leggermente verso il soffitto quando lascia gli elementi. La deflessione orizzontale è invece ottenuta attraverso gli elementi olografici ottici o attraverso le superfici vetrate sinusoidali (Fig. 1.44).

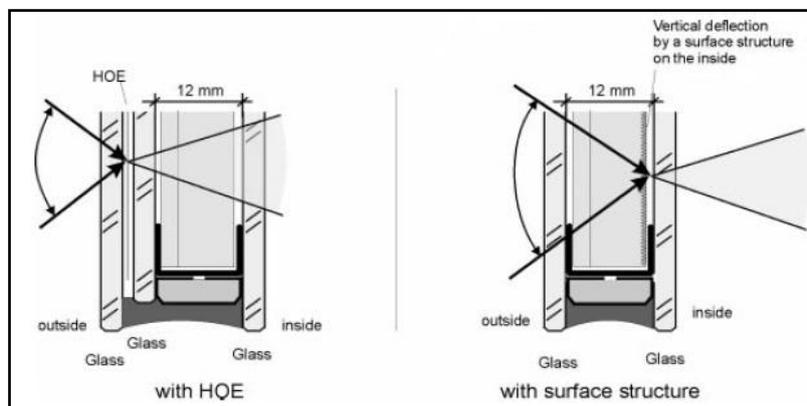


Figura 1.44. Sezione orizzontale. Pianta

L'unico reale impedimento all'uso di questo tipo di vetro è il costo. Inoltre, i vetri che ridirezionano la luce solare appaiono diversi dai vetri comuni; infatti, essi qualche volta appaiono piuttosto lattescenti, il che può alterare il design della facciata, specialmente se la maggior parte della facciata ha vetri trasparenti.

Questi sistemi non hanno parti mobili o variabili, e quindi non necessitano di alcuna azione di controllo; inoltre, essendo installati tra due vetri, non necessitano di alcuna manutenzione al di fuori dell'ordinaria pulizia del vetro.

Nelle Fig. 1.45 e 1.46 sono illustrati due esempi di applicazione installati sopra una normale finestra.



Figura 1.45. Uffici ADO, Colonia, Germania



Figura 1.46. Edificio degli uffici Geysel building, Colonia, Germania

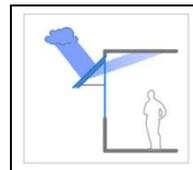
Riassumendo:

i vetri che ridirezionano la luce solare sono posti in intercapedine; il sistema è fisso e discontinuo. Viene utilizzato per finestre verticali e lucernari. L'orientamento ottimale è sud. Risultano efficienti per tutte le altezze solari e condizioni di cielo sereno. In Tab. 1.9 sono indicati i vantaggi e gli svantaggi del sistema.

Tabella 1.9. Vantaggi e svantaggi dei vetri che ridirezionano la luce solare.

Vantaggi	Svantaggi
Sfruttamento dei guadagni solari in inverno	Necessità di una protezione supplementare contro la luce solare diretta e l'abbagliamento per le finestre dedicate esclusivamente alla vista (in cui il sistema non viene applicato)
Protezione dall'abbagliamento in estate e in inverno (dato che il sistema viene installato in finestre poste al di sopra dell'altezza degli occhi)	Vista verso l'esterno limitata: i vetri che ridirezionano la luce solare a volte appaiono piuttosto lattescenti (possibile peggioramento dell'estetica della facciata)
Ridirezionamento della luce naturale in profondità nella stanza	Effetto modesto dei vetri per condizioni di cielo coperto o esposizioni solo a cielo chiaro
Uniforme distribuzione della luce diurna	Costo elevato
Elevata disponibilità di luce naturale	
Possibilità di integrazione con gli altri sistemi di un edificio esistente (retrofitting)	
Inutilità di una protezione supplementare contro la luce solare diretta e l'abbagliamento davanti ai vetri che direzionano la luce solare	
Il sistema deflette la luce sia nel piano orizzontale che verticale: è efficiente per tutte le altezze solari	
Risparmi energetici sulla luce artificiale	
Assenza di alterazione cromatica della luce naturale	
Manutenzione minima	

9. VETRO CHE DIREZIONA LA LUCE ZENITALE CON HOEs (Zenithal light-guiding glass with HOEs)



Tali sistemi sono fondamentalmente vetri che attraverso l'utilizzo di film olografici ridirezionano la luce zenitale in profondità all'interno degli ambienti.

Il componente principale di questo sistema è costituito da un film polimerico dotato di reticoli di diffrazione olografica, laminato tra due lastre di vetro per garantirne la stabilità e proteggerlo dall'umidità. Gli elementi ottici olografici (HOEs) reindirizzano la luce diffusa entrante nell'edificio proveniente dalla regione dello zenit del cielo. Questi vetri sono progettati per essere usati solo con luce diffusa, in quanto se raggiunti dalla luce diretta solare possono verificarsi fenomeni di abbagliamento e scomposizione della luce. Elementi ottici olografici che guidano la luce specifici per la luce diretta sono ancora in fase di sviluppo. Per questo, ad oggi, dovrebbero essere usati solo su facciate che non ricevono radiazione diretta.

I vetri che guidano la luce zenitale possono essere integrati in sistemi vetrati verticali o attaccati sulle facciate davanti alla parte alta delle finestre, con una inclinazione di circa 45°. Poiché i vetri guida di luce zenitale alterano leggermente la visuale, dovrebbero essere applicati solo nella parte alta delle finestre (Fig. 1.47). In un edificio, i vetri sono comunque installati come normali finestre o unità vetrate strutturali.

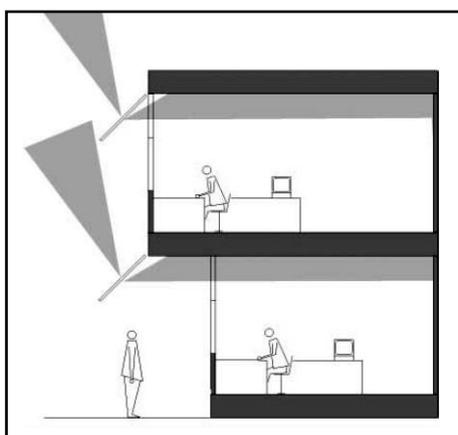


Figura 1.47. Schema di funzionamento di vetro che direziona la luce zenitale basato su elementi ottici olografici.

I vetri che guidano la luce zenitale sono maggiormente utili in situazioni in cui la vista del cielo è altamente preclusa (ad esempio nel caso di ambienti urbani) e in Paesi con condizioni di nuvolosità con alta luminanza del cielo. Il livello di luminanza della regione dello zenit del cielo coperto è tipicamente più alto di quello della regione orizzontale. Per questo, l'uso di vetri guida di luce zenitale è promettente nel caso di Paesi con condizioni climatiche prevalentemente nuvolose, in quanto indirizzano la luce proveniente dallo zenit in profondità negli ambienti. Inclinando

l'elemento ad un angolo di circa 45° rispetto alla facciata, aumenta la sua esposizione al cielo, e più luce è inviata nella stanza.

La luce incidente proveniente da una zona specifica del cielo è diffratta dal reticolo secondo l'indice di rifrazione del film olografico e inviata al soffitto. A causa del campo di variazione degli angoli della luce incidente, la dispersione del colore è varia, e si registrano solo limitati effetti di colorazione. Quando la luce solare diretta è incidente entro l'angolo attivo dell'elemento, si ha abbagliamento, e la scomposizione dei colori non può essere evitata. La visibilità attraverso un elemento ottico olografico è in genere possibile eccetto che nella direzione dell'angolo attivo.

Il sistema è fisso, e non è richiesta alcuna forma di controllo né di manutenzione, al di fuori della pulizia ordinaria. Sebbene il sistema riduca la quantità di luce diurna nell'area vicino la finestra, tale quantità di luce cresce invece leggermente nella profondità dell'ambiente. In termini di risparmio energetico, gli elementi olografici ottici hanno dato promettenti risultati di laboratorio, ma nessun risultato significativo è stato ancora raggiunto in un edificio reale.

Nelle Fig. 1.48 e 1.49 è illustrato un esempio di applicazione del sistema.



Figura 1.48. Uffici ADO, Colonia, Germania. Particolare della facciata esterna.



Figura 1.49. Uffici ADO, Colonia, Germania. Vista dall'interno.

Riassumendo:

Il vetro che guida la luce zenitale è un sistema collocato all'esterno o in un'intercapedine, ed è fisso e continuo. Viene utilizzato per finestre verticali (specie quelle nelle corti) e lucernari. Risulta efficiente con condizioni di cielo nuvoloso. In Tab. 1.10 sono indicati i vantaggi e gli svantaggi del sistema.

Tabella 1.10. Vantaggi e svantaggi dei vetri che ridirezionano la luce zenitale con HOEs.

Vantaggi	Svantaggi
Ridirezionamento della luce naturale in profondità nella stanza	Applicazione del sistema alle sole facciate che non ricevono luce solare diretta: poiché per effetto dell'incidenza di quest'ultima ci possono essere fenomeni di dispersione del colore o abbagliamento
Uniforme distribuzione della luce diurna	
Elevata disponibilità di luce naturale	
Vista verso l'esterno (la distorsione della vista esterna è limitata)	
Utilità del sistema in situazioni in cui la vista del cielo è altamente preclusa (ad esempio nel caso di ambienti urbani)	
Possibilità di integrazione con gli altri sistemi di un edificio esistente (retrofitting)	
Risparmi energetici sulla luce artificiale (testati solo in laboratorio: nessun significativo risparmio energetico è stato ancora dimostrato in un edificio reale)	
Manutenzione minima	

10. SISTEMI DI SCHERMATURA DIREZIONALE SELETTIVA BASATI SU HOEs (Directional selective shading systems using HOEs)

I sistemi di schermatura selettivi direzionali sono sistemi di daylighting che respingono la luce incidente proveniente da una piccola area angolare della volta celeste, in modo che il sistema possa ridirezionare o riflettere il raggio di luce solare incidente, mentre trasmette la luce diffusa proveniente dalle altre direzioni. Questa schermatura selettiva fornisce luce diurna all'interno degli edifici senza alterare gravemente la visibilità dalle finestre. Il film olografico è posto tra due lastre di vetro per garantirne la stabilità e proteggerlo dall'umidità. Una o più lastre di vetro contenenti questi elementi olografici ottici sono poi integrate con altri elementi strutturali e che seguono il percorso solare per creare i moduli lineari descritti.

Gli elementi olografici ottici sono progettati per essere usati come un sistema di schermatura trasparente, che permette la penetrazione della luce diffusa per scopi di illuminazione e un adeguato contatto con l'esterno, riflettendo la componente di radiazione diretta. Sono elementi applicabili principalmente dove è consigliabile un'ampia superficie vetrata, laddove può esistere il problema dell'abbagliamento e del surriscaldamento dovuto alla luce solare diretta. Sistemi di schermatura olografici selettivi direzionali di vario tipo possono essere impiegati in tutte le condizioni climatiche, ma il maggiore impatto si registra in condizioni di forte soleggiamento, in edifici con grandi superfici vetrate.

I reticoli olografici di diffrazione incassati in laminati di vetro possono essere impiegati in due modi per controllare la schermatura di ampie superfici vetrate:

- come sistemi di schermatura trasparenti
- come sistemi che concentrano la luce solare.

In entrambi i casi, gli elementi di schermatura devono seguire il movimento del Sole per ottenere una schermatura ottimale: è pertanto necessario un sistema che segua il percorso solare lungo un solo asse. Questo movimento in genere è gestito tramite un sistema automatizzato controllato da un computer che ne ottimizza la resa attraverso l'utilizzo di dati calcolati in precedenza, ovvero provenienti direttamente da sensori di luce. Ovviamente deve essere prevista la possibilità di apportare delle correzioni manuali in caso di necessità. Gli elementi di schermatura trasparente possono essere installati per ruotare lungo l'asse verticale o orizzontale.

Effetti di dispersione del colore possono generarsi entro l'elemento olografico ottico. Con il giusto design del sistema, questa dispersione di colore non si nota all'interno, a meno che i pannelli siano allineati o sistemati non correttamente.

Gli elementi vetrati mobili dotati di rivestimento olografico dovrebbero essere posizionati davanti alla facciata principale vetrata verticale o su aperture sul tetto come sistema di schermatura. In

alcune applicazioni, laddove il guadagno solare può essere dissipato attraverso la struttura del tetto, gli elementi di schermatura possono essere applicati all'interno degli edifici. Sono quindi sistemi che possono essere collocati sia all'interno che all'esterno, e che pertanto necessitano di un'adeguata integrazione tecnologica e architettonica al design dell'edificio.

Gli elementi ottici olografici sono attualmente ai primi stadi del loro sviluppo. Si dispone di poca esperienza riguardo alle loro prestazioni, in particolare quando si trovano ad operare in condizioni climatiche esterne rigide. Analogamente ad altri sistemi mobili ad inseguimento solare, anche questi sistemi stentano a diffondersi a causa del costo elevato determinato dai sistemi meccanici necessari per far seguire il percorso solare e ai pannelli di controllo che ovviamente comportano spese di manutenzione non trascurabili. Allo stato attuale, quindi, l'alto costo, la complessità tecnica del sistema di controllo e la manutenzione difficoltosa ne limitano l'applicazione pratica a progetti di tipo dimostrativo o ad edifici di profilo elevato.

Nelle Fig. 1.50 e 1.51 sono illustrati a scopo d'esempio due edifici che adottano un sistema di concentrazione direzionale basato su elementi ottici olografici e fotovoltaici.



Figura 1.50. Edificio IGA, Stoccarda, Germania

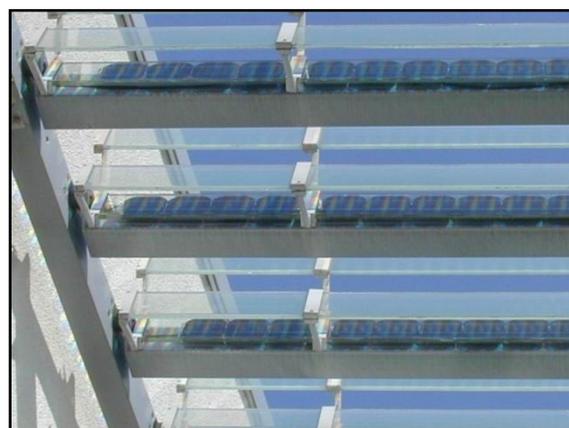


Figura 1.51. Centro Addestramento Innung SHK, Colonia, Germania. Particolare delle lamelle con elementi ottici olografici e celle fotovoltaiche.

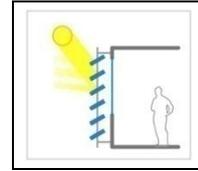
Riassumendo:

i sistemi di schermatura selettivi direzionali basati sugli HOEs possono essere esterni o interni; il sistema è mobile e discontinuo. Viene utilizzato per finestre verticali, lucernari e coperture trasparenti. Risulta efficiente con tutte le altezze solari e tutte le condizioni di cielo. In Tab. 1.11 sono indicati i vantaggi e gli svantaggi del sistema.

Tabella 1.11. Vantaggi e svantaggi dei sistemi di schermatura direzionale selettiva basati su HOEs.

Vantaggi	Svantaggi
Riduzione dei carichi termici in estate	Mancato sfruttamento dei guadagni solari in inverno
Uniforme distribuzione della luce diurna	Possibile presenza di abbagliamento
Elevata disponibilità di luce naturale	Manutenzione difficoltosa
Aspetto estetico-architettonico	Complessità tecnica del sistema di controllo
Possibilità di applicare il sistema anche all'interno degli edifici (se il guadagno solare può essere dissipato attraverso la struttura del tetto)	Costo elevato
Possibilità di integrazione con gli altri sistemi di un edificio esistente (retrofitting)	
Risparmi energetici sui consumi necessari per il condizionamento in estate	
Vista verso l'esterno (la vista non è alterata significativamente dall'elemento olografico)	
Per sistemi che concentrano la luce solare	
Possibilità di assorbire la luce solare e convertirla in energia termica o elettrica	Vista verso l'esterno ridotta dalle strisce opache (che possono costituire dal 30% al 50% della superficie vetrata)
Risparmi energetici sulla luce artificiale (grazie alla presenza di dispositivi di conversione dell'energia solare)	Possibilità di integrazione con gli altri sistemi di un edificio esistente (retrofitting) a condizione che il sistema possa adattarsi alle caratteristiche architettoniche preesistenti

10.1. Sistemi di schermatura trasparenti [1]



Nei sistemi di schermatura trasparenti, gli elementi olografici ottici sono progettati per riflettere la luce solare incidente in un intervallo angolare relativamente ristretto normale alla superficie. Se il vetro che incorpora gli elementi è in grado di ruotare per seguire il Sole, la luce solare diretta è schermata, mentre la luce incidente con diversa angolazione (luce diffusa) attraversa il sistema. Il principio di funzionamento di un generico sistema di schermatura trasparente con elementi ottici olografici (HOE) è mostrato in Fig. 1.52 e 1.53. La presenza dell'elemento olografico non altera significativamente la vista verso l'esterno.

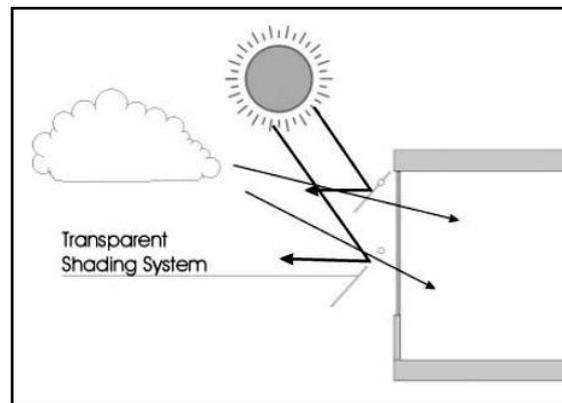


Figura 1.52. Schema di funzionamento di un sistema di schermatura trasparente.

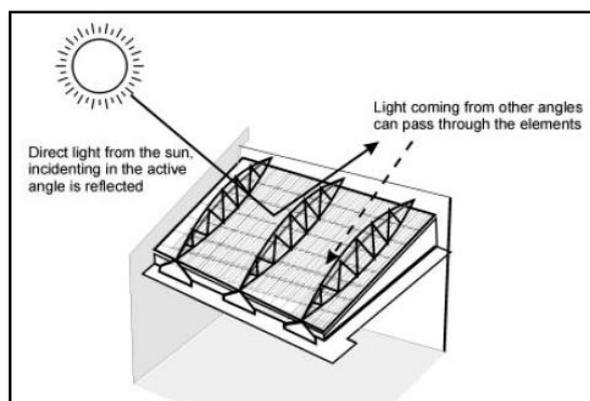
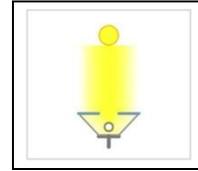


Figura 1.53. Sistema di schermatura trasparente applicata sul tetto.

L'impiego di un sistema di schermatura trasparente è particolarmente utile dove le necessità architettoniche prediligono una soluzione di controllo solare trasparente piuttosto che un sistema convenzionale di tende.

10.2. Sistemi che concentrano la luce solare (Concentrating sun-light systems)



Nei sistemi che concentrano la luce solare (Fig. 1.54), gli elementi olografici ottici sono progettati per ridirezionare e concentrare la luce solare diretta (normale incidente) su delle strisce opache poste su un secondo insieme di elementi di vetro (o di altro materiale, ad esempio fotovoltaico).

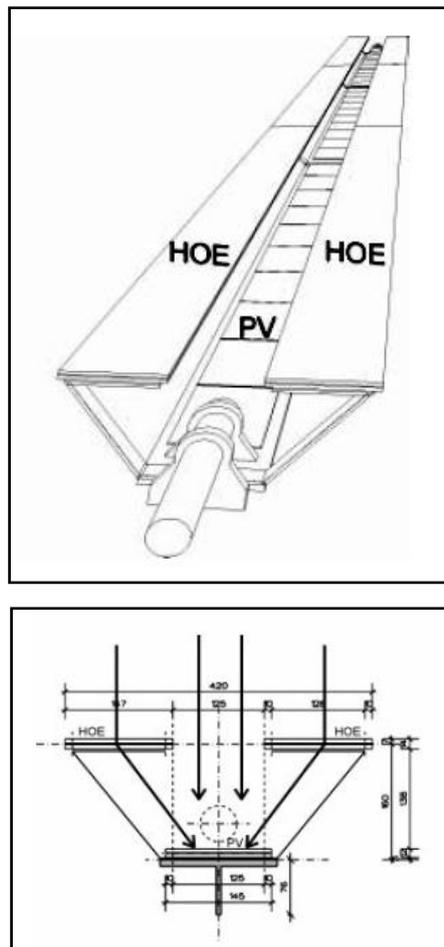
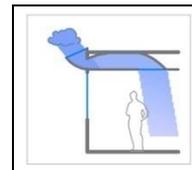


Figura 1.54. Assonometria (sopra) e sezione (sotto) di un sistema di concentrazione costituito da lamelle con elementi ottici olografici (HOE) e celle fotovoltaiche (PV)

Su questi ultimi elementi, la luce solare viene riflessa o assorbita e convertita in energia termica o elettrica (e in questi casi, ovviamente, si ha bisogno di dispositivi aggiuntivi per permettere le conversioni). Questo approccio consente di costruire sistemi di schermatura che bloccano la luce solare diretta normale, mentre rimangono trasparenti alla luce diffusa (proveniente da tutti gli altri angoli di incidenza che non siano normali alla superficie) che può così penetrare ed illuminare l'interno. Il sistema consente comunque di vedere verso l'esterno, sebbene la vista attraverso i

pannelli è ridotta dalle strisce opache che possono costituire dal 30% al 50% della superficie vetrata. La trasmissione della luce solare è 0.2 per i sistemi che concentrano la luce solare e 0.27 per sistemi di schermatura trasparenti, valori entrambi riferiti alla sola luce diretta: questi sistemi sono quindi in grado di respingere dal 70% all'80% della luce solare diretta incidente, riducendo così anche i carichi dovuti al raffreddamento dell'edificio.

11. SOFFITTI ANIDOLICI (Anidolic ceilings)



I soffitti anidolici sfruttano le proprietà ottiche dei concentratori parabolici composti per raccogliere la luce diurna diffusa proveniente dal cielo. Il concentratore è accoppiato ad un condotto di luce speculare sopra il piano del soffitto, che ha la funzione di trasferire la luce raccolta nella parte posteriore della stanza. L'obiettivo primario è quello di fornire alla stanza un'adeguata illuminazione diurna prevalentemente in condizioni di cielo coperto.

Tali sistemi sono stati progettati per applicazioni in edifici non residenziali che ricevono luce lateralmente. Gli elementi anidolici ottici sono posti ad entrambe le estremità del condotto di luce. All'esterno dell'edificio, un elemento anidolico ottico concentratore riceve e concentra la luce diffusa proveniente dalla parte superiore della volta del cielo, che è la parte a maggiore luminanza in cieli nuvolosi, e introduce in modo efficiente i raggi nel condotto. All'uscita del condotto nella parte posteriore della stanza, un riflettore parabolico distribuisce la luce verso il basso evitando ogni forma di retroriflessione (che insieme al fatto di incanalare la luce nel condotto riduce ogni rischio di abbagliamento). La luce è trasportata più in profondità nella stanza per mezzo di molteplici riflettori speculari che delineano il condotto di luce, il quale occupa la maggior parte dell'area sopra il soffitto sospeso. Nei giorni soleggiati, la penetrazione diretta della luce solare è controllata per mezzo di tendine che si possono stendere sopra il vetro di ingresso (Fig. 1.55).

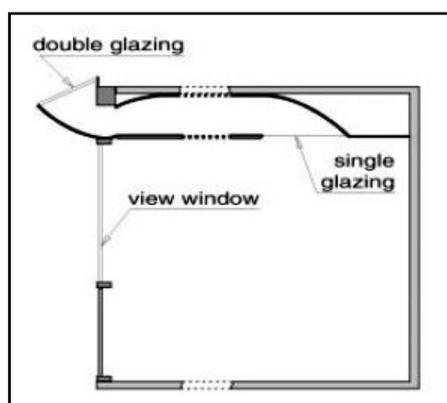


Figura 1.55. Sezione verticale schematica di un sistema anidolico: costituito dal collettore anidolico esterno, condotto speculare nel soffitto e uscita interna anidolica.

I riflettori all'interno degli elementi anidolici sono composti da superfici di alluminio anodizzato montati su telai di forma opportuna per produrre il controllo ottico desiderato. I condotti sono chiusi alle estremità da vetri per mantenere pulite le superfici riflettenti. Il meccanismo di azione delle tendine deve essere opportunamente integrato nel sistema.

Poiché i dispositivi anidolici esterni raccolgono la luce diffusa con elevata efficienza ottica, il soffitto anidolico è adatto per illuminare le stanze con la luce diffusa diurna durante le giornate nuvolose (Fig. 1.56). Il sistema può essere usato ad ogni latitudine, in condizioni di cielo sereno e coperto, se tende solari sono installate per proteggere dall'abbagliamento e dal surriscaldamento proveniente dalla luce solare diretta.

Le principali caratteristiche di tali sistemi sono:

- la dimensione del fascio di luce, delimitato all'apertura di entrata dagli angoli θ e θ' , è integralmente trasmesso all'apertura di uscita;
- il numero delle riflessioni può essere ridotto al minimo, attraverso un opportuno studio progettuale;
- una selezione accurata dei raggi in ingresso, così come il controllo dei raggi in uscita dal sistema.

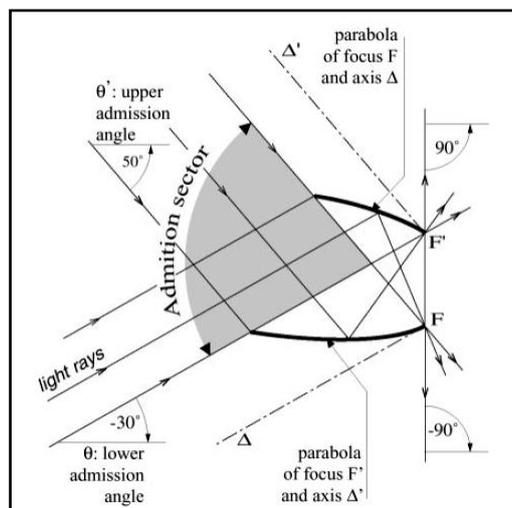


Figura 1.56. Funzionamento di un sistema anidolico costituito da un collettore composto parabolico

Per raccogliere sufficiente flusso luminoso, il collettore anidolico deve occupare l'intera larghezza della facciata degli ambienti: nessun altro sistema o elemento strutturale dell'edificio deve essere posto nello spazio dedicato al condotto di luce, che occupa completamente la zona al di sopra del soffitto sospeso. In caso contrario, le prestazioni luminose del sistema diminuiscono in modo sensibile.

L'uso di questi sistemi richiede una coordinazione aggiuntiva nella fase progettuale, nella pianificazione e nella costruzione.

Il sistema è usato nel modo migliore in edifici che ricevono poca luce solare diretta o che sono di fronte ad ostruzioni in una larga porzione della volta celeste. Quando la luce diretta solare è la principale fonte di luce diurna, è possibile che ci sia un alto fattore di concentrazione, che

permette di utilizzare un condotto più piccolo, che non occuperà l'intero soffitto. È un sistema che può essere utilizzato in aree urbane densamente costruite così come in aree rurali. L'effetto risultante è di maggiore rilevanza in ambiente urbano, dove l'effetto ostruttivo dei fabbricati circostanti aumenta l'importanza della raccolta della luce diffusa proveniente dalla parte alta della volta celeste.

I soffitti anidolici possono essere usati in edifici industriali, commerciali e istituzionali. Specifiche soluzioni progettuali devono essere definite in funzione del clima e della latitudine. La loro applicazione al retrofit degli edifici con spazi nel soffitto o soffitti alti può essere opportuna in assenza di ostruzioni e interferenze con altri sistemi dell'edificio.

L'uniformità di distribuzione della luce diurna, così come i livelli di illuminazione complessiva, migliorano rispetto a situazioni standard, perché il sistema permette l'introduzione addizionale di luce nella parte posteriore degli ambienti, mentre la sporgenza del sistema riduce i livelli di illuminamento e luminanza nella parte anteriore. Il soffitto anidolico contribuisce anche ad una più uniforme distribuzione della luminanza sulle pareti e sul soffitto, aumentando così la percezione della luminosità degli ambienti; inoltre, il flusso di luce addizionale portato all'interno dal soffitto anidolico migliora il rapporto di luminanza nel campo visivo. Per tutte queste ragioni, il sistema risulta adatto per ambienti aventi una discreta profondità ($\geq 6\text{m}$).

Test effettuati su uffici equipaggiati con questo sistema hanno mostrato un rilevante risparmio di energia elettrica per illuminazione (30% circa); tale risparmio potrebbe essere inoltre perfino maggiore qualora il sistema venisse applicato in ambienti più profondi.

Il sistema necessita di ulteriori costi iniziali rispetto alle finestre normali, per realizzare il sistema del collettore ottico sulla facciata e costruire il condotto riflettente con l'elemento emittente ottico. Non è richiesta però alcuna forma di controllo né di manutenzione.

In Fig. 1.57 è illustrato un edificio sperimentale che adotta sistemi di soffitti anidolici, mentre in Fig. 1.58 è raffigurato un modulo per la sperimentazione di tali sistemi.



Figura 1.57. Edificio solare sperimentale LESO, Losanna (Svizzera)

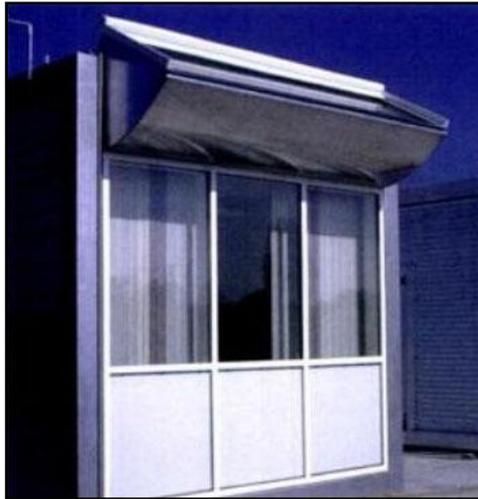


Figura 1.58. Modulo di prova per soffitti anidolici

Riassumendo:

il soffitto anidolico è un sistema interno/esterno, fisso e continuo. Viene utilizzato in facciate verticali sopra le finestre per la vista ed è efficiente con condizioni di cielo nuvoloso. In Tab. 1.12 sono indicati i vantaggi e gli svantaggi del sistema.

Tabella 1.12. Vantaggi e svantaggi dei soffitti anidolici.

Vantaggi	Svantaggi
Protezione dall'abbagliamento	Impossibilità ad applicare il sistema al retrofit degli edifici con spazi pieni del soffitto o soffitti alti con grandi ostruzioni o interferenze con altri sistemi dell'edificio nello spazio riservato al condotto di luce
Trasporto della luce naturale in profondità nella stanza	Costo elevato
Uniforme distribuzione della luce diurna	
Elevata disponibilità di luce naturale	
Possibilità di integrazione con gli altri sistemi di un edificio esistente (retrofitting) a condizione che nessun altro sistema dell'edificio o elemento strutturale si trovi nello spazio dedicato al condotto di luce (che occupa il vuoto al di sopra del soffitto sospeso)	
Utilità del sistema in edifici in cui la vista del cielo è altamente preclusa (ad esempio nel caso di ambienti urbani) o che ricevono poca luce solare diretta	
Risparmi energetici rilevanti sulla luce artificiale (i risparmi crescono con l'aumentare della profondità della stanza a cui il sistema viene applicato)	
Distribuzione più uniforme della luminanza sulle pareti e sul soffitto: aumento della percezione della luminosità dell'ambiente	
Miglioramento del rapporto di luminanza nel campo visivo	
Vista verso l'esterno	
Manutenzione minima	

12. APERTURE ANIDOLICHE ZENITALI (Anidolic zenithal openings)



Il sistema di apertura anidolica zenitale è un sistema di daylighting. L'elevata selettività angolare di questo dispositivo è utilizzata per raccogliere la luce diffusa da una larga parte della volta celeste senza lasciar passare la luce solare diretta. Questo tipo di lucernario è usato per fornire luce diurna ad edifici ad un piano, atrii, o ai piani più alti di edifici multipiano.

I principi fisici di funzionamento e le caratteristiche sono simili a quelle degli altri sistemi anidolici di daylighting. Il sistema è composto da un elemento ottico concentratore e un elemento deconcentratore o emittente. Il collettore è basato su un concentratore composito parabolico bidimensionale lineare il cui asse maggiore è disposto nella direzione est-ovest. L'apertura d'ingresso è piegata verso Nord per un loro impiego nell'emisfero Nord (sud per l'emisfero sud) ed è progettata in modo che il settore da cui fa entrare la luce comprenda tutto il cielo tra l'orizzonte Nord e la posizione più alta del sole nel cielo del sud durante l'anno. Il Sole non entra mai all'interno del settore da cui si fa entrare la luce, eccetto che all'inizio e alla fine del giorno, tra l'equinozio di primavera e l'equinozio d'autunno. La protezione solare è completata da un serie di lamelle verticali disposte uniformemente sopra l'apertura e distanti 0.5 m. L'angolo di ingresso e l'angolo di inclinazione rispetto all'orizzonte variano in funzione della latitudine: nel caso di 47° N di latitudine, tali angoli sono rispettivamente di 50° e 40° . Il deconcentratore parabolico, analogo ma opposto al concentratore parabolico, è posizionato alla fine dell'apertura per guidare il flusso della luce diurna verso il fondo della stanza. La connessione tra il concentratore e il deconcentratore è costituita da un condotto cilindrico con la superficie interna riflettente. L'angolo di uscita è di 40° e il dispositivo è troncato a 45° per ridurne la lunghezza (Fig. 1.59 e 1.60).

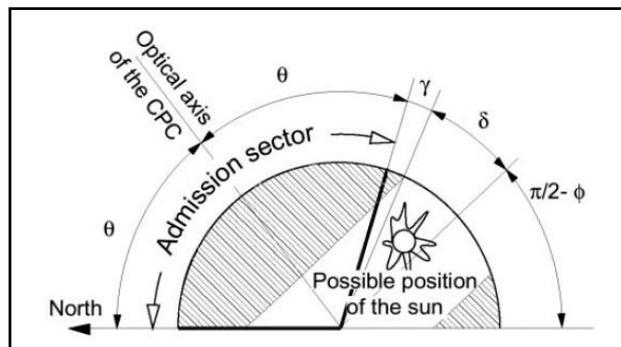


Figura 1.59. Settore di ammissione (θ) di un'apertura zenitale progettata per una latitudine di 47° N, dove ϕ è la latitudine, δ l'inclinazione massima ($23,5^\circ$), γ un angolo arbitrario

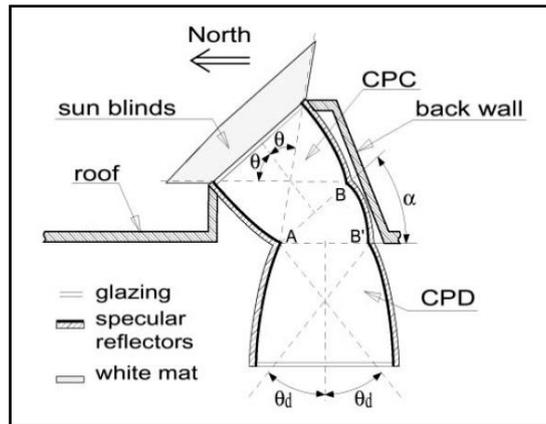


Figura 1.60. Sezione trasversale di un'apertura anidolica zenitale.

L'apertura anidolica zenitale, in condizioni normali, non produce abbagliamento diretto per gli utenti. Le estremità del condotto sono chiuse da vetri (caratterizzati da coefficiente di trasmissione pari a 0.9) per evitare deposizione di polvere sugli elementi riflettori e quindi perdita di efficienza del sistema. Le superfici del condotto riflettente sono costituite da fogli di alluminio anodizzato avente una riflettanza speculare di 0.9 e poste su strutture di legno (o altro materiale strutturale) opportunamente sagomate.

Il sistema è posizionato e deve essere progettato come parte integrante del tetto soprastante una zona di lavoro o un atrio, e pertanto il sistema deve essere integrato nel processo di progettazione fin dalle prime fasi.

L'apertura anidolica zenitale, come ogni apertura sul tetto orientata verso nord (nell'emisfero nord), ha il vantaggio di fornire all'interno degli ambienti luce diurna in modo scarsamente dipendente dalle variazioni della distribuzione di luminanza del cielo dovute al movimento delle nuvole e del Sole. Per questo, il dispositivo produce un minore abbagliamento e offre un confort visivo più elevato. Questi sistemi forniscono infatti il necessario illuminamento senza eccessivo abbagliamento a livello del soffitto (Fig. 1.61).

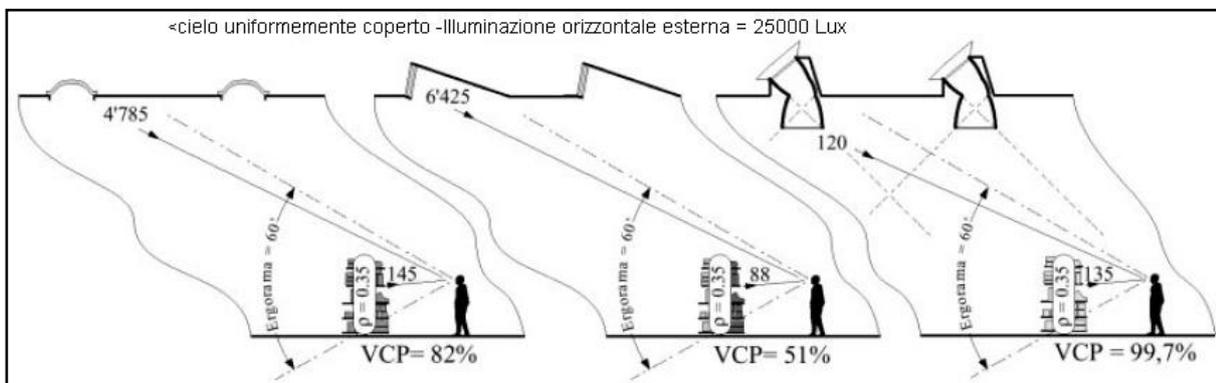


Figura 1.61. Comfort visivo per tre progetti alternativi di illuminazione anidolica dal tetto.

Il sistema è pertanto particolarmente adatto a situazioni in cui ci siano spazi interni chiari per i quali il confort visivo è essenziale (musei, supermercati, atrii, etc). A differenza dei lucernari convenzionali, inoltre, le aperture anidoliche zenitali evitano il surriscaldamento dovuto alla penetrazione della radiazione solare, anche se possono necessitare di aperture maggiori di quelle di sistemi progettati per far entrare luce solare diretta.

Questi sistemi forniscono un'efficiente protezione contro la luce solare diretta senza avere parti mobili, la luce del giorno che trasmettono lungo tutto il corso dell'anno è meno variabile di quella di altri sistemi sia mobili che fissi basati sul controllo della luce solare diretta, non necessitano di particolare manutenzione.

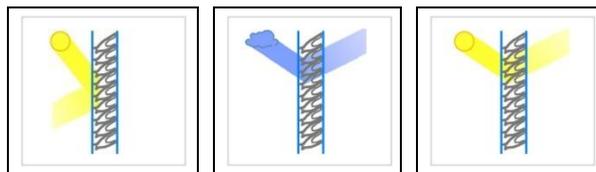
Riassumendo:

l'apertura anidolica zenitale è un sistema esterno, fisso e continuo. Viene utilizzato per lucernari. Risulta efficiente con tutte le altezze solari e tutte le condizioni di cielo. In Tab. 1.13 sono indicati i vantaggi e gli svantaggi del sistema.

Tabella 1.13. Vantaggi e svantaggi delle aperture anidoliche zenitali.

Vantaggi	Svantaggi
Riduzione dei carichi termici in estate	Impossibilità di integrazione con gli altri sistemi di un edificio esistente (retrofitting): il sistema deve essere integrato nel processo di progettazione fin dalle prime fasi, dal momento che deve essere progettato come parte integrante del tetto
Protezione dall'abbagliamento	Possibile richiesta di aperture maggiori di quelle dei sistemi che sono progettati per far entrare luce solare diretta
Uniforme distribuzione della luce diurna	Vista verso l'esterno preclusa
Elevata disponibilità di luce naturale	
Risparmi energetici sulla luce artificiale	
La luce diurna fornita all'interno è scarsamente dipendente dalle variazioni della distribuzione di luminanza del cielo dovuto al movimento delle nuvole e del sole: la luce del giorno che viene trasmessa lungo tutto il corso dell'anno è meno variabile di quella di altri sistemi sia mobili che fissi che sono basati sul controllo della luce solare diretta	
Maggiore confort visivo rispetto ai sistemi che fanno entrare la luce diretta del sole	
Manutenzione minima	

13. SCHERMATURE SOLARI ANIDOLICHE (Anidolic solar blinds)



Le schermature solari anidoliche sono costituite da una griglia di elementi cavi riflettenti, ognuno dei quali è composto da due concentratori parabolici composti tridimensionali. Sono progettate per un'illuminazione laterale e forniscono una trasmissione della luce angolare selettiva per controllare la luce solare e l'abbagliamento. Il progetto è al momento ancora a carattere prototipale in fase di sperimentazione.

La caratteristica innovativa delle anidolic solar blinds, rispetto agli altri sistemi anidolici (soffitti e aperture zenitali) è l'uso di elementi riflettenti tridimensionali e la loro dimensione ridotta (Fig. 1.62).

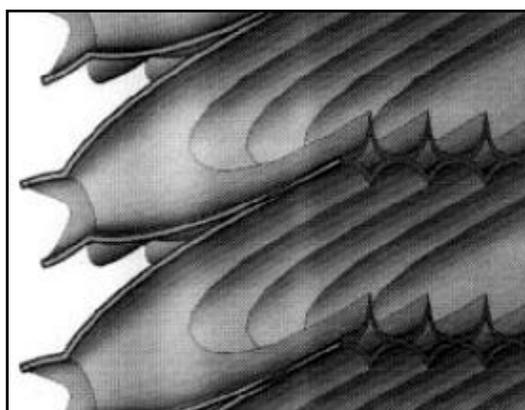


Figura 1.62. Sezione di uno schermo solare anidolico: modello tridimensionale elaborato al computer.

I sistemi ottici della porzione delle schermature che lasciano entrare la luce sono progettati per respingere la maggior parte dei raggi ad elevata altezza solare provenienti dal Sole e allo stesso tempo per trasmettere la luce diffusa a più basse altezze o la radiazione solare invernale. Il disegno della porzione di schermatura che lascia entrare la luce può essere adattato all'orientamento specifico della facciata e ai tipici cicli diurni della temperatura esterna (per es. è necessaria una maggiore penetrazione solare prima del mezzogiorno). I sistemi ottici della porzione di schermatura che emettono la luce sono progettati per indirizzare la luce del giorno nel quadrante superiore della stanza verso il soffitto, e per diffondere la luce orizzontalmente entro un angolo compreso tra $\pm 25^\circ$ rispetto alla perpendicolare della superficie della finestra. Questo disegno favorisce la diffusione della luce solare trasmessa senza creare abbagliamento. Gli elementi del sistema schermante in teoria possono essere prodotti in ogni scala ed essere ottimizzati per ogni latitudine ed orientamento. Gli elementi sono fabbricati in plastica. Superfici riflettenti vengono create depositando un rivestimento di alluminio per deposizione di vapore sotto vuoto.

Il sistema anidolico può essere impiegato sia come un sistema fisso di lamelle applicato alle aperture finestrate progettate principalmente per raccogliere la luce del giorno (dal momento che la vista attraverso queste è offuscata), sia può essere posto nella parte superiore di una normale finestra nel caso in cui la vista dell'esterno possa essere mantenuta attraverso la porzione inferiore della finestra. In ciascuna applicazione, vengono solitamente poste tra due lastre di vetro per proteggerle dalla polvere: per questo, non è richiesto nessun intervento di manutenzione particolare.

Le anidolic blinds sono un sistema fisso per controllare la luce del giorno e i guadagni termici nelle facciate poste a sud o in altre facciate che ricevono molta radiazione solare. Le schermature sono progettate per incrementare la penetrazione della luce del giorno in un'ampia gamma di condizioni mentre impediscono che l'ambiente interno si surriscaldi. Non fanno uso di nessuna componente mobile. Sebbene il sistema sia progettato principalmente per controllare la luce diurna nei paesi soleggiati, può essere usato anche con condizioni di cielo prevalentemente coperto. Il sistema è progettato esplicitamente per controllare la penetrazione solare per specifiche posizioni del sole.

Risultati sperimentali mostrano che la capacità di trasmissione massima del sistema raggiunge il 26% nella parte centrale della zona che lascia entrare la luce (Fig. 1.63). Questo valore corrisponde al rapporto delle aree effettive delle aperture per i più favorevoli angoli di incidenza. Il guadagno solare, o il livello di illuminamento, può essere aumentato inclinando il dispositivo dalla sua posizione verticale: sperimentalmente è stato dimostrato che inclinandolo di 18° verso l'alto, si registra un netto miglioramento in termini di prestazione.



Figura 1.63. Fotografia dell'apertura d'uscita del dispositivo anidolico: una cella appare luminosa solo se la direzione della vista è all'interno del settore d'emissione.

Il risparmio energetico è fondamentalmente ottenuto limitando (controllando) l'uso di energia elettrica per illuminazione, quando è disponibile la luce diurna proveniente dal sistema. In generale, ci si possono aspettare risparmi energetici più importanti dall'uso della radiazione

diretta piuttosto che dalla radiazione diffusa. Dal momento che il problema dell'abbagliamento è risolto ridirezionando la luce verso il soffitto, le schermature possono anche fornire un sostanziale guadagno termico in inverno senza provocare un impatto visivo sfavorevole. La loro funzione molto efficiente di schermatura estiva riduce inoltre il consumo di energia per il raffrescamento degli ambienti.

Le prestazioni del sistema sono ottimizzate per introdurre la luce solare evitando l'abbagliamento. La sua capacità di ridirezionamento e selettività della radiazione solare rappresenta una promessa per rendere le strategie di illuminazione naturale più efficaci in climi miti e soleggiati. Questi benefici non sono offerti dagli altri sistemi anidolici, ottimizzati per funzionare in condizioni di cielo coperto. Le anidolic solar blinds non sono ad oggi ancora state usate in alcun edificio.

Riassumendo:

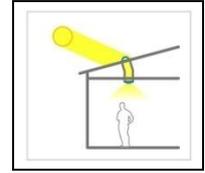
le schermature solari anidoliche sono un sistema posto in intercapedine, fisso, continuo o discontinuo, utilizzato per finestre verticali. Risulta efficiente per tutte le altezze solari e condizioni di cielo sereno. In Tab. 1.14 sono indicati i vantaggi e gli svantaggi del sistema.

Tabella 1.14. Vantaggi e svantaggi delle schermature solari anidoliche.

Vantaggi	Svantaggi
Riduzione dei carichi termici in estate	Necessità di una protezione supplementare contro la luce solare diretta e l'abbagliamento per le finestre dedicate esclusivamente alla vista (in cui il sistema non viene applicato)
Sfruttamento dei guadagni solari in inverno	Vista verso l'esterno offuscata
Protezione dall'abbagliamento	Costo elevato
Ridirezionamento della luce naturale in profondità nella stanza	
Uniforme distribuzione della luce diurna	
Elevata disponibilità di luce naturale	
Risparmi energetici sui consumi necessari per il condizionamento in estate	
Risparmi energetici sulla luce artificiale	
Dimensione ridotta del sistema	
Il disegno della porzione delle blinds che lascia entrare la luce può essere adattato all'orientamento specifico della facciata e ai cicli diurni della temperatura esterna	
La performance del sistema è ottimizzata per introdurre la luce del sole per l'illuminazione diurna senza abbagliamento, a differenza degli altri sistemi anidolici che sono ottimizzati per funzionare principalmente in condizioni di cielo coperto con la luce del giorno diffusa	
Manutenzione minima	

Sistemi di trasporto della luce (camini di luce)

14. CONDOTTI SOLARI (Solar tube/Light pipe)



I condotti solari sono sistemi usati per portare la luce naturale all'interno degli ambienti privi di finestre. Essi sono costituiti da un elemento di captazione, un elemento di conduzione e un elemento di diffusione. Nello specifico, sono formati da una cupola trasparente che convoglia la luce solare all'interno di un condotto altamente riflettente e lucido che a sua volta riflette la luce in basso, ad un diffusore posto sul soffitto dell'ambiente da illuminare. Fanno parte dei sistemi passivi, cioè di quei sistemi che utilizzano elementi di captazione fissi, che non sono quindi in grado di seguire in ogni istante il percorso solare. Sono sistemi in grado di trasportare la luce attraverso percorsi verticali od orizzontali fino ad ambienti che non potrebbero altrimenti ricevere luce naturale.

Sono sistemi efficaci per il trasporto della componente diretta della luce solare in profondità nell'edificio, ma non della componente diffusa, essendo caratterizzati da buone prestazioni in condizioni di cielo sereno ma non in condizioni di cielo coperto. L'elemento di captazione è di solito costituito da materiale acrilico o policarbonato trasparente, rivestito con un film anti-UV che convoglia le radiazioni solari dirette e diffuse. In Fig. 1.64 è schematizzato il funzionamento di un condotto solare.

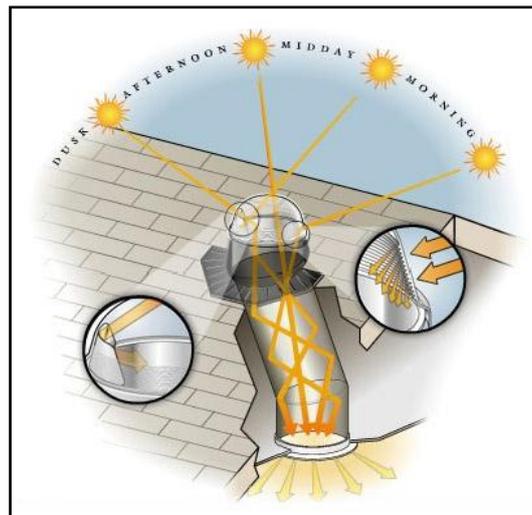


Figura 1.64. Schema di un condotto solare

La forma e le dimensioni del captatore fisso devono essere tali da ottimizzare l'ingresso della luce attuando il miglior compromesso tra la possibilità di acquisire la maggior quantità di luce

all'interno di un ambiente in un dato istante e quella di garantire adeguati livelli di illuminamento nel corso di tutto l'anno.

L'efficienza del condotto solare deriva dai dispositivi incorporati nella calotta:

- le lenti, che catturano la luce diurna e respingono la luce troppo intensa delle ore centrali della giornata garantendo un'illuminazione costante per tutto il giorno
- i riflettori, che intercettano e reindirizzano la luce solare ad angolo di incidenza ridotto aumentando l'apporto di luce.

Questi due dispositivi permettono al condotto solare di utilizzare luce che non si trova necessariamente nel diretto percorso del tubo e di ridirezionarla in modo da fornire luce dall'alba al tramonto, garantendo così una superficie effettiva di captazione della luce diurna EDCS (effecting daylight capturing surface) molto elevata.

L'elemento di conduzione, generalmente a sezione circolare (di solito con diametri di 250 mm o 350 mm), è costituito da materiale altamente riflettente e trasporta la radiazione solare grazie alle riflessioni delle sue pareti, minimizzando la dispersione dei raggi e assicurando un apporto di luce anche a distanze notevoli. La sua sezione ha dimensioni proporzionali all'area da illuminare: esistono commercialmente varie dimensioni di tubi disponibili da utilizzare per differenti dimensioni di ambienti.

Il condotto può arrivare ad una riflettività speculare di oltre il 99% e avere nel suo percorso angoli che vanno da 0° a 90°. La trasmissione luminosa è ovviamente maggiore se il tubo è corto e dritto. La luce solare trasportata assicura livelli di illuminamento idonei allo svolgimento delle attività e non altera la percezione dei colori naturali. Ad oggi i nuovi prodotti fissano degli standard di rendimento elevati: con un tubo di 250 mm di diametro, la EDCS è di 1032 cm², l'area di copertura luminosa di 14-19 m², con una lunghezza del tubo potenziale di più di 6m e 4100 lumen in uscita. Con l'aumento del diametro del tubo aumentano anche le prestazioni: con 350 mm di diametro, la EDCS è di 1871 cm², l'area di copertura luminosa di 23-28 m², la lunghezza del tubo potenziale di più di 9m e i lumen in uscita 8200. Rispetto ai lucernari tradizionali, questi sistemi hanno il vantaggio di un basso costo, di non essere soggetti a problemi di infiltrazioni, di dispersioni di calore, condensazione e surriscaldamento, di essere facilmente applicabili anche in edifici esistenti (il condotto può essere installato facilmente senza nessuna modifica strutturale).

I condotti solari, inoltre, riducono in modo sostanziale l'uso di energia elettrica, oltre a far godere gli utenti dei benefici aggiuntivi derivanti dall'uso di luce naturale anziché artificiale. Possono essere applicati in edifici residenziali, scolastici, uffici, edifici commerciali, magazzini/edifici industriali e di culto. Ad oggi le opere realizzate sono per lo più di piccole dimensioni, anche se non mancano realizzazioni su larga scala dove i risparmi di energia elettrica per l'illuminazione arrivano fino al 30%, unitamente a minori costi anche per il condizionamento, visto che il carico termico dovuto alla luce naturale è minore rispetto a quello delle lampade. Luci artificiali possono comunque essere inserite all'interno del condotto e comandate da un interruttore dimmer con cui

si può regolare il flusso luminoso emesso. Nelle Fig. 1.65 e 1.66 sono illustrati a scopo d'esempio due esempi di applicazione dei condotti solari.



Figura 1.65. Uffici della Environmental Dynamics Inc.

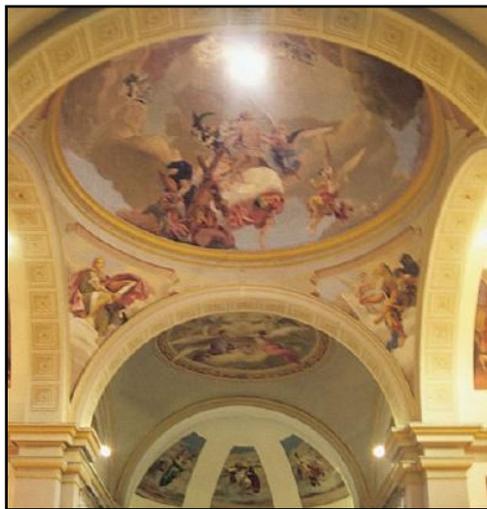


Figura 1.66. Chiesa illuminata tramite condotti solari

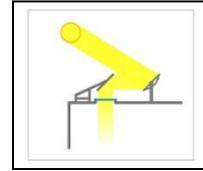
Riassumendo:

i condotti solari sono sistemi interni/esterni, fissi e continui, che possono essere orizzontali, verticali o inclinati. Vengono utilizzati su tetti e facciate verticali. Risultano efficienti con tutte le altezze solari e condizioni di cielo sereno. In Tab. 1.15 sono indicati i vantaggi e gli svantaggi del sistema.

Tabella 1.15. Vantaggi e svantaggi dei condotti solari.

Vantaggi	Svantaggi
Sfruttamento dei guadagni solari in inverno	Comportamento dei captatori fissi non costante durante l'arco dell'anno
Protezione dall'abbagliamento	Ridotta disponibilità di luce naturale (in caso di cielo parzialmente coperto)
Possibilità di portare luce diurna anche in ambienti privi di finestre	Impossibilità ad usare elementi di conduzione a sezione ed ingombro ridotti con questo tipo di sistema
Uniforme distribuzione della luce diurna	Mancanza di contatto visivo con l'esterno
Aumento della disponibilità complessiva di luce diurna	
Assenza di alterazione cromatica della luce naturale	
Facile applicabilità anche in edifici esistenti	
Risparmi energetici sulla luce artificiale	
Risparmi energetici sui consumi necessari per il condizionamento in estate	
Riduzione del riscaldamento globale	
Miglioramento della visibilità in relazione alla migliore qualità della luce (luce solare) e del benessere degli occupanti	
Apporto di luce anche a distanze notevoli	
Minimo intervento di pulizia e manutenzione	
Basso costo	

15. ELIOSTATO (Heliostat)



Gli eliostati sono elementi caratterizzati da superfici captanti in grado di seguire il sole ruotando intorno ad uno o due assi, e di rifletterlo o deviarlo nella direzione voluta all'interno dell'edificio. Il movimento è guidato da dispositivi elettronici. Essi possono anche costituire dei componenti di sistemi fotovoltaici oppure di condotti di luce: in questo secondo caso, sono costituiti da superfici altamente riflettenti, in grado di deviare la luce solare ed indirizzarla nel condotto (Fig. 1.67).

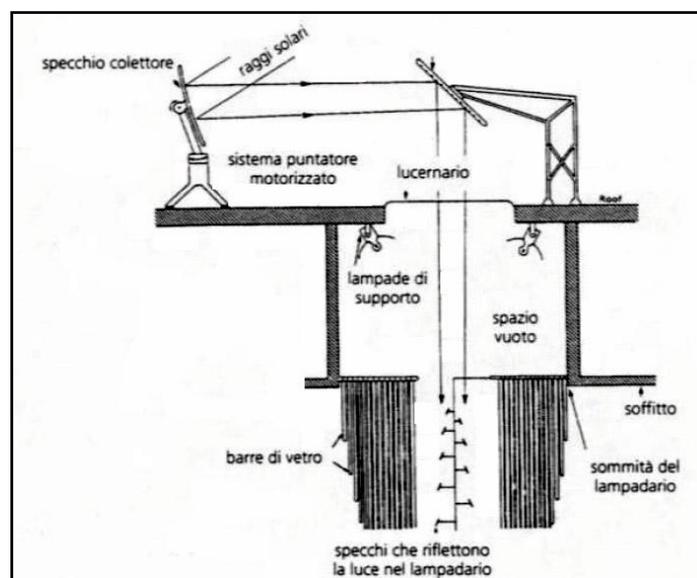


Figura 1.67. Schema dell'eliostato dell'aeroporto di Manchester (GB)

Il sistema può avere uno o due elementi di captazione (in quest'ultimo caso è in grado di convogliare la luce diretta del sole verso punti altrimenti irraggiungibili) ed è in grado di trasferire la luce naturale a distanze anche elevate. Il sistema utilizza elementi di captazione mobili, in grado quindi di seguire in ogni istante il percorso solare. Si ricerca quindi per questi una posizione ottimale rispetto alla direzione, mutevole, dei raggi solari, mentre la componente diffusa della luce di solito non viene considerata. Gli elementi di captazione sono costituiti da specchi riflettenti mossi da motori elettrici e controllati da dispositivi elettronici che permettono di seguire il movimento del Sole e captarne così i raggi riflettendoli costantemente in una direzione fissa.

Il sistema di controllo computerizzato contiene un orologio elettronico che memorizza la posizione apparente del Sole facendo ruotare il sistema ogni 20s. In alcuni casi, gli eliostati possono deviare la radiazione solare anche all'interno di un collettore di fibre ottiche anziché all'interno di condotti o verso elementi fotovoltaici, in altri casi deviarla direttamente all'interno di un ambiente senza far uso di alcun elemento di conduzione. In quest'ultima circostanza, pur non essendoci dati sulla

reale efficacia dei sistemi, è da escludersi, per sistemi piccoli applicati ad opere di piccola scala quali le abitazioni, un risparmio economico apprezzabile. Sono sistemi a cui si ricorre quando si vuole illuminare con luce naturale sottotetti, cantine ed ambienti esposti a Nord.

Limitato è il numero delle opere in grande scala che adottano tali sistemi. In alcuni casi sono stati utilizzati per ottenere effetti scenografici ed illuminazione d'accento come nel caso dell'atrio dell'aeroporto di Manchester, dove un sistema di specchi riflette la luce solare su dei cristalli che creano un effetto di luce diffusa (un sistema di illuminazione artificiale provvede a mantenere lo stesso effetto in assenza di luce naturale). Generalmente comunque il sistema è applicabile per banche, centri commerciali, alberghi, ospedali, edifici culturali ed amministrativi, aeroporti ed edifici pubblici, parcheggi (Fig. 1.68).



Figura 1.68. Eliostato e solar tube, Uffici, Washington (USA)

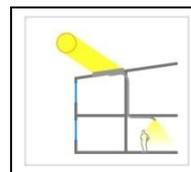
Riassumendo:

l'eliostato è un sistema esterno, mobile e continuo. Viene utilizzato sui tetti. Efficiente con tutte le altezze solari e condizioni di cielo sereno. In Tab. 1.16 sono indicati i vantaggi e gli svantaggi del sistema.

Tabella 1.16. Vantaggi e svantaggi dell'eliostato.

Vantaggi	Svantaggi
Sfruttamento dei guadagni solari in inverno	Possibili problemi di abbagliamento
Comportamento dei captatori mobili costante durante l'arco dell'anno	Disuniforme distribuzione della luce diurna
Uniforme distribuzione della luce diurna (nel caso in cui l'eliostato alimenti un condotto di luce)	Ridotta disponibilità di luce naturale (in caso di cielo parzialmente coperto)
Aumento della disponibilità complessiva di luce diurna	Possibile mancanza di contatto visivo con l'esterno
Assenza di alterazione cromatica della luce naturale	Manutenzione frequente e delicata
Apporto di luce anche a distanze notevoli	I sistemi attivi comportano notevoli costi di installazione e di gestione
Possibilità di portare luce diurna anche in ambienti privi di finestre (nel caso in cui l'eliostato alimenti un condotto di luce)	
Facile applicabilità anche in edifici esistenti	
Risparmi energetici sulla luce artificiale	
Possibilità di assorbire la luce solare e convertirla in energia termica o elettrica (nel caso in cui l'eliostato sia un componente di un sistema fotovoltaico)	
Miglioramento della visibilità in relazione alla migliore qualità della luce (luce solare) e del benessere degli occupanti	

16. FIBRE OTTICHE (Optical fibers)



Le fibre ottiche sono una nuova tecnologia che sta crescendo rapidamente, e sono già state impiegate in molti casi per illuminare musei, corridoi di teatri e di aerei, etc. Fin dai primi anni '90, i cavi a fibra ottica che usano una sorgente di luce artificiale sono stati usati in sistemi di illuminazione con sorgente remota: attraverso questi cavi, la luce viaggia dalla sua sorgente fino ad uno o più punti lontani. Ma ancor più nuova è la loro applicazione per il trasporto della luce solare all'interno di un edificio, come sistema di daylighting. L'integrazione tra la luce naturale proveniente dalle finestre e quella proveniente dalle fibre ottiche porta così ad un ulteriore risparmio energetico dovuto al minore uso di luce artificiale (Fig. 1.69).

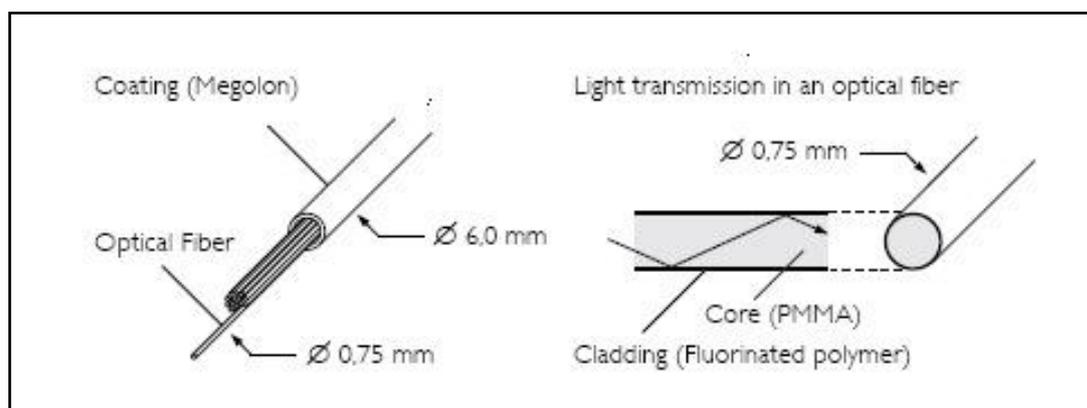


Figura 1.69. Schematizzazione di una fibra ottica e del suo funzionamento

Generalmente ha senso usare le fibre ottiche per trasportare la luce diurna nella parte della stanza più distante dalla finestra dove i valori di illuminamento sono minori (o al limite in ambienti senza finestre) per poi integrarle con luce artificiale laddove ce ne fosse bisogno. Nel loro utilizzo come sistema di daylighting, si attua il seguente processo: la luce solare viene captata da un pannello solare posto all'esterno e trasportata all'interno dell'edificio attraverso i cavi di fibre ottiche, da cui viene poi emessa in ambiente attraverso dei diffusori.

Con fibre ottiche di alta qualità, la luce solare può essere trasportata fino ad una distanza di 20m dal pannello solare (partendo da un punto ben esposto al Sole): in questo modo diventa possibile trasportarla dove c'è scarsità o totale assenza di luce naturale. Il sistema trasporta solo la parte visibile dello spettro solare: filtra quindi sia i raggi ultravioletti (che possono degradare gli oggetti d'arte), sia i raggi infrarossi (che apportano calore agli ambienti interni).

Il pannello solare può essere montato su coperture o facciate: lenti ottiche vengono usate per concentrare e raccogliere la luce solare in entrata sulle teste delle fibre ottiche. Alle nostre latitudini, è sconsigliato montare il pannello in facciata, in quanto il Sole è più in verticale nella

stagione estiva, mentre alle latitudini più a Nord lo si può montare anche in facciata, in posizione verticale o leggermente inclinato. La direzione preferenziale del pannello è la direzione Sud per l'emisfero nord del pianeta, viceversa per l'emisfero opposto (ma può essere montato anche in altre direzioni quando vi sia un'esigenza di illuminazione maggiore o alla mattina o alla sera). Ogni pannello solare ha mediamente una superficie di 1m^2 . Al suo interno ci sono 64 lenti di Fresnel che si muovono uniformemente attorno ai loro assi: questo movimento consente l'inseguimento del Sole durante l'arco della giornata. Il pannello solare dispone di un sistema di puntamento solare che guida l'inclinazione delle lenti di Fresnel, mosse da un sistema motorizzato a basso consumo, nella direzione del Sole. Il pannello può essere così installato senza una pre-programmazione. Dal punto di vista tecnico, il sistema di puntamento è controllato da un fotosensore che comunica con un microcomputer che verifica continuamente l'inclinazione delle lenti mantenendole costantemente perpendicolari ai raggi solari. Trovata la fonte luminosa solare, il sistema di puntamento inizia ad inviare dati e a dialogare con il microcomputer, impara e ricorda il tragitto solare, ed elabora informazioni per il migliore puntamento delle lenti. Tenere posizionate le lenti di Fresnel sempre perpendicolarmente all'ingresso della luce solare durante l'arco della giornata assicura una concentrazione della luce sulle teste delle fibre ottiche di diametro 0,75mm collocate sotto a ogni lente. Da ogni pannello solare escono quattro cavi di fibra ottica dislocabili anche in quattro punti diversi dell'ambiente, cavi che sono composti da molte fibre ottiche sottili di tipo standard per il trasporto della luce. Ogni cavo ha un diametro di 6mm (densità 30g/m) e può avere una lunghezza massima di 20m. Il raggio di curvatura massima è pari a 50mm, che consente applicazioni con passaggi tortuosi e ingombri ridotti. Le fibre ottiche sono rivestite di Megalon, materiale ritardante della combustione. Normalmente un cavo di fibre ottiche in PMMA (PolyMethylMetaAcrylate) è composto da 16 fibre ottiche da 0,75 mm di diametro. La trasmissione luminosa è pari a 95,6 % per metro: le fibre ottiche sono caratterizzate quindi da un elevatissimo grado di trasmissione della luce solare.

Il sistema ha la capacità di concentrare la luce solare con un ampio angolo di incidenza (questa importante caratteristica assicura un alto flusso luminoso). Il pannello solare raccoglie la luce solare con un angolo incidente a 60 gradi dalla direzione del Sole, formando un cono di captazione attiva pari a 120 gradi (Fig. 1.70).



Figura 1.70. Università di Lund, Svezia, impianto di illuminazione a fibre ottiche: pannelli solari di captazione.

Questo angolo rappresenta una media di 8 ore di luce solare durante l'arco della giornata. Ad esempio, il flusso luminoso uscente da fibre ottiche di breve lunghezza, è di 14.000 lumen in una giornata con un illuminamento esterno pari a 100.000 lux. Una volta uscita dai cavi di fibre ottiche, la luce solare è emessa negli ambienti attraverso diffusori, appositamente studiati per l'utilizzo della luce solare senza alterarne lo spettro luminoso (Fig. 1.71).



Figura 1.71. Università di Lund, Svezia, impianto di illuminazione a fibre ottiche: sistema di diffusione della luce.

È stato studiato anche un sistema di illuminazione ibrida che integra luce solare e artificiale: in questo caso i diffusori contengono un sistema di rilevamento dell'intensità della luce naturale che compensano con luce artificiale in caso di insufficienza. È possibile disattivare temporaneamente il sistema interrompendo il flusso. Il sistema può essere applicato ad uffici, scuole, cliniche, negozi, musei, gallerie d'arte e abitazioni, etc.

E' stato osservato che senza l'uso di fibre ottiche c'è un maggiore risparmio energetico per ambienti di piccole dimensioni e ambienti più larghi che profondi, mentre con l'uso delle fibre ottiche ambienti con un'area di facciata più piccola (con un'ampiezza più contenuta) e dimensioni più grandi offrono un potenziale più alto di risparmio energetico, e questo potenziale cresce al decrescere dell'area della finestra. L'aggiunta delle fibre ottiche per portare più luce nel fondo della stanza fornisce però solo un piccolo incremento al grande risparmio energetico proveniente dall'uso delle finestre. Questa può essere un'indicazione del fatto che l'applicazione delle fibre ottiche per il trasporto della luce naturale potrebbe dimostrarsi non necessariamente redditizia per ambienti dotati di finestre (diverso è invece il discorso per ambienti che non sono dotati di finestre).

Il costo dovuto all'uso di fibre ottiche è molto alto perché il sistema a fibra ottica usato per trasportare la luce naturale nell'edificio richiede un adeguato sistema collettore di luce. I risultati sperimentali mostrano che l'uso di fibre ottiche può incrementare il risparmio energetico, ma rappresentano un investimento non così attraente come l'integrazione della luce artificiale con quella naturale proveniente solo dalle finestre.

Riassumendo:

le fibre ottiche sono un sistema **interno/esterno, mobile e continuo**. Sono utilizzate su tetti e facciate verticali. Risultano efficienti con tutte le altezze solari e condizioni di cielo sereno. In Tab. 1.17 sono indicati i vantaggi e gli svantaggi del sistema.

Tabella 1.17. Vantaggi e svantaggi delle fibre ottiche.

Vantaggi	Svantaggi
Sfruttamento dei guadagni solari in inverno	Ridotta disponibilità di luce naturale (in caso di cielo parzialmente coperto)
Protezione dall'abbagliamento	Il sistema funziona solo in presenza di luce solare visibile
Distribuzione uniforme della luce diurna	Distribuzione disuniforme della luce naturale (in caso di cielo parzialmente coperto e di ambienti con finestre)
Possibilità di portare luce diurna anche in ambienti privi di finestre	Mancanza di contatto visivo con l'esterno
Aumento della disponibilità complessiva di luce diurna	Costo elevato
Risparmi energetici sulla luce artificiale	
Ingombro ridotto e flessibilità dei cavi (ciò facilita l'installazione del sistema in edifici già esistenti)	
Non alterazione dello spettro luminoso della luce solare	
Filtraggio dei raggi ultravioletti ed infrarossi	
Riduzione del riscaldamento globale	
Miglioramento della visibilità in relazione alla migliore qualità della luce (luce solare) e del benessere degli occupanti	
Minimo consumo elettrico necessario al funzionamento del sistema (consumo medio di 2W equivalente ad un costo elettrico annuo inferiore ad 1€)	
Risparmi energetici sui consumi necessari per il condizionamento in estate	
Minimo intervento di pulizia e manutenzione (si deve solo pulire il vetro del pannello solare 1 o 2 volte all'anno)	
Applicabile fino ad una distanza di 20m dal pannello solare esterno	

17. VETRI CHIARI (Glasses)

trasmissione ● alta	assorbimento ○ bassa	riflessione ○ bassa
---------------------------	----------------------------	---------------------------

Sono vetri ottenuti attraverso il procedimento float e normalmente sono utilizzati come elemento di separazione e protezione dell'ambiente interno dalle intemperie, garantendo vista e comunicazione con gli spazi esterni.

Hanno un'elevatissima trasparenza e possono arrivare, mantenendosi piani, a dimensioni notevoli (anche molti m²) con spessori che vanno da 2 a 19 mm a seconda della grandezza della superficie. Non subendo nessun tipo di trattamento però, si rivelano deboli dal punto di vista termico e la soluzione di montarli in doppi vetri se da una parte ne incrementa le proprietà di isolamento termico, dall'altra ne riduce la capacità di trasmissione di luce naturale in ambiente. Rispetto ai materiali polimerici, i vetri chiari hanno una maggiore rigidità, una buona resistenza alle abrasioni superficiali e all'azione di degrado degli agenti atmosferici; in più, non sono infiammabili. Di contro, hanno il grande svantaggio di non essere in grado di svolgere alcuna funzione di controllo sui flussi luminosi solari e termici, che entrano in ambiente pressochè nella loro totalità. Non sono in grado di schermare in alcun modo la radiazione solare diretta (per evitare fenomeni di abbagliamento e surriscaldamento estivo) né di ridirezionarla per ottimizzarne l'ingresso all'interno dell'edificio. Nelle Fig. 1.72 e 1.73 sono illustrati due esempi di applicazione particolarmente significativi.



Figura 1.72. Fondazione Cartier, Parigi



Figura 1.73. Stazione di Londra

Riassumendo:

i vetri chiari possiedono un'alta trasmissione luminosa e solare. Sono sistemi fissi e continui caratterizzati da modalità di riflessione speculare; in genere sono utilizzati per finestre verticali, lucernari e coperture trasparenti. Risultano efficienti con tutte le altezze solari e tutte le condizioni di cielo. In Tab. 1.18 sono indicati i vantaggi e gli svantaggi del sistema.

Tabella 1.18. Vantaggi e svantaggi dei vetri chiari.

Vantaggi	Svantaggi
Guadagni solari in inverno	Elevati carichi termici in estate
Elevata disponibilità di luce naturale	Possibili problemi di abbagliamento: necessità di aggiungere elementi di protezione dall'abbagliamento diretto ad integrazione del vetro
Vista verso l'esterno	Necessità di strutture di schermatura
Non alterazione cromatica della luce naturale	Disuniforme distribuzione di luce naturale (nel caso di illuminazione unilaterale)
Resistenza alle abrasioni superficiali e agli agenti atmosferici	
Economicità	
Disponibilità di lastre anche di grandi dimensioni	
Manutenzione minima	

18. VETRI COLORATI IN MASSA (assorbenti) (Coloured glasses)

trasmissione ○ bassa	assorbimento ● alta	riflessione ○ bassa
----------------------------	---------------------------	---------------------------

Questa tipologia di vetri è ottenuta attraverso l'aggiunta di pigmenti colorati (inizialmente solo grigio e verde, poi anche blu e molte altre gradazioni) nella pasta vetrosa. Più è scuro il colore, maggiore è la quantità di radiazione solare assorbita e quindi schermata.

Sono vetri che possiedono un'elevata capacità di assorbimento luminoso e termico: grazie a questi si riesce a ridurre del 75% il carico termico di un ambiente in condizioni di cielo sereno, garantendo allo stesso tempo la vista all'esterno e una discreta trasparenza. La lastra vetrata così colorata risulta trasparente a determinate lunghezze d'onda percepite come colore dall'occhio umano (Fig. 1.74). Ciò porta ad una trasmissione di tipo selettivo in termini cromatici che può generare sia ambienti interessanti e stimolanti, che ambienti scuri e non confortevoli. Questi vetri sono capaci di contenere oltre all'irraggiamento termico diretto, anche l'irraggiamento diffuso e l'intensità luminosa trasmessa all'interno.



Figura 1.74. Sede della Tobias Grau

Riassumendo:

i vetri colorati possiedono un **elevato assorbimento luminoso e termico**. Sono sistemi **fissi e continui** ed hanno modalità di riflessione **speculare**. Di solito si impiegano, come i vetri chiari, nelle finestre verticali, nei lucernari e in coperture trasparenti. Risultano efficienti con tutte le altezze solari e tutte le condizioni di cielo. In Tab. 1.19 sono indicati i vantaggi e gli svantaggi del sistema.

Tabella 1.19. Vantaggi e svantaggi dei vetri colorati.

Vantaggi	Svantaggi
Riduzione dei carichi termici in estate	Scarsi guadagni solari in inverno
Resistenza agli agenti atmosferici	Possibili problemi di abbagliamento se i vetri sono poco assorbenti
Economicità	Non uniforme distribuzione della luce naturale (nel caso di illuminazione unilaterale)
Manutenzione minima	Ridotta disponibilità di luce naturale (in caso di cielo coperto e specie con vetri scuri)
Notevole efficacia se il sistema viene integrato in un serramento a doppi vetri: all'esterno vetro colorato e all'interno vetro chiaro (si ha così anche un maggiore isolamento termico)	Vista verso l'esterno cromaticamente alterata
	Alterazione cromatica della luce naturale
	Possibile discomfort termico per gli occupanti, se la lastra colorata è all'interno (in un serramento a vetri doppi) perché questa raggiunge temperature elevate a causa dell'assorbimento

19. VETRI TRATTATI IN SUPERFICIE (Superficially treated glasses)

A questa classe di schermature appartengono tutti quei vetri che grazie a delle modificazioni superficiali di varia natura acquistano delle proprietà riflettenti o la capacità di discriminare le radiazioni dello spettro solare che sono in grado di attraversarli.

19.1. PELLICOLE (vetri selettivi spettrali) (coatings)



Le pellicole sono degli strati microsottili trasparenti integrati da diversi rivestimenti speciali; sono progettate per essere applicate su un vetro chiaro per migliorarne le prestazioni (Fig. 1.75).

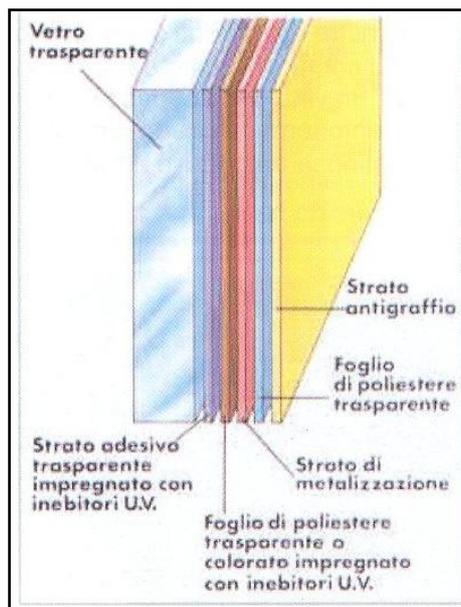


Figura 1.75. Pellicola colorata stratificata su un vetro

L'uso di pellicole differenti dà luogo ad una gamma piuttosto ampia di soluzioni. Pellicole vengono applicate per proteggere dalla radiazione solare e dall'abbagliamento (pellicole riflettenti, che rendono i vetri riflettenti), per attenuare la radiazione UV riducendo lo scolorimento delle superfici esposte alla luce, per la tutela della privacy, etc. Le pellicole proteggono efficacemente dall'irraggiamento solare in estate, poiché riflettono verso l'esterno la radiazione incidente (soprattutto la parte nel campo dell'infrarosso, principale responsabile dell'aumento del carico termico). Si ottengono in questo modo anche risparmi energetici dovuti al minor uso dell'impianto di condizionamento. La trasmissione luminosa risulta però modesta, tanto da determinare una disponibilità di luce naturale in ambiente a volte insufficiente e uno scarso sfruttamento dei guadagni solari in inverno (il totale di energia solare respinta da un vetro sottoposto a questo tipo di trattamento si aggira attorno al 75%-80%, mentre il totale di energia solare passante attorno al 25%-20%).

Riassumendo:

I vetri con pellicole possiedono un elevato assorbimento ed un'elevata riflessione luminosa e solare. Sono sistemi fissi e continui ed hanno modalità di riflessione speculare. Il loro campo di

utilizzo spazia dalle finestre verticali ai lucernari e alle coperture trasparenti, fino all'utilizzo nei condotti di luce. Risultano efficienti con tutte le altezze solari e tutte le condizioni di cielo. In Tab. 1.20 sono indicati i vantaggi e gli svantaggi del sistema.

Tabella 1.20. Vantaggi e svantaggi delle pellicole.

Vantaggi	Svantaggi
Riduzione dei carichi termici in estate	Scarsi guadagni solari in inverno
Protezione dall'abbagliamento in estate e in inverno	Non uniforme distribuzione della luce naturale
Effetto specchio: tutela della privacy	Ridotta disponibilità di luce naturale
Vista verso l'esterno inalterata	Durata limitata nel tempo
Possibilità di filtrazione dei raggi ultravioletti ed infrarossi	Manutenzione frequente e delicata

19.2. VETRI RIFLETTENTI (reflecting glasses)



Il principio di funzionamento di questi vetri risiede nel trattamento della superficie di un vetro chiaro con depositi metallici o nell'applicazione sulla faccia esterna di una pellicola metallizzata riflettente.

L'azione schermante delle lastre riflettenti risulta più efficace rispetto a quella dei vetri colorati (Fig. 1.76): gran parte dei raggi solari a bassa lunghezza d'onda viene riflessa direttamente dalla pellicola posta all'esterno senza neanche incidere sul vetro, evitando che questo si surriscaldi. La visione attraverso questo tipo di vetri è a senso unico: generalmente si vede sempre dall'ambiente meno illuminato verso l'ambiente più illuminato (di giorno si vede verso l'esterno ma non verso l'interno, viceversa di notte).

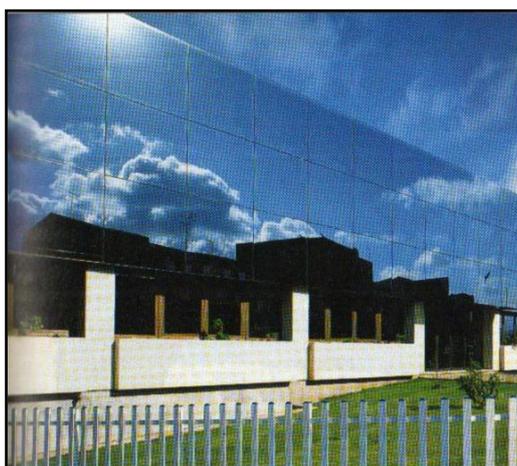


Figura 1.76. Tipico esempio di edificio con vetri riflettenti

Sono disponibili sistemi caratterizzati da diversi fattori di riflessione, e quindi diversi gradi di trasparenza, che si rivelano utili per una vasta gamma di applicazioni.

Questo componente è ottimale per realizzare facciate trasparenti continue (curtain walls): la vista ridotta verso l'esterno infatti fa sì che si preferisca usare questi vetri per edifici destinati al terziario, e per integrazione di aggetti esposti a Sud.

Nelle Fig. 1.77 e 1.78 sono illustrati due esempi di applicazione particolarmente significativi del sistema considerato.



Figura 1.77. Edifici con pellicole riflettenti



Figura 1.78. Edifici con vetri riflettenti: edificio Sogari, Bari

Riassumendo:

i vetri riflettenti possiedono un'elevata riflessione luminosa e solare. Sono fissi e continui ed hanno modalità di riflessione speculare. Sono utilizzati in finestre verticali, lucernari e coperture trasparenti. L'orientamento ideale è est ed ovest. Risultano efficienti con tutte le altezze solari e tutte le condizioni di cielo. In Tab. 1.21 sono indicati i vantaggi e gli svantaggi del sistema.

Tabella 1.21. Vantaggi e svantaggi dei vetri riflettenti.

Vantaggi	Svantaggi
Riduzione dei carichi termici in estate	Scarsi guadagni solari in inverno
Protezione dall'abbagliamento in estate e in inverno	Possibili problemi di abbagliamento negli spazi esterni circostanti dovuti alla riflessione speculare di parti di cielo ad elevata luminanza
Vista verso l'esterno (di giorno)	Disuniforme distribuzione della luce naturale (nel caso di illuminazione unilaterale)
	Ridotta disponibilità di luce naturale
	Alterazione cromatica della luce naturale (se il vetro riflettente è anche colorato)
	Manutenzione frequente e delicata (salvo nel caso in cui il coating è applicato al vetro nel processo di produzione)

20. VETRI CROMOGENICI (vetri a trasmissione variabile: vetri attivi)

Il guadagno solare può influire positivamente o negativamente sulle prestazioni energetiche degli ambienti. La sua influenza dipende dal tipo di materiale trasparente, dall'utilizzo, dal clima, dalla stagione e anche dall'ora del giorno. Contrariamente a quello che accade per la trasmittanza termica, per cui un basso valore è sempre auspicabile, per il fattore solare non esiste un target-value universale. Per rispondere a questo tipo di esigenza sono stati sviluppati i materiali cromogenici, materiali in grado di cambiare le proprie caratteristiche ottiche e il proprio colore in funzione di un parametro di controllo. Essi permettono, col loro funzionamento, di variare esclusivamente la quantità di luce trasmessa con un processo sempre reversibile, senza modificare od ostruire la vista attraverso le finestre (tranne che nel caso dei vetri a cristalli liquidi).

In seguito al cambiamento delle proprietà ottiche, il materiale cromogenico passa da uno stato altamente trasmittente, ad uno parzialmente riflettente o assorbente (e dunque meno trasmittente). Il materiale può anche presentare un comportamento selettivo in funzione dello spettro solare, limitando le proprie trasformazioni a determinati intervalli del campo visibile o del campo solare.

Si possono ipotizzare tre tipi diversi di transizione del vetro:

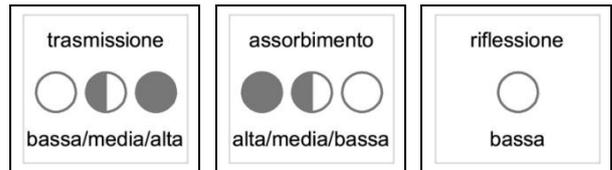
- trasparente – riflettente;
- trasparente – assorbente;
- riflettente – assorbente.

Le prime due, e nello specifico la prima, sono molto interessanti per le applicazioni nel campo edilizio, mentre la terza ha poca rilevanza in questo settore.

Secondo la tipologia di parametro che provoca la transizione, rispettivamente l'intensità luminosa, la temperatura e un campo elettrico, si hanno: vetri fotocromici, vetri termocromici, vetri elettrocromici e vetri a cristalli liquidi.

I vetri fotocromici e termocromici sono dispositivi autoregolanti in funzione delle condizioni al contorno, mentre i vetri elettrocromici e quelli a cristalli liquidi una volta attivati elettricamente, richiedono la regolazione da parte dell'utenza. Questi vetri, anche se caratterizzati da ottime prestazioni, hanno ancora costi di installazione piuttosto elevati che finiscono col limitarne il campo di applicazione a realizzazioni su larga scala, come palazzi per uffici.

20.1 VETRI FOTOCROMICI (Photochromic glasses)



I vetri fotocromici sono vetri che cambiano le loro caratteristiche nel momento in cui sono esposti alla luce, principalmente ai raggi UV, e ritornano al loro stato originale quando vengono oscurati.

Essi presentano una transizione di tipo trasparente-assorbente. La transizione si verifica grazie alla presenza nella pasta di vetro di composti, organici o inorganici, sensibili ai raggi ultravioletti (i migliori sono i cristalli degli alogenuri di argento). In questo caso, l'irradiazione con UV di lunghezza d'onda compresa tra i 300 e 400 nm determina la rottura dei legami di tali cristalli con separazione di argento metallico ed alogeno, che rimangono disponibili nella matrice vetrosa. Quando la radiazione UV è rimossa si ha la ricombinazione molecolare fra Ag metallico ed alogeno con un ritorno allo stato trasparente. Sono questi composti che conferiscono alla lastra la capacità di modificare autonomamente la propria trasmissione luminosa in funzione della quantità di luce incidente sulla sua superficie. Il fenomeno è dovuto al cambiamento di stato (reversibile) dei composti chimici fra due stati di energia: i composti presentano di conseguenza uno spettro di assorbimento differente. In pratica, si osserva un oscuramento dell'elemento fotocromico, che può essere riportato al suo stato originale nel momento in cui si viene ad interrompere l'irraggiamento su di esso.

Questi materiali, comunemente usati per le lenti degli occhiali da sole, non possono essere attualmente prodotti attraverso il processo float (processo con cui si realizzano i vetri chiari), e di conseguenza il loro utilizzo in architettura è tuttora notevolmente costoso (Fig. 1.79).



Figura 1.79. Ricostruzione di facciata con impiego di vetri fotocromici

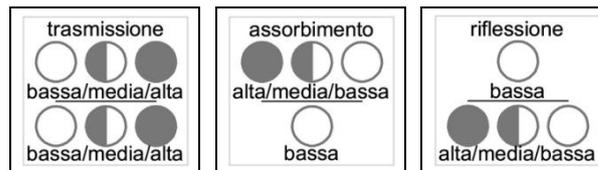
Riassumendo:

i vetri fotocromici sono caratterizzati da una variazione della trasmissione luminosa e solare e da una riflessione speculare. Sono sistemi fissi e continui, utilizzati per finestre verticali, lucernari e coperture trasparenti. Risultano efficienti con tutte le altezze solari e condizioni di cielo sereno. In Tab. 1.22 sono indicati i vantaggi e gli svantaggi del sistema.

Tabella 1.22. Vantaggi e svantaggi dei vetri fotocromici.

Vantaggi	Svantaggi
Comportamento dinamico in funzione delle condizioni di illuminazione naturale esterne	Scarsa riduzione dei carichi termici in estate (hanno scarsa capacità di assorbimento nell'infrarosso)
Sfruttamento dei guadagni solari in inverno	Non uniforme distribuzione della luce naturale (nel caso di illuminazione unilaterale)
Protezione dall'abbagliamento in estate e in inverno	Alterazione cromatica della luce naturale
Elevata disponibilità di luce naturale	Ridotta dimensione delle lastre attualmente disponibili
Vista verso l'esterno	Manutenzione frequente e delicata
Filtrazione dei raggi UV	Costo elevato
Ottima stabilità e durabilità ai cicli (nel caso dei composti inorganici)	

20.2. VETRI TERMOCROMICI (Thermochromic glasses)



Nei vetri termocromici il cambiamento di colore del materiale, e quindi delle sue proprietà ottiche, è causato dalla temperatura che induce una reazione chimica o una transizione di fase tra due stati in determinati composti chimici (Fig 1.80).

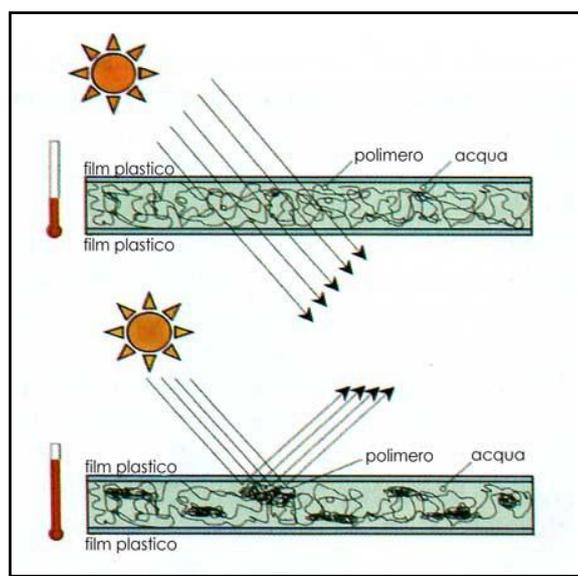


Figura 1.80. Funzionamento di un dispositivo termocromico.

Sono prodotti applicando ad una lastra vetrata uno speciale rivestimento che rende il vetro così composto in grado di modificare le proprie capacità di assorbimento luminoso, e quindi di trasmissione, in funzione della sua temperatura superficiale. Al di sopra di un valore critico di temperatura, variabile tra 10°C e 90°C a seconda dei prodotti, il vetro risulta opaco alla radiazione luminosa; al di sotto di tale valore critico esso risulta trasparente. Per effetto della maggiore temperatura, il diametro delle catene molecolari costituenti il materiale aumenta fino a divenire dimensionalmente superiore alla lunghezza d'onda della radiazione luminosa incidente, che viene quindi riflessa verso l'esterno. In realtà, l'opacità raggiunta non è completa, in quanto anche al di sopra della temperatura di soglia si ha una parte di radiazione trasmessa. Al contrario, nemmeno la trasparenza risulta totale. I vetri termocromici possono essere caratterizzati sia da una transizione del tipo trasparente-assorbente (ad esempio in presenza di rivestimenti di VO₂), sia da una transizione del tipo trasparente-riflettente (ad esempio in presenza di sospensioni racchiuse fra due lastre di vetro, tipo idrogel). Le loro maggiori applicazioni sono per indicatori di temperatura, vernici speciali e inchiostri da utilizzare per documenti riservati. Sono in fase di studio applicazioni per l'edilizia.

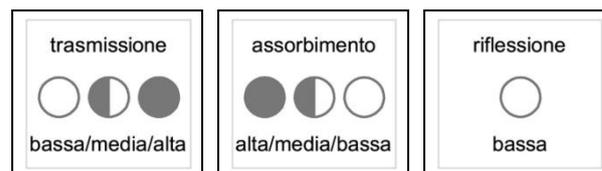
Riassumendo:

i vetri termo cromatici sono caratterizzati da una variazione della trasmissione luminosa e solare, da una riflessione speculare e da una trasmissione diffondente. Sono sistemi fissi e continui, utilizzati per finestre verticali, lucernari e coperture trasparenti. Risultano efficienti con tutte le altezze solari e condizioni di cielo sereno. In Tab. 1.23 sono indicati i vantaggi e gli svantaggi del sistema.

Tabella 1.23. Vantaggi e svantaggi dei vetri termocromici.

Vantaggi	Svantaggi
Comportamento dinamico in funzione delle condizioni di illuminazione naturale esterne	Disuniforme distribuzione della luce naturale (nel caso di illuminazione unilaterale)
Riduzione dei carichi termici in estate (vengono riflessi verso l'esterno anche i raggi infrarossi)	Passaggio non graduale del sistema dal comportamento opaco a quello trasparente con conseguenti improvvise variazioni del livello di illuminamento
Protezione dall'abbagliamento in estate e in inverno	Problemi di adattamento, e quindi di discomfort visivo, da parte degli utenti (dovuti al punto precedente)
Sfruttamento dei guadagni solari in inverno	Manutenzione frequente e delicata
Elevata disponibilità di luce naturale	Costo elevato
Vista verso l'esterno	
Non alterazione cromatica della luce naturale	
Risparmi energetici sui consumi necessari per il condizionamento in estate	

20.3. VETRI ELETTROCROMICI (Electrochromic glasses)



Differentemente dai vetri fotocromici e termocromici, che esibiscono un comportamento passivo, i dispositivi elettrocromici (e così anche i cristalli liquidi) reagiscono a grandezze elettriche (tensione e corrente) ad essi applicati; possono quindi essere controllati e variati nelle loro caratteristiche, in modo del tutto indipendente. Sono ottenuti per sovrapposizione di un elevato numero di lastre, controllate per mezzo di un campo elettrico attraverso il quale un operatore, modificando opportunamente il segnale elettrico di comando, determina una proporzionale variazione delle proprietà di trasmissione luminosa dell'elemento vetrato risultante.

Il fatto che i vetri elettrocromici mutino la loro trasmissione luminosa e solare in modo del tutto indipendente, è molto interessante, poiché la logica e gli algoritmi di controllo possono essere selezionati e variati in funzione di un gran numero di parametri (la stagione, la presenza di occupanti, il clima, etc.), in modo da consentire un comportamento molto flessibile.

La variazione della trasparenza è dovuta ad un passaggio di ioni all'interno della lastra. I vetri elettrocromici sono costituiti da cinque strati: lo strato centrale conduttore di ioni, che è compreso fra uno strato di accumulo e uno strato elettrocromico, e due strati conduttori trasparenti esterni (il substrato di vetro o di materiale polimerico, che costituisce la parte più esterna del sistema, serve solo a fornire un'appropriata resistenza meccanica all'elettrocromico e come supporto agli strati successivi del dispositivo). Il principio di funzionamento è dato applicando una differenza di potenziale elettrico ai due strati conduttori trasparenti: si determina così un'estrazione di ioni dallo strato di accumulo e il loro passaggio, attraverso il conduttore, allo strato elettrocromico, in pratica una vera e propria cella elettrochimica, con conseguente modifica del colore e delle proprietà ottiche. Con impulso opposto, gli ioni seguono il percorso inverso, rendendo nuovamente chiaro l'intero sistema e ritornando alla configurazione originaria: il processo è infatti continuo e reversibile (Fig. 1.81).

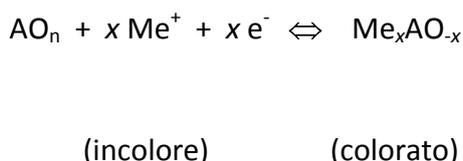


Figura 1.81. Finestra con vetri elettrocromici, in basso nella forma colorata, in alto in quella trasparente.

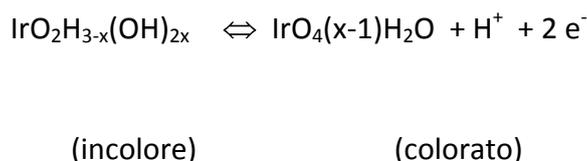
Il sistema può avere uno o entrambi gli elettrodi caratterizzati dalla proprietà di cambiare colorazione (e quindi entrambi costituiti da materiale elettrocromico) a secondo di come vengono polarizzati (da anodo o da catodo). In genere, la configurazione più frequente è comunque quella che ha un solo strato elettrocromico.

Il fattore di trasmissione luminosa può variare, nel passaggio dalla condizione non attiva a quella attiva, da un valore dell'80% al 10% (e in corrispondenza, il fattore di trasmissione solare dal 70% al 5%).

La variazione di colore è determinata da un processo reversibile di intercalazione-deintercalazione di un metallo nello strato elettrocromico che cambia colore in seguito all'acquisto o alla cessione di un elettrone attraverso un processo di ossido-riduzione, per mantenere l'elettroneutralità del sistema. Inoltre, i materiali elettrocromici si classificano in base alla polarizzazione che determina la colorazione. Ci sono così dispositivi elettrocromici a "colorazione catodica" e quelli a "colorazione anodica"[3,4]. I primi sono costituiti da film di WO₃, MoO₃, V₂O₅, TiO₂, etc., ed hanno la caratteristica di essere incolore nella loro forma ossidata e colorati nella forma ridotta:



dove lo ione intercalato Me⁺ può essere H⁺, Li⁺, Na⁺ o Ag⁺. I secondi invece sono basati sugli ossidi: IrO_xH_y, NiO_xH_y, LiCrO₂, etc.:



Di seguito (Fig. 1.82) viene rappresentata la sezione di una finestra elettrocromica in cui sia il catodo che l'anodo sono costituiti da materiale elettrocromico che intercalano lo ione Litio (Li⁺). Nella figura, ITO sta per Indium Tin Oxide, strato che non partecipa alla reazione elettrocromica e che ha la sola funzione di garantire il contatto elettrico, MEC1 (colorazione catodica) e MEC2 (colorazione anodica) sono i due materiali elettrocromici, CI è il conduttore ionico con funzione di garantire il trasferimento dello ione di intercalazione da un materiale all'altro, e infine il generatore serve a determinare il colore delle finestra fissando una opportuna polarizzazione del dispositivo elettrocromico.

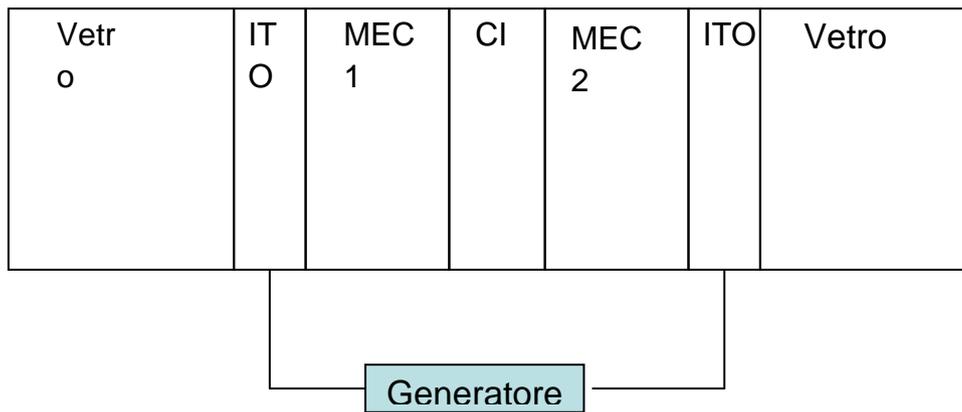


Figura 1.82. Sezione di una vetro elettrocromico: principio di funzionamento.

La semplice inversione della polarizzazione determina la transizione dalla forma incolore (Fig. 1.83) a quella colorata (Fig. 1.84).

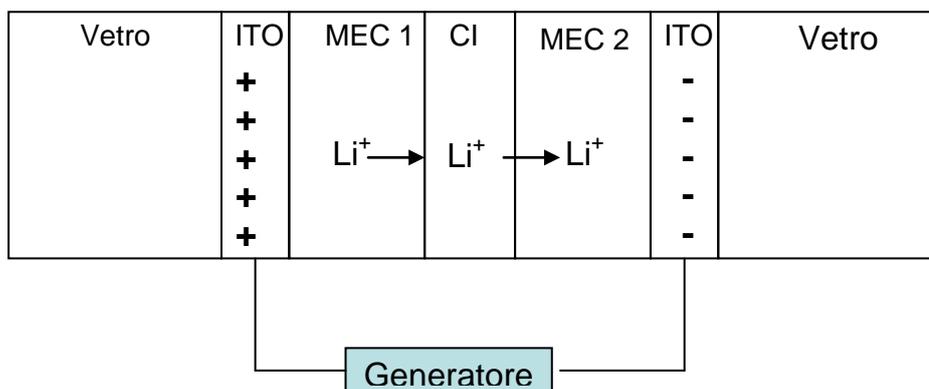


Figura 1.83. Sezione di una vetro elettrocromico: forma incolore.

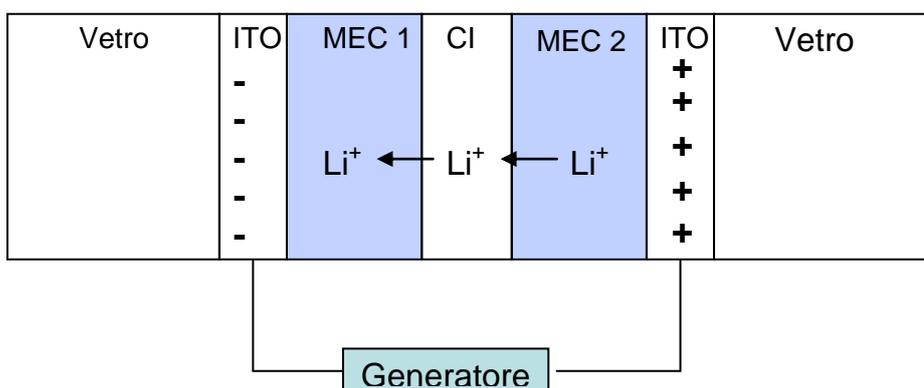


Figura 1.84. Sezione di una vetro elettrocromico: forma colorata per inversione della polarizzazione.

Un vantaggio che rende molto attraenti questo tipo di materiali in campo architettonico è lo scarso consumo energetico durante la transizione, e la possibilità di memorizzare (fino a 24 ore) lo stato attuale: una volta effettuata la regolazione a grado di trasmittanza richiesto, quindi, non è

necessario continuare ad alimentare il dispositivo; si interviene con un segnale opposto solo per ripristinare la condizione originaria.

I problemi da risolvere sono in particolar modo legati alle dimensioni massime di superficie trasparente ottenibili senza compromettere le caratteristiche di uniformità e di velocità di transizione, e alla diminuzione dell'escursione di trasmittanza all'aumentare dei cicli di attivazione.

Le prestazioni energetiche complessive di edifici dotati di vetrate elettrocromiche dipendono fortemente dalle strategie e dagli algoritmi di controllo. L'utilizzo di sistemi non idonei o non calibrati con il sistema di condizionamento ambientale e con il sistema di illuminazione artificiale può ridurre e, in alcune situazioni estreme, annullare completamente i vantaggi energetici che si potevano ottenere potenzialmente.

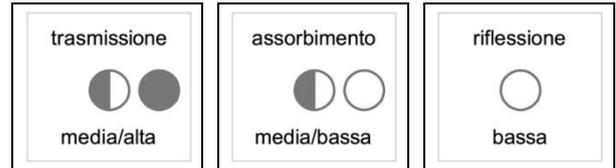
Riassumendo:

i vetri elettrocromici sono caratterizzati da una variazione della trasmissione luminosa e solare e da una riflessione speculare. Sono sistemi fissi e continui utilizzati per finestre verticali, lucernari e coperture trasparenti. Risultano efficienti con tutte le altezze solari e condizioni di cielo sereno. In Tab. 1.24 sono indicati i vantaggi e gli svantaggi del sistema.

Tabella 1.24. Vantaggi e svantaggi dei vetri elettrocromici.

Vantaggi	Svantaggi
Reagiscono a grandezze elettriche: sono controllati in modo indipendente	Difficoltà ad ottenere lastre di grandi dimensioni senza compromettere l'uniformità e la velocità di transizione
Riduzione dei carichi termici in estate	Diminuzione dell'escursione di trasmittanza all'aumentare dei cicli di attivazione (perdita di efficacia del dispositivo nel tempo dovuta al verificarsi di reazioni irreversibili: gli ioni addetti al trasporto ionico della carica si fissano nella struttura dello strato elettrocromico)
Sfruttamento dei guadagni solari in inverno	Disuniforme distribuzione della luce naturale (nel caso di illuminazione unilaterale)
Protezione dall'abbagliamento in estate e in inverno	Costo elevato
Elevata disponibilità di luce naturale	
Vista verso l'esterno	
Non alterazione cromatica della luce naturale	
Scarso consumo energetico durante la transizione	
Memorizzazione dello stato attuale (fino a 24 ore)	
Comportamento flessibile	
Passaggio graduale del sistema fra le diverse condizioni di trasparenza	
Comfort visivo da parte degli utenti grazie ai tempi di adattamento alle variazioni	
Manutenzione minima	

20.4 VETRI A CRISTALLI LIQUIDI (Liquid crystal glasses)



I vetri a cristalli liquidi reagiscono a grandezze elettriche ad essi applicate; possono quindi essere controllati e variati nelle loro caratteristiche, in modo del tutto indipendente.

Il principio di funzionamento dei cristalli liquidi è dato dalla dispersione del cristallo liquido in una matrice polimerica trasparente posta tra due lastre di vetro (o acrilico) su ciascuna delle quali è depositato un film di ITO che ha la semplice funzione di stabilire il contatto elettrico e quindi di applicare un campo elettrico al materiale sensibile. I cristalli liquidi hanno un comportamento anisotropo: se il raggio luminoso ha una direzione di propagazione parallela all'asse della particella, esso non viene deviato, altrimenti subisce diffrazione come schematizzato in Fig. 1.85. In assenza di campo elettrico, le particelle presenti all'interno del materiale sono orientate in maniera casuale: la radiazione solare incidente subisce una serie di deviazioni successive, il vetro risulta opaco e di colore bianco latte, e di fatto la vista attraverso di esso risulta impedita (scattering state). Quando viene applicato un campo elettrico, le particelle si orientano in un'unica direzione (chiamata asse ottico) eliminando così lo scattering dei raggi luminosi (per la luce incidente che viaggia parallelamente al campo) e quindi il vetro diventa trasparente, permettendo la vista attraverso di esso (clear state).

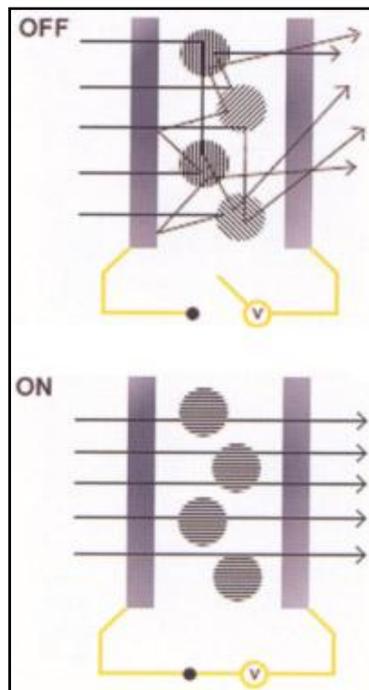


Figura 1.85. Schema di funzionamento dei cristalli liquidi.

In Fig. 1.86 è mostrato un ambiente in cui sono installati dei vetri a cristalli liquidi da cui risulta evidente la loro funzione pratica.



Figura 1.86. Sala riunioni dotata di parete di vetro a cristalli liquidi.

I cristalli liquidi appartengono ad uno stato della materia cosiddetto “mesomorfo”, intermedio fra lo stato solido cristallino e lo stato liquido. Come matrice polimerica, si possono usare le resine epossidiche o i collanti siliconici. Nonostante la raggiunta maturità commerciale di questi materiali, risultano meno interessanti rispetto ai vetri elettrocromici perché devono essere continuamente alimentati, con consumi energetici non trascurabili, perché l’escursione della trasmittanza è piuttosto limitata (0.53-0.77), fatto che si riflette in una ancora più ristretta gamma di variazione del fattore solare, per cui non sono particolarmente efficaci per controllare i guadagni solari.

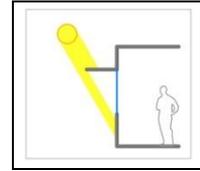
Riassumendo:

i cristalli liquidi sono caratterizzati da una variazione della trasmissione luminosa e solare, da una riflessione speculare (nello stato attivo) e da una trasmissione diffondente (nello stato non attivo). Sono sistemi fissi e continui utilizzati per finestre verticali, lucernari e coperture trasparenti. Risultano efficienti con tutte le altezze solari e tutte le condizioni di cielo. In Tab. 1.25 sono indicati i vantaggi e gli svantaggi del sistema.

Tabella 1.25. Vantaggi e svantaggi dei vetri a cristalli liquidi.

Vantaggi	Svantaggi
Reagiscono a grandezze elettriche: sono controllati in modo indipendente	Il sistema deve essere continuamente alimentato (con discreti consumi energetici)
Comportamento flessibile	Escursione della trasmittanza piuttosto limitata
Riduzione dei carichi termici in estate	Scarsa efficacia nel controllo dei guadagni solari dovuta ad uno stretto intervallo di variazione del fattore solare
Sfruttamento dei guadagni solari in inverno (in presenza di campo elettrico)	Scarso sfruttamento dei guadagni solari in inverno (in assenza di campo elettrico)
Protezione dall'abbagliamento in estate e in inverno	Disuniforme distribuzione di luce naturale quando i cristalli sono attivi (nel caso di illuminazione unilaterale)
Distribuzione relativamente uniforme di luce naturale, grazie alla diffusione luminosa data dai cristalli liquidi in condizione disattivata	Passaggio non graduale del sistema dal comportamento opaco a quello trasparente
Elevata disponibilità di luce naturale	Possibili problemi di adattamento, e quindi di discomfort visivo, da parte degli utenti (dovuti al punto precedente)
Non alterazione cromatica della luce naturale	Impedimento della vista verso l'esterno (in assenza di campo elettrico)
Controllo sia quantitativo che qualitativo della luce entrante in ambiente: poter regolare il passaggio dallo stato trasparente a quello diffondente consente di variare sia il livello sia la distribuzione della luce naturale	Costo elevato
Buone condizioni di comfort visivo	
Non c'è necessità di altri sistemi di schermatura aggiuntivi	
Vista verso l'esterno (in presenza di campo elettrico)	
Manutenzione minima	

21. MENSOLA ORIZZONTALE (Horizontal bracket)



La mensola orizzontale è un elemento strutturale opaco orizzontale situato al di sopra di un'apertura di facciata in modo tale da intercettare la radiazione solare diretta e quindi schermarla (Fig. 1.87).

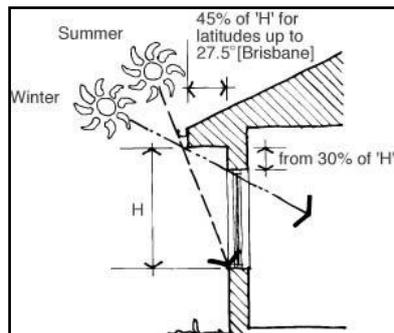


Figura 1.87. Funzionamento della mensola in relazione all'altezza solare

Normalmente sono considerate mensole orizzontali anche balconi, cornicioni, mensole, porticati e logge. Il corretto dimensionamento in facciata di una mensola orizzontale si calcola in rapporto alla larghezza e altezza della finestra che deve schermare (la dimensione è in generale data dalla somma della larghezza e altezza della finestra). Ovviamente, tanto più profondo è l'aggetto, tanto prima i raggi solari vengono intercettati nel corso della giornata e tanto minore risulta la quantità di luce naturale presente in ambiente. E' un tipo di sistema che risulta molto più efficace in estate che in inverno: in estate scherma la radiazione solare diretta senza limitare la vista verso l'esterno, in inverno permette al Sole di penetrare nell'ambiente sfruttandone i guadagni da un punto di vista termico, ma può causare fenomeni di abbagliamento e discomfort visivo (Fig. 1.87 e 1.88).



Figura 1.87. Esempio di applicazione di mensola orizzontale



Figura 1.88. Museo dell'Ara Pacis, Roma

Spesso necessita di essere integrata con altre componenti come tende, vetri riflettenti o schermi verticali, in quanto la sua protezione contro la radiazione diffusa può risultare insufficiente. L'uso di una mensola discontinua a lamelle inclinate al posto di una continua presenta diversi vantaggi, come l'alleggerimento del carico strutturale dello sbalzo, la riduzione di accumulo di aria calda ascensionale che si verifica invece al di sotto di una mensola continua e, infine, consente il fluire di vento e neve.

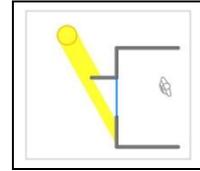
Riassumendo:

la mensola orizzontale è una tipologia di schermatura esterna, fissa, che può essere continua o discontinua (a lamelle), orizzontale o inclinata. Questo elemento viene posizionato esclusivamente in facciata al di sopra di finestre verticali. L'orientamento ideale è sud. Risulta efficiente con elevate altezze solari e condizioni di cielo sereno. In Tab. 1.26 sono indicati i vantaggi e gli svantaggi del sistema.

Tabella 1.26. Vantaggi e svantaggi delle mensole orizzontali.

Vantaggi	Svantaggi
Riduzione dei carichi termici in estate	Insufficiente azione schermante per le ore a bassa altezza solare: prestazioni inefficienti per facciate esposte ad est e ad ovest
Sfruttamento dei guadagni solari in inverno	Possibili problemi di abbagliamento e discomfort visivo in inverno: aggiunta di elementi di protezione da abbagliamento ad integrazione della mensola
Protezione dall'abbagliamento in estate	Disuniforme distribuzione di luce naturale
Vista verso l'esterno	Riduzione della disponibilità complessiva di luce diurna (specie in caso di cielo coperto)
Aspetto estetico-architettonico	Possibile insufficienza di protezione contro la radiazione diffusa
Facile applicabilità anche in edifici esistenti	
Pulizia e manutenzione non necessari	
Nel caso di mensola discontinua a lamelle:	
Alleggerimento del carico strutturale	
Riduzione di accumulo di aria calda ascensionale	
Consente il fluire di vento e neve	

22. MENSOLA VERTICALE (Vertical bracket)



La mensola verticale è una parte strutturale aggettante dell'edificio, o anche un semplice elemento a mensola, che ha uno sviluppo verticale. E' un sistema di controllo fisso e non regolabile che consente di schermare la radiazione solare che proviene dal sole in posizione bassa sull'orizzonte quindi solo la luce che proviene lateralmente. Se il Sole è in posizione frontale rispetto alla facciata, ci possono essere problemi di abbagliamento e surriscaldamento degli ambienti risolvibili progettando mensole inclinate rispetto alla superficie di facciata o aggiungendo alle mensole verticali mensole orizzontali.

Le mensole verticali possono essere disposte in diverso numero e con differente passo a seconda delle esigenze: più sono ravvicinate, più risultano schermati i raggi solari diretti ma risulta maggiormente ridotta la vista verso l'esterno. È possibile rifinire questi elementi schermanti con colori chiari in modo da incrementare la riflessione della luce naturale all'interno degli ambienti, ma in questi casi è necessaria una verifica affinché non si determini una luminanza eccessiva delle superfici finestrate. In Fig. 1.89 e 1.90 sono riportati due esempi di edifici che fanno uso di mensole verticali.



Figura 1.89. Art Centre Riversdale



Figura 1.90. Edifici con mensole verticali

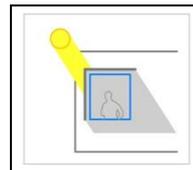
Riassumendo:

la tipologia di schermatura è esterna, fissa, continua o discontinua e verticale. Anche in questo caso, come per le altre tipologie di schermatura, la posizione delle mensole verticali sarà in facciata, nei pressi delle finestre verticali. Differentemente dalle mensole orizzontali, l'orientamento migliore è est, ovest. Risulta efficiente con basse altezze solari e condizioni di cielo sereno. In Tab. 1.27 sono indicati i vantaggi e gli svantaggi del sistema.

Tabella 1.27. Vantaggi e svantaggi delle mensole verticali.

Vantaggi	Svantaggi
Riduzione dei carichi termici in estate	Scarso sfruttamento dei guadagni solari in inverno
Protezione dall'abbagliamento in estate	Possibili problemi di abbagliamento in inverno
Vista verso l'esterno	Possibili problemi di abbagliamento dovuti alla luminanza eccessiva della superficie finestrata per la riflessione della luce diretta del sole sulle mensole
Aspetto estetico-architettonico	Disuniforme distribuzione di luce naturale
Facile applicabilità anche in edifici esistenti	Riduzione della disponibilità complessiva di luce diurna (specie in caso di cielo coperto)

23. MENSOLA MISTA (Mixed bracket)



La mensola mista è il risultato della combinazione di mensole orizzontali e verticali. Questa integrazione permette di ottimizzare l'azione schermante rispetto alle posizioni del sole sia alto che basso sull'orizzonte.

La mensola mista mantiene la vista verso l'esterno, ma la sua capacità di schermatura rispetto a tutte le altezze solari diminuisce notevolmente la disponibilità di luce naturale all'interno degli ambienti (Fig. 1.91). E' un tipo di elemento schermante che necessita quindi di una forte integrazione di luce artificiale, nel caso in cui non sia possibile prevedere un'illuminazione naturale supplementare dall'alto o dall'interno dell'edificio.

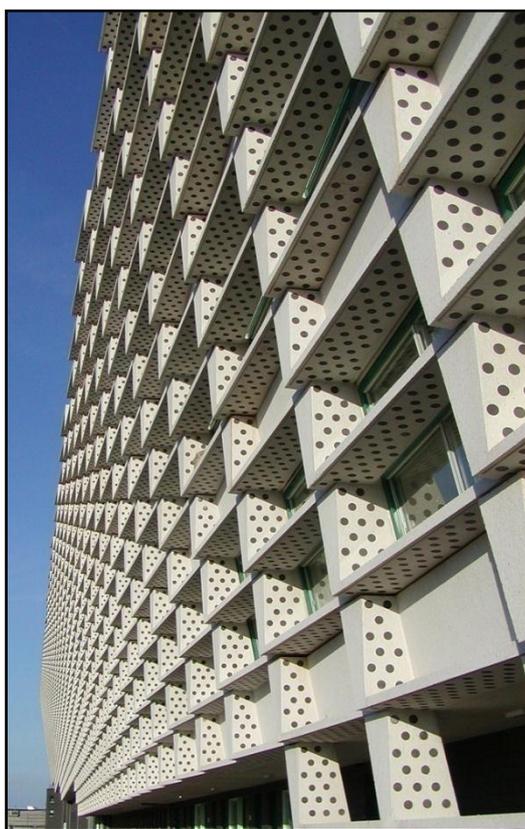


Figura 1.91. Edificio speranza, amore e fortuna, Amsterdam

Riassumendo:

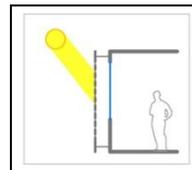
è un tipo di schermatura esterna, fissa, continua o discontinua, combinata orizzontale-verticale. E' posizionata in facciata nei pressi delle finestre verticali. Non c'è orientamento ideale per questo elemento, tutte le esposizioni vanno bene: est, sud/est, sud, sud/ovest, ovest. Risulta efficiente

con tutte le altezze solari e condizioni di cielo sereno. In Tab. 1.28 sono indicati i vantaggi e gli svantaggi del sistema.

Tabella 1.28. Vantaggi e svantaggi delle mensole miste.

Vantaggi	Svantaggi
Riduzione dei carichi termici in estate	Scarso sfruttamento dei guadagni solari in inverno
Protezione dall'abbagliamento in estate e in inverno	Possibili problemi di abbagliamento dovuti alla luminanza eccessiva della superficie finestrata per la riflessione della luce diretta del sole sulle mensole verticali
Vista verso l'esterno	Distribuzione non uniforme della luce naturale
Risparmi energetici sui consumi necessari per il condizionamento in estate	Forte riduzione della disponibilità di luce naturale (specie in caso di cielo coperto)
Aspetto estetico-architettonico	
Facile applicabilità anche in edifici esistenti	

24. FRANGISOLE A GRIGLIA (Brise-soleil sunbreaker)



E' un sistema di schermatura in cui l'elemento schermante è costituito da griglie realizzate in materiale metallico o in legno, collocate perpendicolarmente o parallelamente alla superficie della facciata. Queste griglie presentano forature di diversa forma e dimensione che permettono di schermare la luce, riflettendola e regolandone l'entrata al variare del percorso solare, creando in tal modo un effetto di trasparenza. I frangisole a griglia schermano la radiazione solare diretta e sono trasparenti alla componente diffusa: per questa ragione l'ambiente risulta illuminato con una luce uniforme. In Fig. 1.92 è illustrato a scopo d'esempio un' applicazione del sistema.



Figura 1.92. Banca Popolare di Cipro, Nicosia (Cipro)

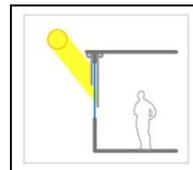
Riassumendo:

il frangisole a griglia è una tipologia di schermatura esterna, fissa, discontinua, diffondente, orizzontale o verticale, posizionata su facciate verticali o su lucernari. L'orientamento migliore per questo tipo di elementi è sud, sud/est, sud/ovest. Risulta efficiente con tutte le altezze solari e condizioni di cielo sereno. In Tab. 1.29 sono indicati i vantaggi e gli svantaggi del sistema.

Tabella 1.29. Vantaggi e svantaggi dei frangisole a griglia.

Vantaggi	Svantaggi
Riduzione dei carichi termici in estate	Possibili problemi di abbagliamento in inverno (griglie orizzontali)
Sfruttamento dei guadagni solari in inverno	Ridotta disponibilità di luce naturale, specie in caso di cielo coperto (griglie verticali con fori piccoli)
Protezione dall'abbagliamento in estate e in inverno (griglie verticali)	Vista verso l'esterno limitata (griglie verticali con fori piccoli)
Illuminazione relativamente uniforme, di tipo diffuso	
Elevata disponibilità di luce naturale (griglie orizzontali e in presenza di cielo sereno)	
Aspetto estetico-architettonico	
Facile applicabilità anche in edifici esistenti	

25. TENDE (Curtains)



Le tende sono realizzate in differenti materiali, possono essere morbide o a pannelli rigidi, fanno in modo che si determini un oscuramento maggiore o minore in funzione della trama più o meno fitta. Generalmente sono molto funzionali anche integrate a sistemi di schermatura esterni, specie se orizzontali (aggetti), per schermare la radiazione solare diretta in inverno, periodo in cui questi sistemi risultano inefficienti a causa della posizione del Sole basso sull'orizzonte. Nelle Fig. 1.93 e 1.94 sono mostrati due diverse tipologie di impiego di tende.



Figura 1.93. Studio Archa, Genova



Figura 1.94. Il sole 24 ore, Milano

Riassumendo:

le tende sono una tipologia di schermatura **esterna**, **interna** e in **vetrocamera**, sono **mobili**, **continue** o **discontinue**, **diffondenti**, verticali. Vengono posizionate su finestre verticali, lucernari e coperture trasparenti. Qualsiasi orientamento è ideale per questo tipo di sistema schermante: **est**, **sud**, **ovest**. Risulta efficiente con tutte le altezze solari e condizioni di cielo sereno. In Tab. 1.30 sono indicati i vantaggi e gli svantaggi del sistema.

Tabella 1.30. Vantaggi e svantaggi delle tende.

Vantaggi	Svantaggi
Riduzione dei carichi termici in estate (tende esterne)	Scarsa riduzione dei carichi termici in estate (tende interne)
Sfruttamento dei guadagni solari in inverno (tende filtranti chiare)	Scarso sfruttamento dei guadagni solari in inverno (tende filtranti scure)
Protezione dall'abbagliamento in estate e in inverno (tende filtranti scure)	Possibili problemi di abbagliamento in estate e in inverno (tende filtranti chiare)
Integrazione della funzione schermante degli aggetti orizzontali per la protezione dall'abbagliamento in inverno	La parte dell'ambiente più lontana dalle finestre rimane buia
Illuminazione uniforme di tipo diffuso	Ridotta disponibilità di luce naturale (tende filtranti scure)
Elevata disponibilità di luce naturale (tende filtranti chiare)	Vista verso l'esterno limitata (con le tende chiuse)
Ingombro ridotto	Degrado del materiale e del colore nel tempo
Facilità e flessibilità d'impiego	Frequenti interventi di pulizia e manutenzione
Aspetto estetico-architettonico	Alterazione cromatica della luce naturale (tende filtranti colorate)
Facile applicabilità anche in edifici esistenti	
Economicità	
Gradimento da parte degli utenti che possono controllare il sistema direttamente	

FILM OLOGRAFICI

Sono materiali che possiedono un sistema ottico passivo (il reticolo olografico) in grado di modificare l'inclinazione dei raggi solari secondo una direzione prestabilita tramite un opportuno modello di interferenza scolpito otticamente sullo strato olografico. Questo strato (il reticolo HOE: Holographic Optical Element) è una pellicola fotografica composta da una serie di elementi olografici: si ha così una griglia inglobata in una lastra di vetro in modo da assicurare maggior rigidità meccanica e protezione dall'umidità e dagli agenti atmosferici. La radiazione luminosa diretta è concentrata, grazie a fenomeni di diffrazione e riflessione, su delle strisce opache del vetro situate nella faccia interna, realizzando così l'effetto di schermatura. Le strisce opache occupano un'area pari al 30%-50% dell'area vetrata. Il sistema è trasparente invece alla radiazione diffusa (soprattutto proveniente dalla zona dello zenit) che viene ridirezionata verso il soffitto e la parte più lontana dalle finestre, e permette di distribuire la luce naturale anche in ambienti privi di finestre attraverso l'uso di condotti di luce.

I reticoli olografici (indicati con HOE) costituiscono dei sistemi selettivi e possono essere costituiti da:

- **reticoli a selettività spettrale**, che modificano il comportamento della superficie trasparente nei confronti della radiazione solare incidente in funzione *della lunghezza d'onda* (riflettono la radiazione infrarossa ma trasmettono la gran parte della radiazione luminosa, con conseguenti elevati livelli di illuminazione naturale senza surriscaldamento);
- **reticoli a selettività angolare**, che modificano il comportamento della superficie trasparente nei confronti della radiazione solare incidente in funzione *dell'angolo di incidenza* (variano nel modo più conveniente l'entità dei guadagni solari a seconda dell'ora o della stagione, riducendo la trasmissione solare indesiderata in estate e mantenendo invece alta la trasmissione luminosa).

I film olografici sono adatti in applicazioni edili che si prefiggono lo scopo di aumentare il risparmio energetico e di migliorare il comfort visivo.

BIBLIOGRAFIA

Guida alla progettazione dell'illuminazione naturale. Associazione italiana di illuminazione AIDI, Gennaio 2003

Di Persio F., Caratterizzazione sperimentale dei materiali trasparenti innovativi orientata ad applicazioni in campo edile. Tesi di laurea in: Ingegneria dei materiali dell'Università "La Sapienza", Roma 1997

Camper G., Portier J., Wen S.J., Morel B., Bourrel M., Chabagno J.M.: "Electrochromism and elettrocromic windows". *Active and Passive Elec. Comp.*, 14 (1992) 225-31.

Agnihotry S.A., Saxena T.K., Deepa M., Verma A., Ahmad S.: "Smart electrochromic windows (SECWs) for energy management". *Ionics*, 10 (2004) 226-32

Daylight in buildings, ECBS Annex, 29 July 2000

Gugliermetti F., Bisegna F., Visual and Energy Management of Electrochromic Windows in Mediterranean Climate, *Int. J. Building and Environment*, Vol. 38/3, 2003

Gugliermetti F., Bisegna F., A Model Study of Light Control Systems operating with Electrochromic Windows, *Lighting, Research and Technology, LRT*, Vol. 37/1, pp. 3-20, 2005

Gugliermetti F., Bisegna F., Daylighting with external shading devices: design and simulation algorithms, *Int. J. Building and Environment*, Vol 41/2 pp 136-149, 2006

<http://www.portlandonline.com>

<http://www.inhabitat.com>

<http://www.solatube.com>

<http://www.iuav.it/Didattica1/pagine-web/facolt--di/Antonio-Ca/master-pro/daylight.pdf>

Ghisi E, Tinker JA., "Evaluating the potential for energy savings on lighting by integrating fibre optics in buildings". *Building and Environment*, 41 (2006) 1611-21.

<http://www.infinitymotion.com/parans2008>

Appendice al Capitolo I

Sistemi PSALI e HSL

Il sistema PSALI integra la luce del giorno con la luce artificiale, massimizzando l'uso della prima per ottimizzare l'efficienza della seconda. Il metodo di controllo dell'illuminazione installato in una stanza in accordo con il sistema PSALI, ha la capacità di illuminare parti della stanza separatamente: durante il giorno permette alla luce naturale di illuminare le zone vicino la finestra con l'illuminazione artificiale soprastante spenta, mentre viene illuminata artificialmente solo la parte più lontana dalla finestra, risparmiando così energia (Fig. 2.1).

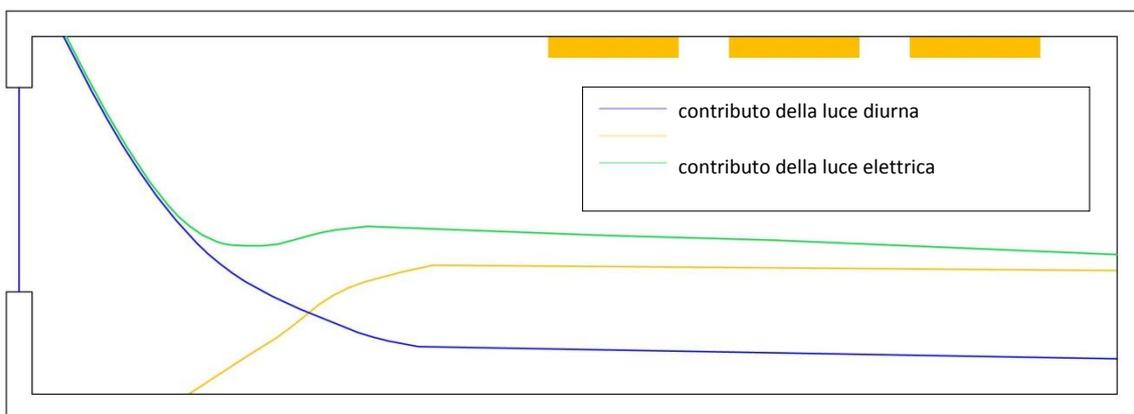


Figura 2.1. Schema PSALI.

Applicazione

Il sistema trova applicazione in tutti quegli edifici dove la natura visuale dell'attività richiede cura e considerazione nella sua progettazione (ad es. nelle scuole).

Stima della profondità della zona di luce diurna e della zona PSALI per spazi illuminati lateralmente

Lo sfruttamento della luce diurna negli edifici richiede dettagliate analisi sulla sua penetrazione in ambiente (Fig. 2.2). Per questo motivo, risulta necessario determinare i limiti superiore e inferiore di penetrazione di luce diurna durante l'anno. La penetrazione di luce diurna minore è presa come valore di profondità della zona di luce diurna, mentre la differenza tra la penetrazione di luce diurna maggiore e minore è considerata come valore di profondità della zona PSALI (la profondità

di queste zone viene sempre stabilita in relazione ai valori di illuminamento richiesti dalla normativa per ciascuna destinazione d'uso).

È molto difficile illuminare con la luce naturale in modo uniforme uno spazio illuminato lateralmente. Per questo, la conoscenza della profondità della zona di luce diurna e della zona PSALI è fondamentale per una corretta utilizzazione della luce diurna negli edifici.

I livelli di luce diurna fluttueranno durante l'anno tra la profondità della zona di luce diurna e la profondità massima della zona PSALI, e ciò implica che la luce naturale avrà bisogno di essere integrata dalla luce artificiale per mantenere un opportuno livello di illuminazione lungo tale zona. La zona PSALI richiede apparecchiature di illuminazione con controlli di tipo dimming sensibili ai livelli di luce diurna (rilevabili grazie a sensori esterni).

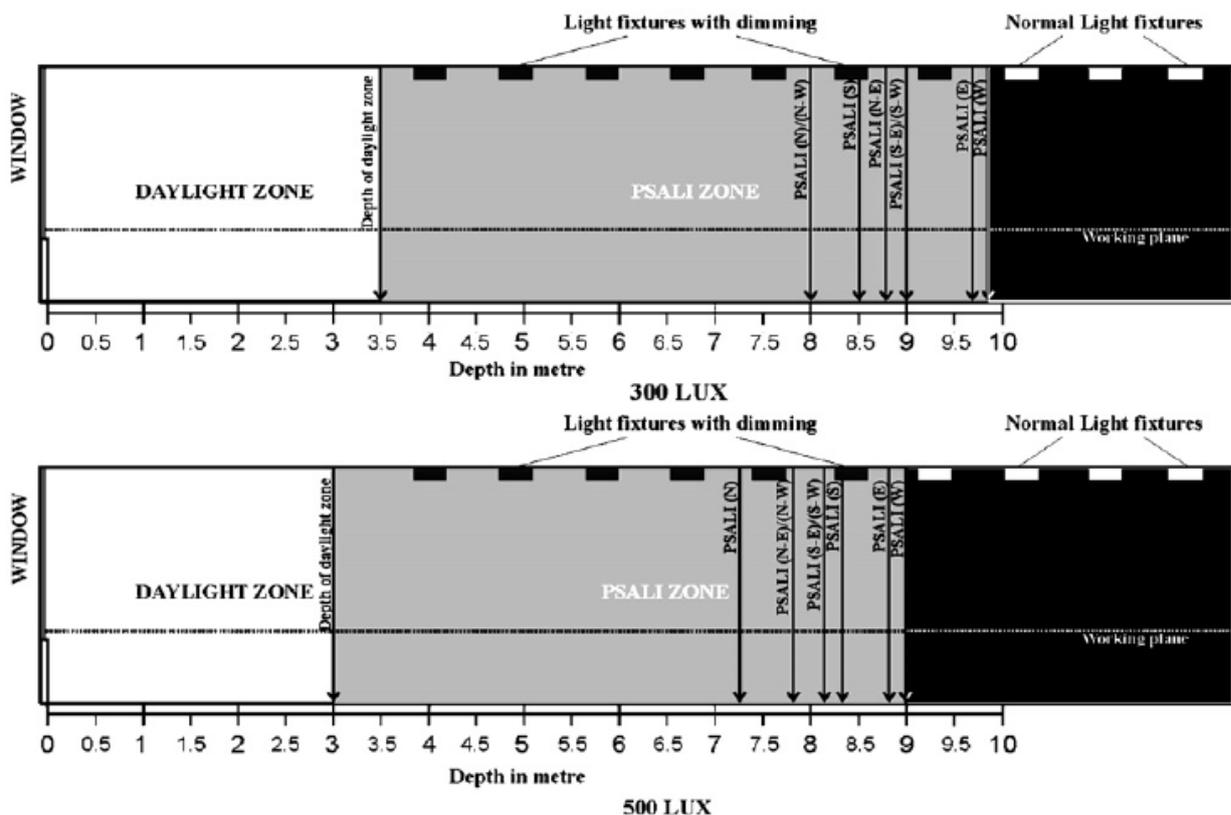


Figura 2.2. Sezione di un modello di ufficio tipo: sono individuate la profondità della zona di luce diurna (daylight zone) e della zona PSALI (PSALI zone) per un illuminamento sul piano di lavoro di 300 e 500 lux. Per ambienti particolarmente profondi, una parte del sistema è mantenuta in funzione in modo permanente (zona nera)

Principi base

Oltre a fornire un'adeguata illuminazione sul piano di lavoro, il sistema PSALI deve aumentare la luminosità apparente delle aree lontane dalla finestra fino a livelli che sono entro il range di comfort (cioè intorno al livello di adattamento prevalente nella stanza), anche nel caso in cui non

ci sia necessità di illuminazione aggiuntiva sul piano di lavoro. Il PSALI deve essere pertanto progettato non solo in termini di illuminazione sul piano di lavoro, ma anche di distribuzione della luce sulle pareti e più in generale in ambiente.

Affinché il livello della luce supplementare dia luogo ad un equilibrio soddisfacente di luminosità con le parti illuminate dalla luce del giorno, si deve tener conto sia della luminosità visibile del cielo, sia della distribuzione della luce diurna nella stanza. La dipendenza da questi due fattori è diretta: tanto maggiore è il livello di brillantezza del cielo, più alto è il livello di illuminazione supplementare necessario.

La superficie su cui deve essere fornita la luce supplementare sarà determinata dalla distribuzione della luce del giorno nella stanza, mentre la distribuzione dell'illuminazione supplementare deve variare gradualmente dalle zone più scure a quelle più chiare della stanza. Il risultato migliore è quello per cui si verifica un incremento graduale dell'illuminazione totale dal fondo della stanza fino alla finestra. Il livello di illuminazione supplementare dovrebbe sempre essere inferiore a quello proveniente dalla luce del giorno nei pressi della la finestra. Deve essere evitata ogni possibile depressione del livello di illuminazione nella zona centrale della stanza, per evitare che risulti evidente l'artificialità della situazione.

Il gradiente di illuminazione dalle finestre laterali alle zone con illuminazione supplementare per luce unilaterale dovrebbe essere tale che l'illuminazione sopra l'area di lavoro principale non debba variare più di 3:1, sebbene il massimo dell'illuminazione nelle aree molto vicine alla finestra può essere al di fuori di questo intervallo.

Progettazione delle finestre e abbagliamento nelle installazioni integrate

Le superfici trasparenti devono essere progettate tenendo presente che la penetrazione della luce diurna, con un sistema integrato, può passare in secondo piano per il rischio di abbagliamento dovuto alla volta celeste. La protezione dall'abbagliamento del cielo è ottenuta riducendo l'area visibile del cielo, la luminosità del cielo, e aumentando la luminosità media della stanza. Quando non basta l'illuminazione supplementare per aumentare la luminosità media della stanza, si possono aggiungere anche elementi schermanti come lamelle e tende.

La luminosità del cielo non è sotto il controllo del progettista, come avviene invece per l'abbagliamento provocato dal sistema artificiale supplementare, dal momento che l'Indice di Abbagliamento proveniente da una finestra può variare ampiamente da caso a caso. La soluzione migliore consiste nel progettare la superficie trasparente integrata con il supplemento artificiale, per dare un'illuminazione e una distribuzione di luminosità soddisfacenti lungo la stanza, fornendo ove necessario dispositivi antiabbagliamento fissi o regolabili secondo le necessità dell'ambiente, e altresì progettare questo sistema in riferimento alle condizioni medie di cielo (10000 lux).

Scelta delle sorgenti di luce artificiale

Una luce artificiale permanente supplementare deve essere uguale alla luce disponibile sia per colore che per luminosità, se deve essere discreta e non causare distrazione. I livelli di illuminazione supplementare sono in genere sufficientemente alti da richiedere per ragioni economiche l'uso di una sorgente di luce della più alta efficienza luminosa possibile, compatibilmente con una buona resa cromatica. L'illuminazione fluorescente di buona qualità è la sola fonte di luce disponibile ad oggi che incontra questi requisiti.

Le lampade fluorescenti sono prodotte in una varietà di qualità di colore, e poche sono adatte per essere combinate con la luce naturale. La luce diurna stessa varia nella qualità del colore, da un colore relativamente caldo della luce diretta solare ad una qualità molto più fredda del cielo blu sereno. La qualità dei colori per una fonte di luce artificiale che serve ad integrare la luce naturale deve essere specificata in due forme distinte: il colore della fonte di luce stessa, e l'aspetto della luce riflessa dalle superfici neutri bianche o grigie; la qualità della resa cromatica.

Queste due specifiche non sono identiche: due sorgenti di luce con composizioni spettrali completamente differenti, possono apparire soggettivamente dello stesso colore, e l'effetto della luce proveniente da una sorgente o da un'altra su superfici neutri bianche o grigie sarà lo stesso. D'altro lato, però, la resa di colori diversi da quelli neutri potrà differire, dal momento che ciò dipende dalle frequenze componenti delle due sorgenti.

Il grado di divergenza della resa del colore dato dal supplemento artificiale, comparato con la luce diurna, dipenderà dalle caratteristiche di riflessione spettrale delle superfici. Alcuni colori delle superfici possono essere distorti in minima parte, mentre altri possono essere distorti in maniera molto consistente (quest'ultimo fenomeno accade per i colori delle superfici le cui frequenze non sono presenti nella composizione spettrale della sorgente di luce artificiale usata).

Quindi, un'illuminazione supplementare soddisfacente è tale solo se le proprietà di resa di colore del supplemento sono strettamente paragonabili con quelle della luce naturale diurna presente in ambiente. Dal momento che la stessa luce naturale diurna non è costante, è necessario trovare un compromesso. Ad oggi, non esiste un tipo di lampada fluorescente adatta, ma alcune lampade vengono preferite a tutte le altre per questo scopo, e proprio queste dovrebbero essere usate nel progetto dello PSALI., fermo restando che nessun tipo di lampada purtroppo è completamente soddisfacente e una lampada ideale per integrare la luce diurna ancora non esiste.

Nel frattempo molto può essere fatto attraverso la cura con cui si progetta il sistema supplementare, evitando la vista delle lampade da parte degli utenti e l'uso di superfici colorate nelle vicinanze delle lampade, che attirano l'attenzione sulle deficienze di colore della sorgente luminosa artificiale.

Colore delle decorazioni interne con lo PSALI

Molto può essere fatto per evitare di attirare l'attenzione verso le differenti rese di colore date dalla luce naturale e dal supplemento artificiale, se si pone cura nella scelta dei colori di superficie dei muri, dei mobili, ecc. in ambiente. Alcuni suggerimenti possono essere utili:

- I colori usati sulle superfici che si estendono dall'area della luce diurna fino all'area che riceve per lo più l'illuminazione supplementare (soffitto, muri trasversali, pavimento) devono essere scelti tra quei colori che mostrano il minimo cambiamento nella resa data dalla luce naturale e dal supplemento scelto;
- Le aree di un colore distintivo preferibilmente non devono essere estese, ma confinate o nella parte della stanza illuminata principalmente dalla luce naturale, o nella parte della stanza illuminata principalmente dal supplemento artificiale;
- Superfici che ricevono la gran parte della loro illuminazione dalle sorgenti supplementari devono essere costituite da colori che non vengano distorti sfavorevolmente dal colore della sorgente di luce;
- Il colore del muro di fondo in una stanza illuminata da un solo lato è un caso complesso. Dal momento che il supplemento artificiale sarà posto vicino a questo muro, riceverà una larga componente di luce artificiale che lo raggiungerà con un'incidenza casuale, se il supplemento è posto sul soffitto. D'altronde, esso riceverà anche una componente notevole di luce diurna ad incidenza quasi normale. La raccomandazione è consigliare l'uso di un colore neutrale per il muro di fondo, ugualmente reso sia dalla luce artificiale che naturale.

La Tab. 2.1 mostra in modo sintetico i vantaggi e gli svantaggi associati all'impiego del sistema di illuminazione artificiale permanente supplementare al posto di un sistema di illuminazione artificiale tradizionale.

Tabella 2.1. Sistema di illuminazione artificiale permanente supplementare.

Vantaggi	Svantaggi
sfruttamento massimo della luce del giorno	differenza nella resa di colore della luce artificiale e della luce naturale: uso prevalente di colori neutrali per le superfici della stanza, poichè ugualmente resi sia dalla luce artificiale che dalla luce naturale, o di colori che mostrano il minimo cambiamento nella resa data dalla luce naturale e dal supplemento scelto
risparmi energetici sulla luce artificiale	uso di colori distintivi in aree circoscritte
uniforme distribuzione della luce nella stanza per tutto il giorno	ad oggi non esiste una lampada ideale per integrare la luce diurna: nessun tipo di lampada presente è completamente soddisfacente
mantenimento del carattere di luce diurna nella stanza	
più libertà nella progettazione: le proporzioni della stanza non sono più necessariamente legate ai requisiti di illuminazione naturale	
nella progettazione delle finestre, la penetrazione della luce diurna può passare in secondo piano per proteggere dall'abbagliamento proveniente dal cielo (ed evitare anche problemi di riscaldamento e/o raffreddamento dovuti a più grandi dimensioni delle finestre)	
il design della finestra può far direttamente riferimento a considerazioni di comfort visuale, necessità di vedere fuori, all'aspetto e relazione alla forma e alla struttura dell'edificio	

Scelta dei sistemi per l'illuminazione supplementare

Il sistema di illuminazione supplementare deve essere utilizzato anche dopo che la luce del giorno è scomparsa, come parte del normale sistema di illuminazione artificiale. Il supplemento permanente non deve attirare l'attenzione su di sé durante il giorno, altrimenti fallisce l'obiettivo di dare l'impressione di essere parte del sistema di luce diurna. D'altra parte, se le sorgenti di luce sono nascoste in modo conveniente, la luce del giorno può rimanere la caratteristica di luce dominante della stanza e può determinare il carattere dell'ambiente. La tendenza nel progetto dell'illuminazione supplementare va verso un sistema che consiste in un'illuminazione supplementare distribuita uniformemente lungo tutto il soffitto, solo unità selezionate vengono usate durante il giorno per agire come supplemento permanente. Dopo che la luce del giorno è svanita, l'intera installazione diventa operativa. Se la stanza raggiunge profondità rilevanti, una parte del sistema è mantenuta in funzione in modo permanente. Ogni sistema che incorpora dispositivi di selezione (switching) per cambiare l'illuminazione al crepuscolo, avrà interruttori controllati dal sistema di gestione dell'edificio e non dagli utenti stessi.

Capitolo II

Tecniche di modellazione avanzate e tradizionali per l'analisi dell'ambiente visivo in presenza di sistemi tradizionali e innovativi

I metodi generalmente impiegati per il calcolo della luce naturale sono tre:

- metodi di calcolo manuali
- modelli in scala, con impiego in cielo reale ovvero artificiale
- software di calcolo computerizzato.

Ciascuno dei tre metodi deve essere valutato sulla base di tre aspetti chiave che permettono di definirne potenzialità e limiti:

- praticità d'uso
- affidabilità nella simulazione delle sorgenti luminose
- interazione luce-ambiente

Come considerazione generale, prima di passare ad un'analisi più dettagliata dei differenti metodi, va detto che in generali tutti i metodi possono essere impiegati nelle diverse fasi progettuali con finalità ed impegno differenti. Ad esclusione poi dei metodi manuali, gli altri due metodi, caratterizzati da potenzialità e limiti completamente differenti, vengono spesso combinati ed associati per uno studio quali-quantitativo dell'ambiente luminoso più completo ed approfondito.

Metodi di calcolo manuali

I metodi di calcolo manuali (di tipo analitico o grafico) sono generalmente caratterizzati da molti limiti, in quanto applicabili esclusivamente a un numero limitato di situazioni molto semplici. Il loro campo d'applicazione è pertanto fortemente limitato, ed i risultati sono molto approssimativi e possono essere considerati solamente in una fase progettuale preliminare. I vantaggi associati a questo metodo sono: la semplicità di utilizzo, i pochi parametri richiesti e l'economicità. La Tab. 3.1 riporta in modo sintetico i vantaggi e gli svantaggi del questo metodo di calcolo.

Tabella 3.1. Metodi di calcolo manuali

Vantaggi	Svantaggi
Semplicità di utilizzo	Campo d'applicazione fortemente limitato (geometrie semplici e tecnologie tradizionali)
Pochi parametri richiesti	Risultati approssimativi
Economicità	

I modelli in scala

I modelli in scala consentono di prevedere le condizioni di illuminazione naturale in spazi confinati, analizzando così il progetto direttamente, attraverso misure dei valori delle grandezze fotometriche, sotto un cielo reale o all'interno di un cielo artificiale, e dando quindi al progettista la possibilità di controllare in tempi rapidi la validità delle soluzioni progettuali definite. L'aspetto fondamentale di questa operazione sta nel riprodurre accuratamente la geometria, i materiali, e le proprietà fotometriche delle superfici che caratterizzano il modello per ottenere dei risultati il più possibile attendibili.

L'efficacia dei modelli in scala rispetto agli altri due metodi di calcolo risulta evidente nel caso di geometrie particolarmente complesse, e inoltre risulta comunque utile come metodo di verifica al calcolo manuale e/o ai programmi di calcolo computerizzato.

Un aspetto fondamentale nella realizzazione del modello in scala è lo studio dell'ambiente luminoso naturale, infatti si può posizionare il modello sotto un cielo reale o sotto un cielo artificiale.

Nelle simulazioni fatte sotto un cielo reale, si ha la sicurezza di sperimentare e verificare gli spazi confinati nelle effettive condizioni di luce naturale, per cui è possibile ottenere risultati immediati, e una valutazione qualitativa dell'ambiente luminoso; l'approccio che ne risulta è estremamente semplice ed economico, anche se esistono limiti dovuti all'imprevedibilità e alla variabilità dell'intensità della luce esterna, per cui si può verificare nel tempo la variazione dei livelli di illuminamento e di luminanza misurati anche in condizioni meteorologiche apparentemente identiche. La scelta di sperimentare il modello sotto un cielo reale può quindi risultare vantaggiosa più in termini di visualizzazione qualitativa dell'ambiente, che dal punto di vista quantitativo; questa considerazione risulta vera in particolare nelle prime fasi progettuali, quando risulta utile ottenere facilmente e rapidamente informazioni sul modo in cui possono apparire gli ambienti interni.

Da un punto di vista quantitativo può essere più efficace ricorrere all'utilizzo dei modelli sotto un cielo artificiale, che opportunamente integrato con un sole artificiale (*heliodon*) permette di poter scegliere la distribuzione delle luminanze e il percorso apparente del sole desiderati, e di mantenere questi valori costanti nel tempo: diventa in questo modo possibile valutare le prestazioni fornite da diversi sistemi di illuminazione naturale, confrontando in tempi brevi soluzioni progettuali anche molto diverse. Tale scelta diventa quindi vantaggiosa sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo.

La Tab. 3.2 mostra in modo sintetico i vantaggi e gli svantaggi associati all'impiego di modelli in scala per la valutazione dell'ambiente luminoso.

Tabella 3.2. Modelli in scala.

Vantaggi	Svantaggi
non sono necessari fattori di scala	complessità e tempi lunghi per la realizzazione di modelli precisi e accurati
molto usati in campo progettuale	difficoltà (e costi) nel predisporre un apparato di strumenti di misura in modelli di ridotte dimensioni
accuratezza nei risultati	difficoltà di disporre di elementi e materiali nella giusta scala e con le reali proprietà fotometriche
particolarmente vantaggiosi nel caso di geometrie complesse	
riproduzione fedele di situazioni reali	
possibilità di analisi su scale diverse (urbana, indoor)	
risultati qualitativi e quantitativi confrontabili con quelli osservabili in ambiente reale	
possibilità di effettuare valutazioni qualitative attraverso la visione diretta all'interno del modello o per mezzo di riprese fotografiche	
possibilità di compiere valutazioni soggettive di comfort visivo	
validi strumenti di verifica dei metodi di calcolo manuali e computerizzati	
In più, per cielo reale:	In più, per cielo reale:
corrispondenza con le situazioni reali	impossibilità di riferirsi a condizioni standard e quindi di confrontare soluzioni progettuali diverse
rapida ed economica valutazione delle prestazioni luminose di un edificio esistente	
In più, per cielo artificiale:	In più, per cielo artificiale:
possibilità di simulare il comportamento dinamico della luce naturale	possibili errori di scala
possibilità di riprodurre numerose condizioni di cielo (sereni, coperti, intermedi)	
possibilità di riferirsi a condizioni standard e confrontare soluzioni progettuali diverse	

Generalmente, i laboratori dotati di un cielo artificiale sono attrezzati con entrambi i seguenti sistemi di simulazione:

- **sole artificiale (heliodon):** struttura che movimentata il modello in scala per simulare il percorso apparente del sole, consentendo la simulazione della componente diretta della luce solare
- **simulatore di cielo (cielo artificiale):** struttura che riproduce la distribuzione di luminanza tipica della volta celeste, consentendo la simulazione della componente diffusa della luce solare.

Tali sistemi non vengono mai usati contemporaneamente, in quanto sono diversi gli ordini di grandezza con cui essi lavorano. È necessario comunque distinguere le tipologie di cielo artificiale, che variano a seconda delle diverse funzioni che svolgono:

- **cielo a specchi:** è stato uno dei primi a diffondersi con lo scopo di compiere misure quantitative del fattore di luce diurna; per questo motivo, tali cieli sono privi del sole artificiale. I cieli a specchio sono ambienti parallelepipedi con pareti verticali rivestite di specchi, mentre il soffitto è costituito da una superficie diffondente opalina, in modo da determinare una successione infinita di riflessioni di tali superfici. La volta celeste è riprodotta attraverso una serie di sorgenti artificiali (fluorescenti lineari, regolabili in intensità luminosa) collocate esternamente rispetto al soffitto (Fig. 3.1). La distribuzione di luminanza che ne deriva è tale da simulare in maniera fedele le condizioni di cielo coperto standard CIE.

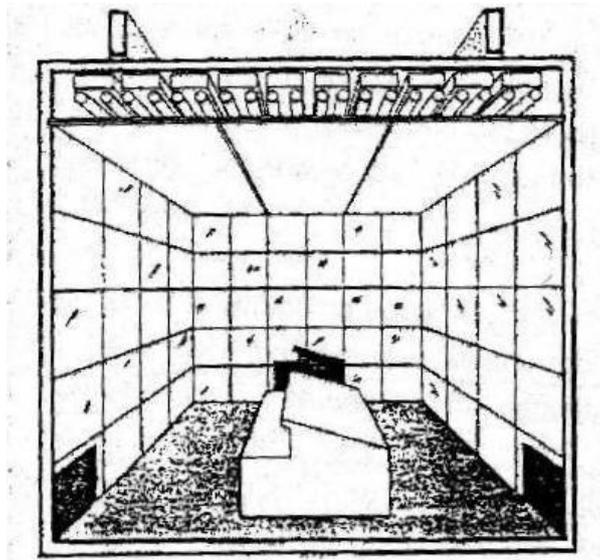


Figura 3.1. Esempio di cielo artificiale a specchi.

In Tab. 3.3 sono riportati i vantaggi e gli svantaggi associati all'impiego di un cielo artificiale a specchi.

Tabella 3.3. Caratterizzazione del cielo a specchi.

Vantaggi	Svantaggi
semplicità di costruzione	distribuzioni di luminanza riproducibili limitate al cielo coperto CIE
costo contenuto	no sole artificiale
errore minimo nella riproduzione dell'orizzonte	inter-riflessioni perturbate dalla presenza del modello

- **cieli a volta:** l'obiettivo è quello di poter dare valutazioni quantitative del fattore di luce diurna e valutazioni qualitative per lo studio di ombre, distribuzioni di luminanze e studio delle condizioni di abbagliamento. In questi cieli, la volta celeste è modellata attraverso superfici semisferiche illuminate per mezzo di sorgenti artificiali caratterizzate da un'intensità regolabile e dalla possibilità di essere regolate individualmente o in gruppi per realizzare differenti distribuzioni di luminanza. Il modello viene collocato al centro della semisfera. Le sorgenti artificiali possono essere collocate:
 - Sul piano orizzontale, ad altezza inferiore rispetto al piano del modello: in questo caso si realizza una illuminazione indiretta, in quanto la luce naturale raggiunge il modello dopo essere stata riflessa dalla volta, costituita da una superficie opaca riflettente in maniera diffusa (Fig. 3.2)

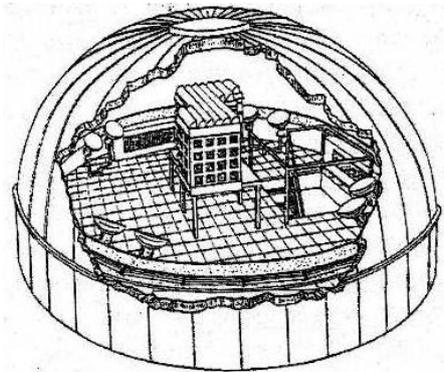


Figura 3.2. Cielo a volta con illuminazione indiretta.

- Esternamente alla superficie della volta, realizzata con materiale trasparente diffondente (Fig. 3.3);

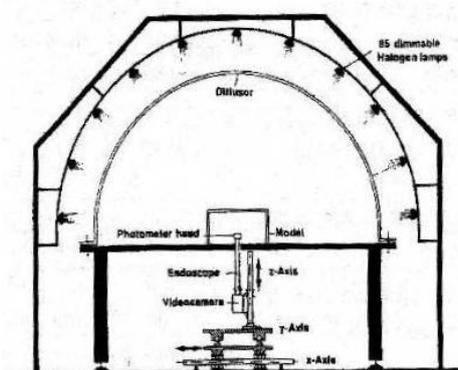


Figura 3.3. Cielo a volta con illuminazione dietro la volta.

- Sulla superficie semisferica della volta, per cui l'illuminazione che ne deriva è di tipo diretto; perché la luce che raggiunge il modello abbia caratteristiche simili alla luce

naturale, le sorgenti devono essere previste in numero elevato e avere un'emissione a fascio largo.

In questi cieli è possibile prevedere l'installazione di un sole artificiale, libero di scorrere lungo un binario realizzato sulla superficie interna della volta: grazie a questo scorrimento, si può riprodurre la variazione dell'altezza solare, mentre il piano di supporto del modello, ruotando intorno al suo asse verticale, fornisce la variazione dell'angolo azimutale.

Questo tipo di cielo presenta un alto grado di complessità perché oltre ai costi elevati, possono esserci possibili errori di orizzonte, l'esigenza di una calibrazione lunga e difficoltosa e la necessità di inserire dei sistemi di ventilazione/condizionamento per disperdere il calore emesso dalle sorgenti. In Tab. 3.4 sono riportati i vantaggi e gli svantaggi associati all'impiego di un cielo artificiale a volta.

Tabella 3.4. Caratterizzazione del cielo a volta.

Vantaggi	Svantaggi
possibilità di riprodurre diverse condizioni di cieli standard	elevato grado di complessità
semplicità di accesso al modello	costo elevato
	possibili errori di orizzonte
	calibrazione lunga e difficoltosa
	elevata potenza richiesta
	manutenzione onerosa
	riflessioni parassite
	necessità di sistemi di ventilazione/condizionamento per disperdere il calore emesso dalle sorgenti

- cieli a porzione di volta:** la volta celeste è creata sulla base del modello di Tregenza, per cui essa viene discretizzata per mezzo di figure geometriche (145 aree circolari) a luminanza uniforme (Fig. 3.4). In particolare, viene riprodotto un solo spicchio della volta celeste (1/6), costituito da 25 dischi luminosi dotati di sorgenti artificiali modulabili in intensità e controllabili individualmente per realizzare le aree a luminanza uniforme. Anche in questi cieli è possibile prevedere l'installazione di un sole artificiale.

In Tab. 3.5 sono riportati i vantaggi e gli svantaggi associati all'impiego di un cielo artificiale a porzione di volta.

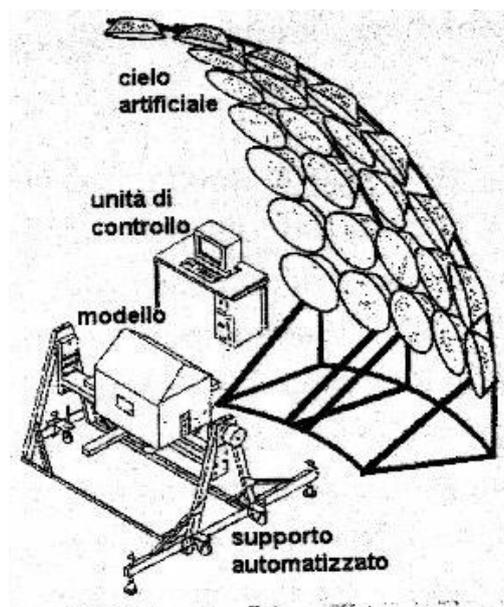


Figura 3.4. Cielo a porzione di volta.

Tabella 3.5. Caratterizzazione del cielo a porzione di volta.

Vantaggi	Svantaggi
riproduzione di distribuzioni di luminanza ricavate da misure sperimentali	possibili errori di orizzonte
possibilità di riprodurre diversi tipi di cieli	costo elevato
dimensioni contenute	calibrazione complessa
semplicità di accesso al modello	potenza richiesta
	manutenzione onerosa
	calibrazione lunga e complessa
	non corrispondenza tra illuminamenti reali e simulati nel caso di cieli sereni

Software di calcolo computerizzato

Ad oggi la maggior parte delle immagini preparate dai progettisti per anticipare la realtà è ottenuta adoperando i programmi commerciali di rendering "fotorealistico". Quest'ultimo termine non implica necessariamente che vi sia un collegamento con la fisica della luce: qualsiasi algoritmo di calcolo va bene a patto che le immagini finali raggiungano un certo livello di verosimiglianza.

Nella fattispecie la maggioranza dei softwares usati in ambito architettonico si basano su algoritmi di resa, che tengono conto soltanto dell'illuminazione diretta, trascurando le inter-riflessioni tra le superfici, e che rappresentano con caratteristiche impossibili le sorgenti luminose. Si può parlare invece di simulazione in ambito illuminotecnico solo se si usano algoritmi che riproducono la fisica del fenomeno luminoso: soltanto in questo caso le immagini finali ed i valori numerici ottenuti potranno essere utili per capire i risvolti delle scelte progettuali operate.

Gli algoritmi di calcolo operano delle approssimazioni che tengono conto soltanto di poche delle variabili che convivono effettivamente in ogni ambiente illuminato. Tali procedure si dedicano a

simulare la riflessione della luce sugli oggetti, scopo raggiunto attraverso l'uso di algoritmi di primo ordine (nei quali si considera soltanto l'illuminazione diretta e la prima riflessione sulle superfici della luce proveniente dalle fonti luminose – modelli di illuminazione locale) o modelli che tengono conto delle riflessioni multiple che intercorrono tra le superfici (in grado di rendere anche effetti secondari non meno importanti per la percezione dell'ambiente – modelli di illuminazione globale); soltanto in questo caso ci sono i presupposti per simulare le reali condizioni o i potenziali effetti di un progetto.

L'illuminazione finale di un ambiente è determinata dall'interazione tra le superfici ed i fotoni emessi dalle sorgenti luminose; ma in ogni punto di una superficie i fotoni possono essere arrivati direttamente dalla sorgente luminosa (illuminazione diretta) o indirettamente attraverso uno o più "rimbalzi" sulle altre superfici (illuminazione indiretta): gli algoritmi di riflessione locale non sono in grado di rendere l'illuminazione indiretta e le riflessioni del secondo ordine, e solitamente cercano di far fronte a questa deficienza tramite l'uso della cosiddetta "luce ambiente", ovvero di un valore di illuminamento costante e definibile dall'utente che viene sommato su ogni superficie. Per questo motivo le immagini create da tali "motori di rendering" sono basate esclusivamente sull'illusione: la rappresentazione della luce, seppure soltanto quella diretta, è quasi sempre empirica.

I modelli di illuminazione globale sono capaci di rendere fenomeni come le riflessioni multiple e gli effetti di secondo ordine. Alcune superfici sono brillanti o patinate, e possiamo vedere in esse le riflessioni di altri oggetti e di altre superfici; altre bloccano la luce e proiettano ombre; altre ancora sono trasparenti e permettono all'osservatore di guardarvi attraverso: tutte queste possibilità, che poi sono reali condizioni che è normale sperimentare anche in ambienti aventi caratteristiche geometriche e materiche elementari, sono prese in considerazione e trattate all'interno di un modello di illuminazione globale, il quale molto spesso è implementato in modo da aderire a leggi fisiche e in alcuni casi riesce a gestire anche simulazione e controllo numerico.

I modelli di illuminazione globale possono essere implementati secondo due metodologie (o algoritmi di calcolo): quella di ray tracing e quella di radiosity.

- **Ray tracing**, che eccelle nella simulazione dei fenomeni di riflessione speculare, ed è in grado di fornire sia rendering di buon livello, sia valori numerici, ma in relazione a singole direzioni di osservazione (Fig 3.5);

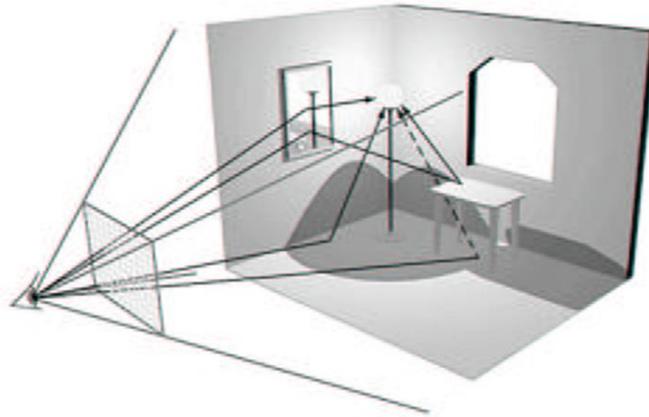


Figura 3.5. Schematizzazione della modellazione luminosa con ray-tracing.

Il ray tracing è una tecnica di calcolo globale che incorpora all'interno dello stesso schema computazionale aspetti di interazione tra luce e oggetti solitamente trattati, nei casi di modelli di riflessione locale, da differenti algoritmi studiati ad hoc. La maniera più efficace per implementare il ray tracing ricorsivo consiste nel tracciare il percorso dei raggi luminosi riflessi specularmente, trasmessi e rifratti all'interno di un ambiente. Si traccia un raggio da un punto di vista attraverso ogni pixel dello schermo in direzione della scena che si vuole rappresentare. Si tratta in particolare del backward ray tracing, in cui si considerano soltanto i fotoni che arrivano all'occhio dell'osservatore, piuttosto che tutti i fotoni che vagano nella scena da rappresentare. Una serie di raggi è tracciata a ritroso dalla posizione dell'occhio dell'osservatore attraverso il pixel del monitor, fino a quando non interseca una superficie descritta nel modello dell'ambiente considerato. Un raggio d'ombra è quindi arbitrariamente mandato verso le sorgenti luminose da questo punto di intersezione (nel complesso quindi i raggi vengono tracciati dal punto di vista fino alla sorgente). Le riflessioni multiple e la trasparenza sono considerati all'interno dello stesso algoritmo, tracciando sempre raggi a ritroso.

- Radiosity, che eccelle nella simulazione di fenomeni di inter-riflessione diffusa; permette di ottenere dati quantitativi precisi e una rappresentazione grafica media dell'ambiente complessivo, calcolando i livelli medi di energia luminosa presenti sulle diverse superfici (Fig. 3.6).

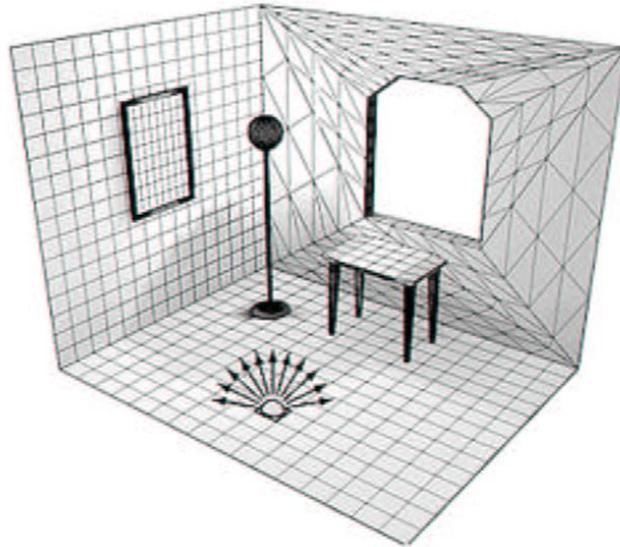


Figura 3.6. Schematizzazione della modellazione luminosa con radiosity.

Il metodo di calcolo usato dagli algoritmi di radiosity calcola le caratteristiche di illuminazione di punti discreti dell'ambiente, dopo aver suddiviso ogni superficie in una sottosuperficie (*mesh*) che accorpa poligoni più piccoli chiamati elementi (con proprietà fotometriche omogenee; ad es. il coefficiente di riflessione). Gli algoritmi di *radiosity* richiedono che tutte le superfici siano diffusori ideali che seguono la legge di Lambert, cioè che riflettano la luce ugualmente in ogni direzione. Quindi in questo modo non è possibile rendere la riflessione speculare (caratterizzata da una preponderante direzionalità). Ogni elemento riceve l'energia luminosa e ne restituisce un'aliquota all'ambiente sino a quando tutta l'energia riflessa non è stata totalmente assorbita. Calcolata la distribuzione luminosa nella scena, la si può esaminare in tempo reale: infatti la soluzione calcolata con l'algoritmo di radiosity è indipendente dal punto di osservazione.

La Tab. 3.6 mostra in modo sintetico i vantaggi e gli svantaggi associati all'uso di algoritmi di ray tracing nei software per la valutazione dell'ambiente luminoso.

Tabella 3.6. Algoritmi di ray tracing

Vantaggi	Svantaggi
calcolo dell'illuminazione diretta e delle ombre	necessità di effettuare il calcolo in funzione di un punto di vista
calcolo della riflessione speculare e della rifrazione attraverso materiali trasparenti	calcolo complesso e dispendioso in termini di tempo (soprattutto in funzione del numero di sorgenti luminose presenti)
corrispondenza con le dinamiche reali di propagazione e distribuzione della luce (migliore di quella intrinseca a qualunque algoritmo, incluso il radiosity)	
simulazione di textures non omogenee e punti di superficie	

La Tab. 3.7 mostra in modo sintetico i vantaggi e gli svantaggi associati all'uso di algoritmi di radiosity nei software per la valutazione dell'ambiente luminoso.

Tabella 3.7. Algoritmi di radiosity

Vantaggi	Svantaggi
calcolo accurato delle inter-riflessioni tra diffusori ideali	le riflessioni speculari non possono essere rese e quindi specchi ed altre superfici parzialmente speculari non possono essere rappresentati, così come fenomeni di rifrazione e trasparenza
indipendenza dal punto di osservazione, in modo da consentire la resa immediata di viste arbitrarie e di animazioni	la suddivisione in mesh ed elementi richiede l'allocazione di molta memoria rispetto a quella delle superfici di partenza
l'uso di sorgenti superficiali è parte integrante del modello di calcolo	gli algoritmi di suddivisione delle superfici spesso conducono ad un numero maggiore di artefatti nelle immagini finali rispetto a quanto non si possa avere con l'uso di <i>ray tracing</i>
possono essere visualizzati effetti come penombra e sfumature dettagliate all'interno delle ombre	
si possono osservare immediatamente dei risultati con un successivo miglioramento nell'accuratezza dell'immagine	

Se un modello di illuminazione globale è rafforzato da un motore di calcolo basato sulle leggi della fisica, esso è in grado di produrre immagini e dati numerici significativi che possono essere analizzati per valutare il progetto sotto i profili prestazionali legati alla luce.

Il principio di funzionamento dei programmi di calcolo computerizzato si basa fondamentalmente sulla conoscenza della distribuzione di luminanza della volta celeste, a partire dalla quale è possibile la valutazione di illuminamenti e luminanze all'interno degli ambienti.

Alcuni programmi si basano sul processo integrato di entrambi gli algoritmi precedentemente illustrati: ray-tracing sovrapposto ad un precedente calcolo di radiosity, per ottenere una totale completezza nei calcoli. In generale, si può comunque affermare che il grado di precisione è inversamente proporzionale ai tempi di calcolo.

Indipendentemente dagli algoritmi impiegati, nelle valutazioni di luce naturale si verificano errori a tutt'oggi rilevanti, a causa delle ipotesi ed approssimazioni su cui si basa la simulazione illuminotecnica. I risultati che si ottengono possono essere molto lontani rispetto alle situazioni effettive, i dati di illuminamento calcolati presentano delle discrepanze consistenti rispetto ai valori misurati sul campo. Inoltre, per alcuni materiali opachi la riflessione viene assunta dal software come perfettamente diffondente, mentre nella maggior parte dei casi essa è semidiffondente; le soluzioni tecnologiche recenti, poi, come i light shelf, i camini di luce, i materiali trasparenti innovativi, etc., non possono essere simulati perché ad oggi realtà troppo complesse. La maggior parte dei software, poi, assume l'ipotesi di comportamento perfettamente diffuso per le superfici dell'ambiente, per cui non risulta possibile modellare superfici speculari e/o semispeculari.

Il principale vantaggio relativo all'uso dei computer è la loro vasta capacità di calcolo, per cui si possono simulare le condizioni di illuminazione naturale a geometrie molto complesse; una volta realizzato il modello su cui effettuare le simulazioni, inoltre, si possono cambiare i singoli parametri e confrontare soluzioni progettuali differenti, con evidenti vantaggi pratici per il progettista. Attraverso i software di calcolo illuminotecnico, si ottengono due tipi di risultati:

- uno qualitativo, fotorealistico, attraverso il rendering, che consente una visualizzazione realistica dell'oggetto;
- uno quantitativo, fotometrico, attraverso i calcoli che consentono la determinazione delle grandezze fotometriche (fondamentalmente luminanze ed illuminamento).

I programmi di calcolo specificamente orientati allo studio della luce naturale sono ancora pochi; la maggior parte dei software nascono infatti per lo studio della luce artificiale, più semplice da calcolare, vengono poi ampliati con moduli che consentono delle valutazioni di luce naturale, e per questo pochi sono in grado di tener conto degli effetti e dell'influenza della dinamica della luce naturale.

Nonostante tutti questi problemi, comunque, i software per il calcolo illuminotecnico della luce naturale forniscono uno strumento utile e semplificativo in sede progettuale, in quanto consente al progettista di verificare la validità delle soluzioni elaborate per la realizzazione dell'ambiente luminoso, e di apportare per tempo, prima che l'edificio venga costruito, eventuali correzioni rispetto al progetto iniziale. La Tab. 3.8 mostra in modo sintetico i vantaggi e gli svantaggi associati all'impiego di software per la valutazione dell'ambiente luminoso.

Esistono attualmente sul mercato diversi programmi di calcolo disponibili per la valutazione della luce naturale, sia in versione freeware, sia di tipo commerciale. Un software illuminotecnico per la luce naturale ideale si dovrebbe valutare in base alla precisione dei dati fotometrici che caratterizzano il modello (materiali, colori, fattori di riflessione, condizioni del cielo), alla qualità dei modelli fotorealistici che presentano (minimizzazione del mottling, delle perdite di luce, etc.). A fronte degli evidenti vantaggi introdotti dal loro utilizzo, risulta opportuno evidenziare gli errori che si possono riscontrare con questi software, che evidentemente variano da programma a programma, ma che possono essere caratterizzati come:

- **perdite di luce**, cioè presenza di luce in parti dell'ambiente o su superfici dove non dovrebbe essere presente; tale errore è dovuto a discontinuità nella riproduzione di superfici, soprattutto in corrispondenza di giunzioni o sovrapposizioni fra superfici;
- **parti non illuminate**, cioè zone dell'ambiente che rimangono buie, perché non incluse nel procedimento di distribuzione del flusso luminoso;
- **definizione delle ombre**, in questo caso gli errori possono riguardare l'intersezione tra le superfici o la discontinuità fra le diverse parti dell'ombra portata da uno stesso oggetto o

fra l'ombra e l'oggetto/superficie che l'ha generata; entrambe le tipologie di errore sono legate all'impiego di mesh poco fitte e dettagliate nel processo di radiosity;

- **mottling**, cioè discontinuità nella visualizzazione dell'ambiente luminoso, dovuto alla non continuità nella simulazione della volta celeste come sorgente luminosa;
- **saturazione**, cioè perdita della differenza relativa di luminosità attribuita alle diverse parti dell'ambiente in presenza di elevati livelli di illuminamento;
- **rappresentazione dei colori**, cioè errori introdotti nella coerenza tra il colore impostato dall'utente, quello visualizzato nel rendering, e il corrispondente valore di luminanza attribuito nel calcolo delle superfici.

Tabella 3.8. Metodi di calcolo computazionali

Vantaggi	Svantaggi
valutazioni approssimate in breve tempo	difficile conversione di dati numerici in immagini
gestione di calcoli e modelli complessi con PC (basse potenze di calcolo e costi)	complessità di utilizzo
simulazioni di luce naturale e artificiale	risultati diversi in funzione degli algoritmi usati
valutazione di un elevato numero di parametri	errori sensibili rispetto a valori sperimentali
differenti livelli di precisione ed approfondimento	ipotesi semplificative nei modelli matematici (comportamento lambertiano)
no problemi di scala	lunghi tempi di implementazione
facilità di confronto tra soluzioni progettuali diverse	difficile modellazione di materiali innovativi e schermi
	difficile modellazione dei cieli reali
	condizioni di cielo simulabili limitate
	lunghi tempi di apprendimento: specialisti
	costi elevati
	difficile conversione di dati numerici in immagini
	complessità di utilizzo
	risultati diversi in funzione degli algoritmi usati

Di seguito, si propone un elenco, non esaustivo, di alcuni di questi software. Tra questi Radiance è quello più accreditato presso la comunità scientifica internazionale.

Radiance

Software disponibile gratuitamente, molto utilizzato, ha la possibilità di essere integrato ad altri software o di essere utilizzato indipendentemente.

Radiance è progettato per essere uno strumento di ricerca in grado di fornire calcoli accurati e previsioni affidabili degli effetti della luce e usa principalmente tecniche di Monte Carlo backward ray tracing.

Piuttosto che fornire semplicemente un motore di rendering fotorealistico, Radiance incorpora una serie di strumenti in grado di ottenere risultati numerici, in modo da mettere in grado il ricercatore o il progettista di misurare, simulare e progettare reali configurazioni di illuminazione(Fig. 3.7).

Il risultato finale da un punto di vista fotometrico è accettabile e soprattutto affidabile, ed è stato oggetto di estese campagne di validazione in modo da assicurare che i valori di luminanza ed i livelli di illuminamento calcolati dal programma siano accurati in relazione all'ambiente reale per condizioni di illuminazione sia naturale che artificiale. Radiance è basato su di un algoritmo di backward ray tracing, in base al quale i raggi luminosi sono tracciati nella direzione opposta rispetto a quella che seguono solitamente: a partire dall'occhio dell'osservatore (il punto di vista) i raggi vengono tracciati sino alle sorgenti luminose rimbalzando tra le superfici presenti nell'ambiente e tenendo conto dei fenomeni di riflessione, trasmissione e rifrazione. In maniera del tutto innovativa, Radiance opera anche il calcolo delle inter-riflessioni tramite ray tracing stocastico.

La grande versatilità e precisione di Radiance è però in contrasto con un notevole livello di complessità d'uso.

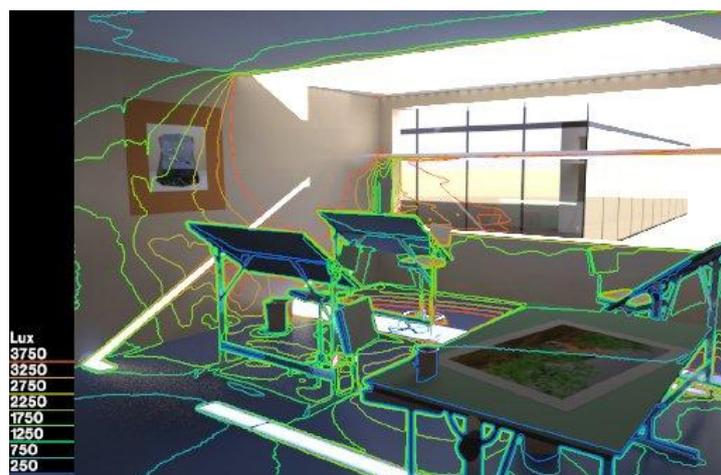


Figura 3.7. Esempio di simulazione e rendering ottenibili con Radiance.

Adeline

Software a pagamento, utilizza una versione di windows per Radiance.

Lightscape

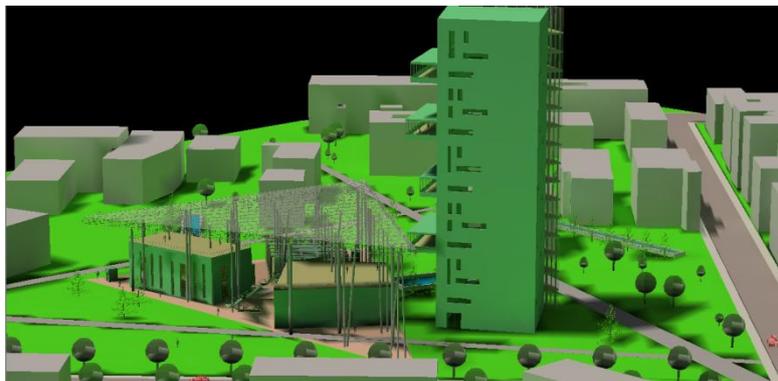
Software disponibile a pagamento, dedicato esclusivamente al calcolo illuminotecnico. Esegue la valutazione puntuale della componente diretta e riflessa della luce sia naturale che artificiale su qualsiasi superficie reale o immaginaria; dà inoltre la possibilità di inserire modelli architettonici con forme differenti.

Lightscape è uno strumento di ultima generazione di visualizzazione e illuminazione che produce ambienti e immagini realistici generati dal computer attraverso una precisa simulazione della luce e del comportamento dei materiali. E' la prima applicazione ad integrare le tecniche di radiosity e ray tracing con un'illuminazione basata sulle leggi della fisica.

I progettisti usano lightscape per simulare progetti sotto specifiche condizioni di materiali e di illuminazione.

E' un sofisticato prodotto commerciale che mira al fotorealismo con una esplicita attitudine per l'architettura: la tecnica adottata fa seguire al calcolo radiosity quello in ray tracing: il calcolo del primo reso accettabile da una tecnica di raffinamento progressivo, quello del secondo alleggerito dal calcolo delle ombre portate (Fig. 3.8).

Una volta preparato il modello con l'assegnazione dei materiali specifici e delle luci, il software inizia a calcolare l'illuminazione diffusa diretta ed indiretta del modello usando il processo di **radiosity**. In seguito si possono estrarre i risultati (definiti con questa prima soluzione di radiosity) renderizzandoli solo col radiosity (e quindi tenendo conto solo della luce diffusa) oppure facendo seguire a questo il processo di ray tracing (aggiungendo così le riflessioni speculari, ombre più rifinite e effetti di luce migliorati). Per i risultati quantitativi viene considerato solo il processo di radiosity.



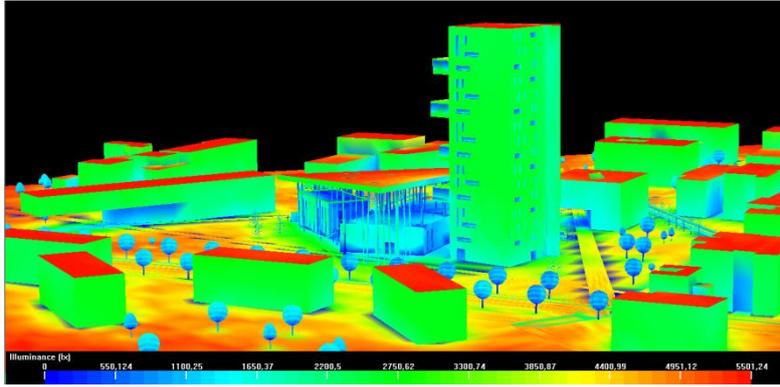


Figura 3.8. Esempio di simulazione e rendering ottenibili con Lightscape.

Microstation

Software a pagamento, prodotto dalla casa americana Bentley. È un CAD per lavorazioni tecniche e modellazioni grafiche, con il vantaggio che fornisce anche calcoli illuminotecnici molto definiti, con la possibilità di creare un'animazione della dinamica solare (Fig. 3.9).

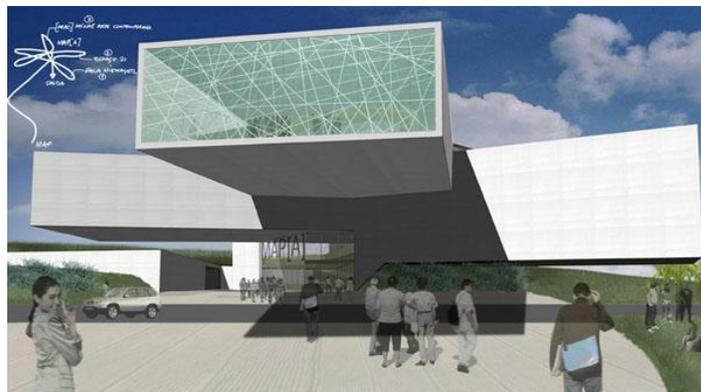


Figura 3.9. Esempio di rendering ottenibili con Microstation.

Radoray

Software a pagamento, è integrato a 3D Studio Max per poter effettuare i calcoli in **radiosity** e rendering foto realistici (Fig. 3.10).



Figura 3.10. Esempio di rendering ottenibili con Radoray.

Genelux

Software gratuito, funziona attraverso il web. L'utente carica sul sito il file del progetto da analizzare e successivamente scarica i risultati dei calcoli, che vengono eseguiti sul server.

Relux

Software gratuito, è in grado di calcolare oltre che l'illuminazione naturale e artificiale, anche quella integrata naturale e artificiale. Per sfruttare questa potenzialità, è necessario inserire il progetto in un luogo "reale", inserendo le coordinate della latitudine e la longitudine del sito di progettazione, e l'indicazione dell'orientamento Nord. Dopo aver definito questi parametri

geometrici, per effettuare il calcolo occorre definire anche la data completa per il calcolo (giorno ed ora) e il tipo di cielo normalizzato CIE.

Nel software sono possibili solo due condizioni di cielo, entrambe normalizzate CIE, la condizione di cielo sereno e la condizione di cielo coperto. E' inoltre necessario definire il grado di precisione dei calcoli da effettuare, secondo diverse tipologie di calcolo: solo percentuale diretta, indiretta bassa, indiretta media.

Relux Professional è uno strumento di modellazione base e di rendering usato principalmente nel settore di progettazione della luce. I rendering che seguono le leggi della fisica, si basano su dati fotometrici e sono sviluppati tramite un processo di **radiosity**. L'aggiunta di un plug-in chiamato Vision al programma, che si basa sul software Radiance, calcola simulazioni di luce realistiche permettendo di inserire un grande numero di materiali con caratteristiche migliori; l'utilizzo anche del **ray tracing** in questo caso permette la rappresentazione di specchi e materiali trasparenti.

Relux Professional stesso comunque già offre delle facilitazioni per le proprietà di riflessione spettrale delle superfici e l'assegnazione di materiali per elementi riflettenti e trasparenti. I calcoli forniscono sia simulazioni realistiche che diagrammi di illuminamento (Fig. 3.11).



Figura 3.11. Esempio di rendering ottenibili con Relux Professional (in alto) e con l'aggiunta del plug-in Vision al programma (in basso).

Verifica dell'attendibilità delle simulazioni

Per testare le principali differenze tra i programmi e le loro caratteristiche peculiari, sono state fatte delle simulazioni con i programmi Radiance, Lightscape e Relux per due differenti tipi di ambiente assegnando alla rappresentazione numerica dei risultati nei vari programmi la stessa scala di valori in modo tale da poter confrontare i risultati. Si sono analizzati un ambiente tipo e un ambiente reale, nella fattispecie un ufficio (per il quale è stato possibile mettere a confronto tra loro oltre i risultati delle simulazioni dei vari programmi, anche quelli delle misurazioni effettuate in ambiente).

Ambiente tipo (Fig. 3.12)

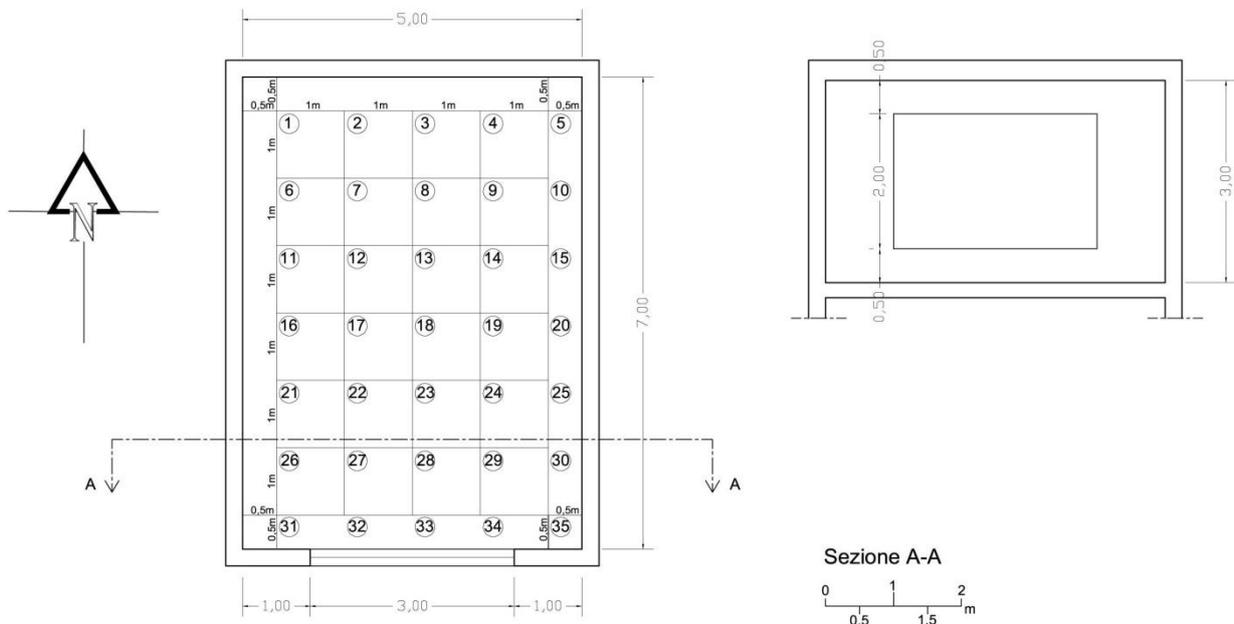


Figura 3.12. Pianta e sezione

Simulazione dell'ambiente tipo: 21 Dicembre ore 14 cielo sereno

Simulazioni con Radiance (Fig. 3.13 e 3.14)

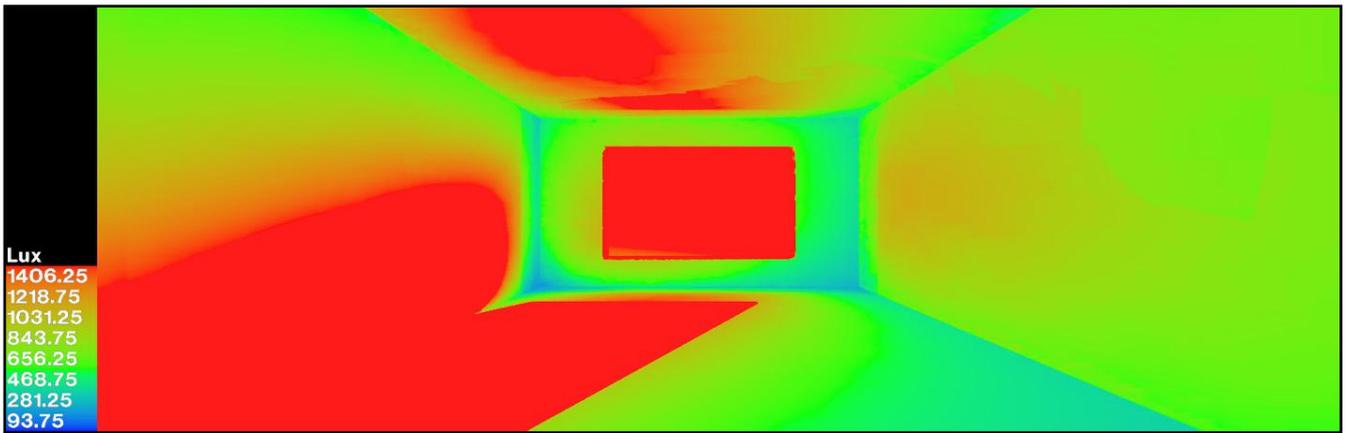


Figura 3.13. Illuminamento

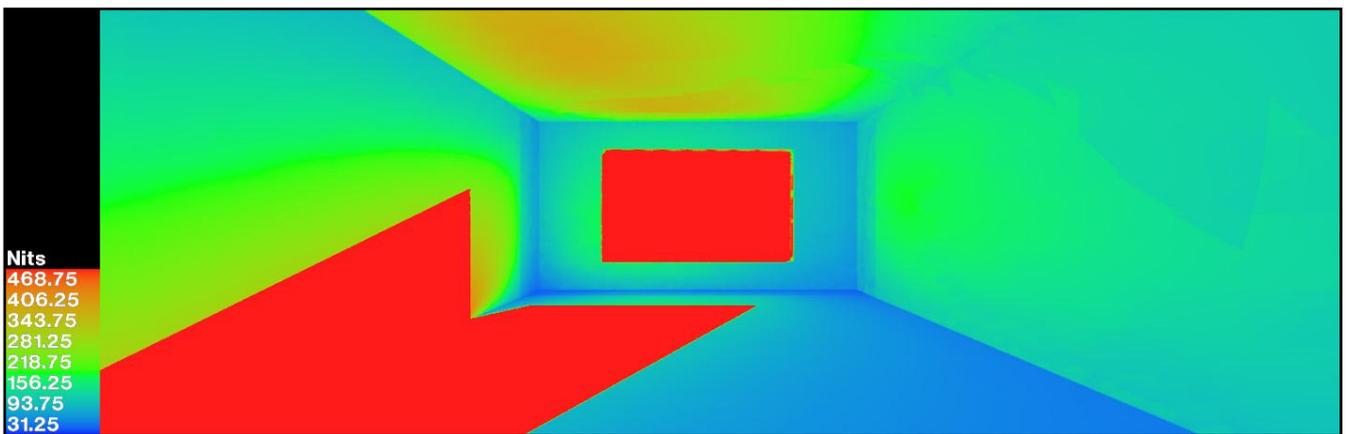


Figura 3.14. Luminanza

Simulazioni con Lightscape (Fig. 3.15 e 3.16)

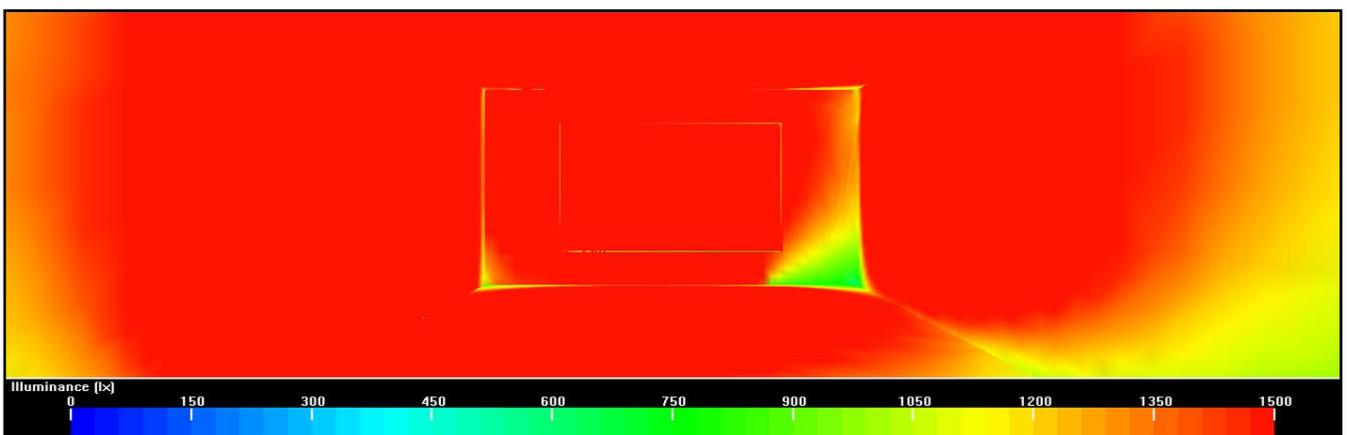


Figura 3.15. Illuminamento

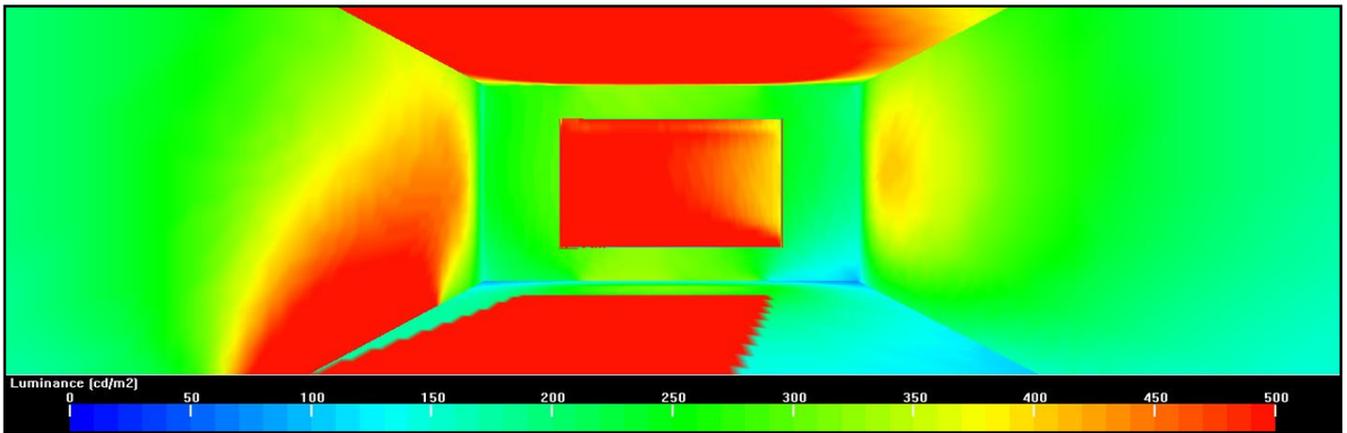


Figura 3.16. Luminanza

Simulazioni con Relux (Fig. 3.17 -19)

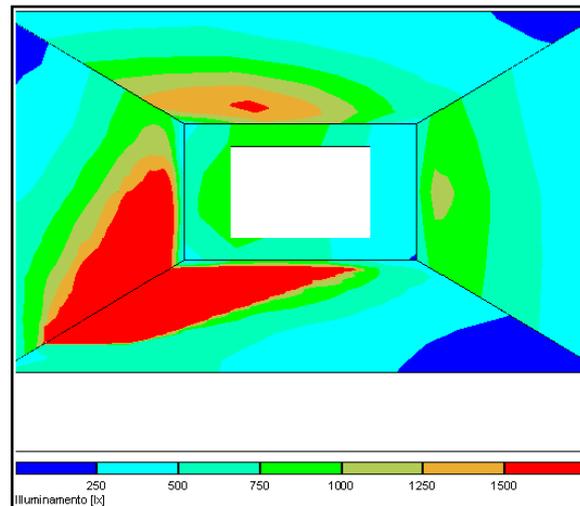


Figura 3.17. Illuminamento

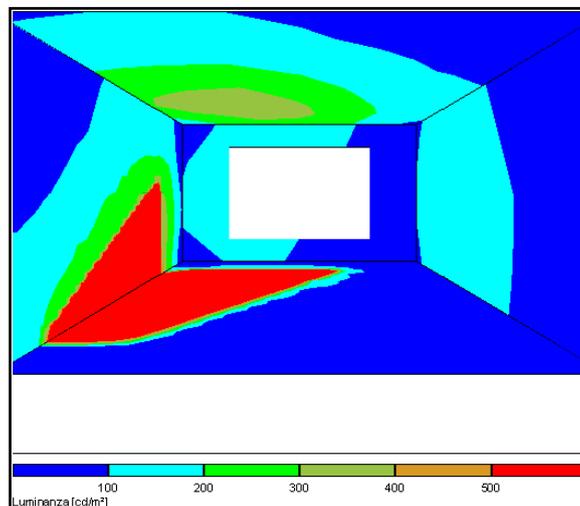


Figura 3.18. Luminanza

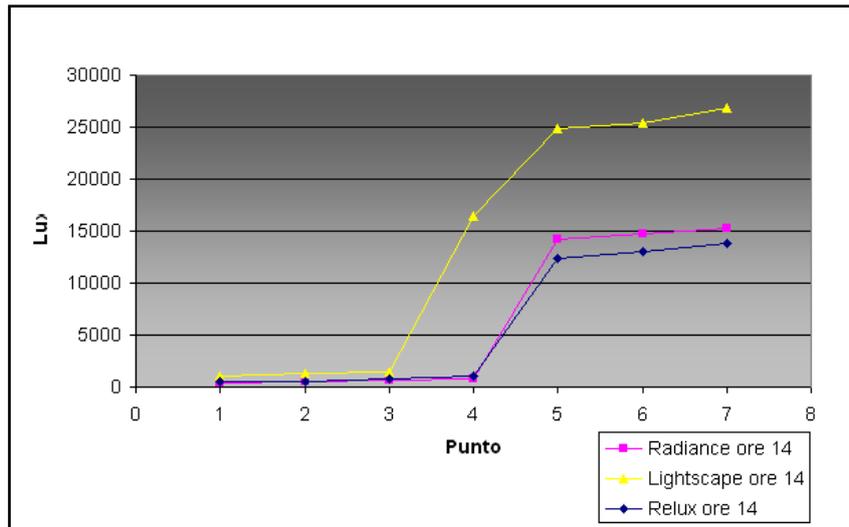


Figura 3.19. Confronto tra le simulazioni dell'ambiente tipo nei vari software per condizioni di cielo sereno (punti: 3, 8, 13, 18, 23, 28, 33 ovvero lungo la linea di mezzeria della finestra)

Simulazione dell'ambiente tipo: 21 Dicembre ore 14 cielo coperto

Simulazioni con Radiance (Fig. 3.20 e 3.21)

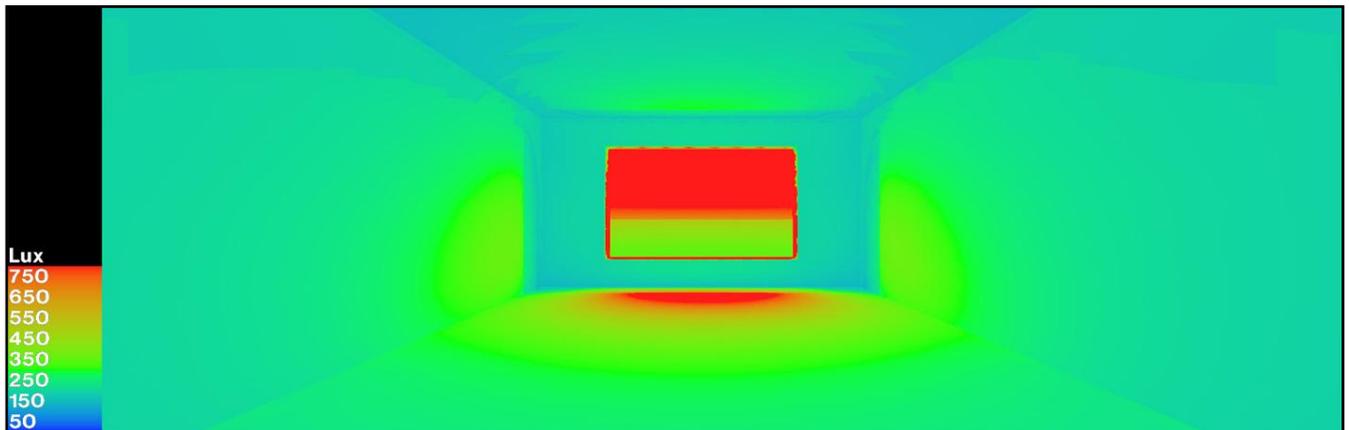


Figura 3.20. Illuminamento

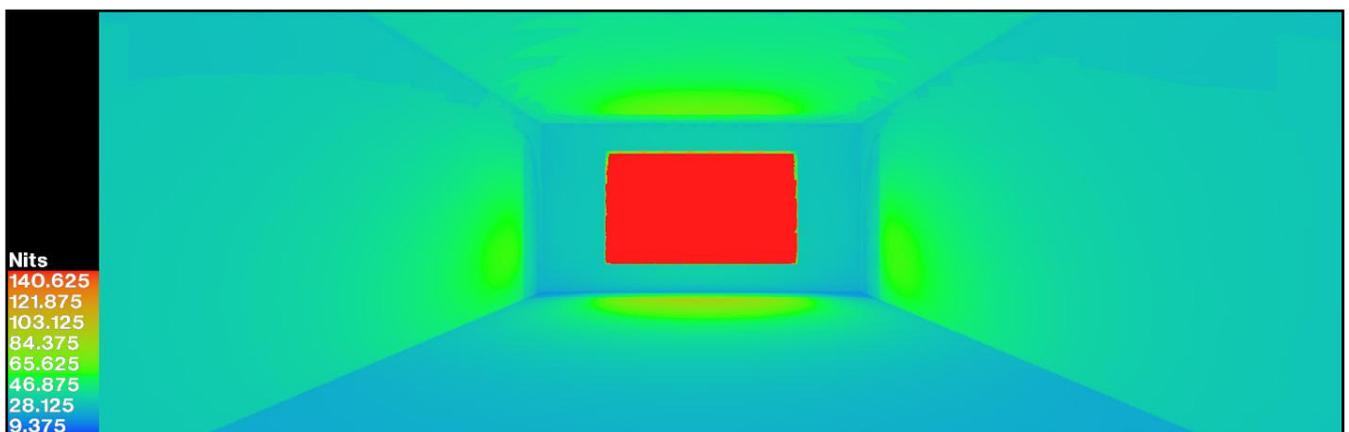


Figura 3.21. Luminanza

Simulazioni con Lightscape (Fig. 3.22 e 3.23)

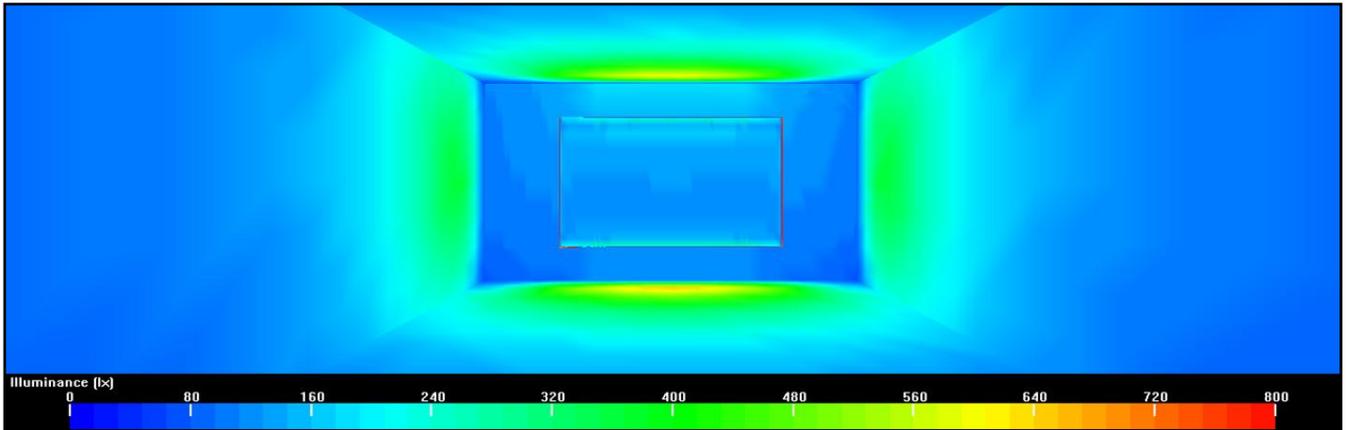


Figura 3.22. Illuminamento

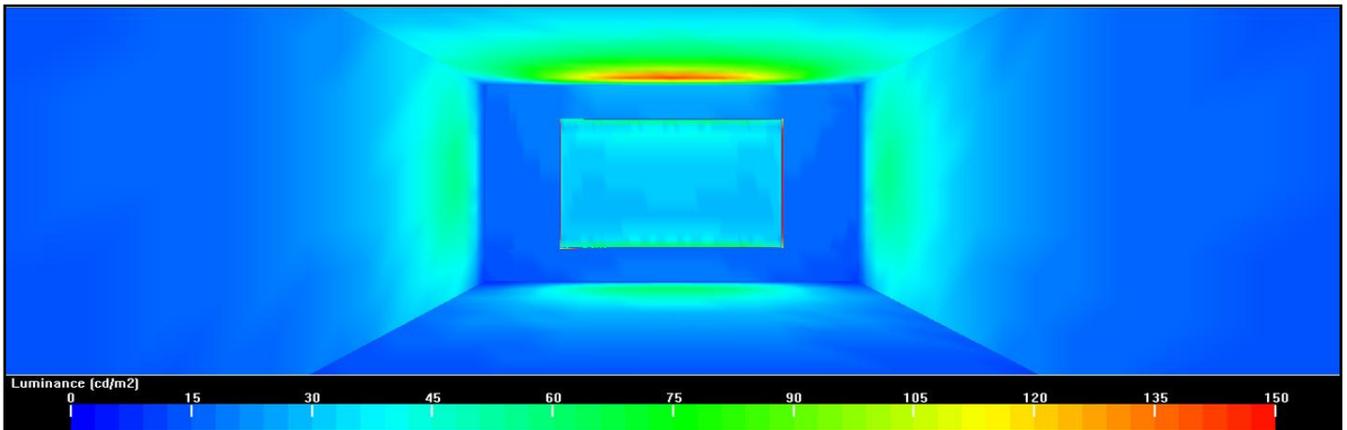


Figura 3.23. Luminanza

Simulazioni con Relux (Fig. 3.24 -26)

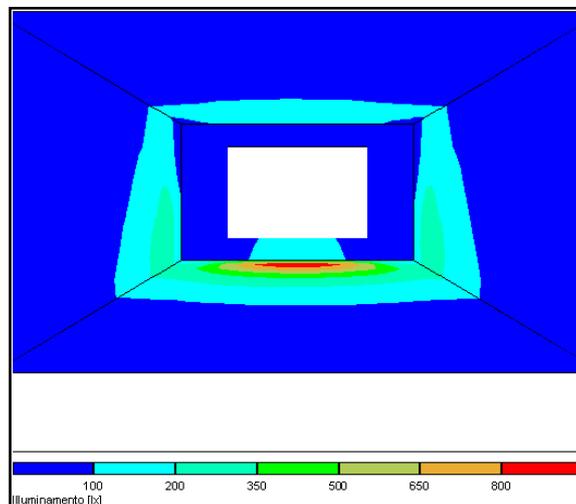


Figura 3.24. Illuminamento

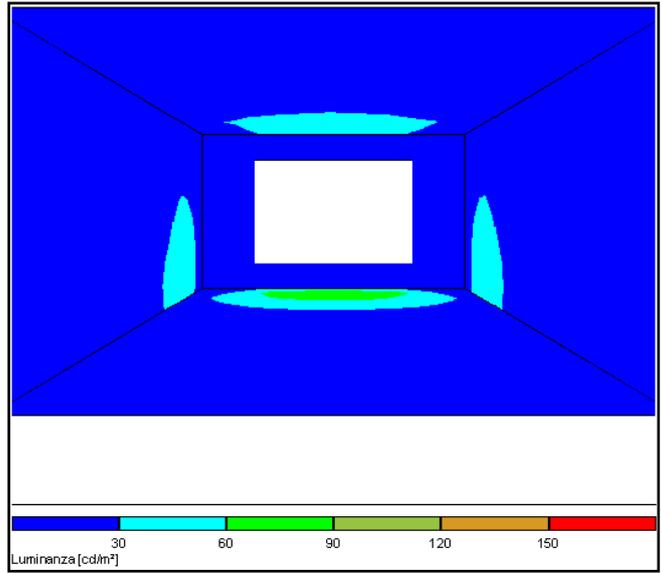


Figura 3.25. Luminanza

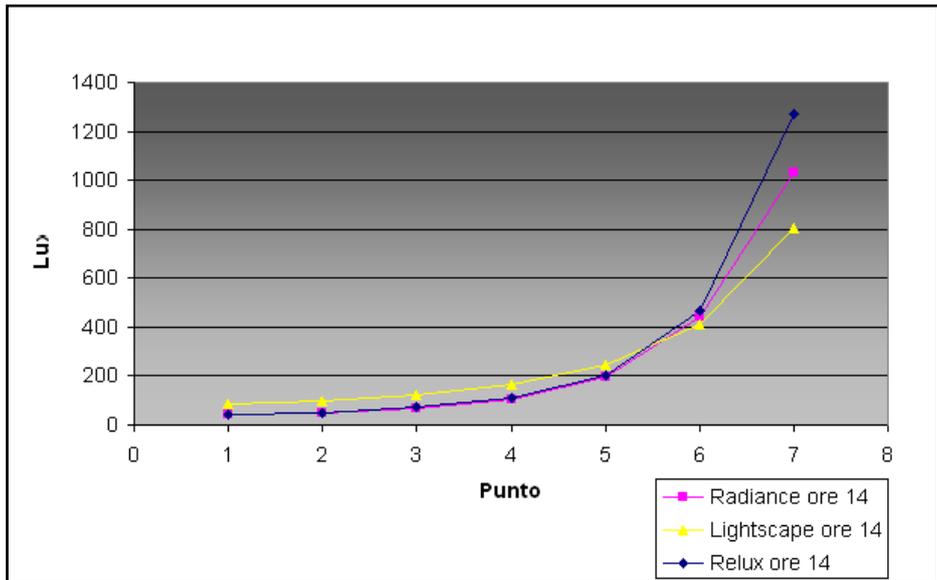


Figura 3.26. Confronto tra le simulazioni dell'ambiente tipo nei vari software per condizioni di cielo coperto (punti: 3, 8, 13, 18, 23, 28, 33 ovvero lungo la linea di mezzera della finestra)

Ambiente reale: ufficio (Fig 3.27)

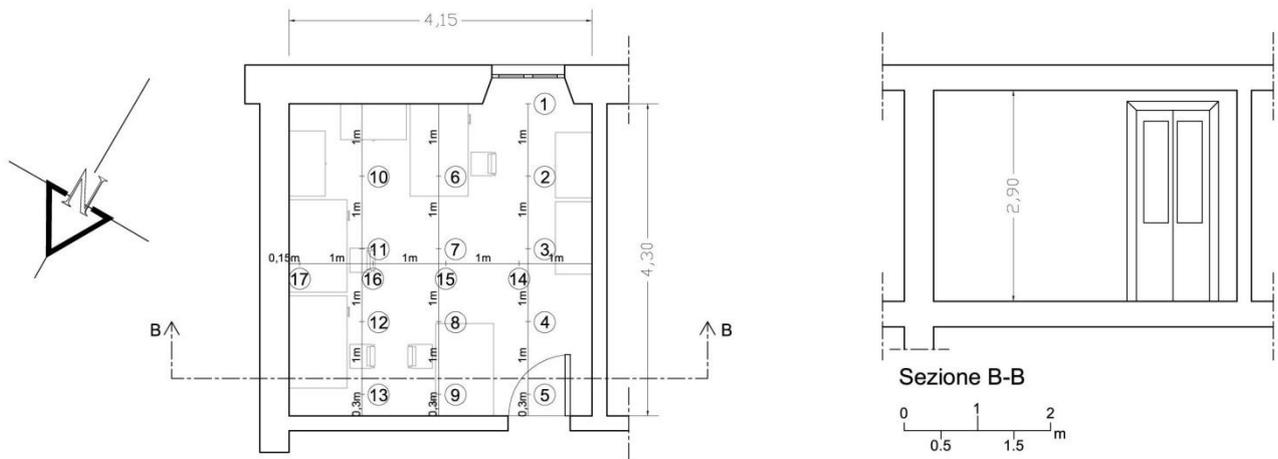


Figura 3.27. Pianta e sezione

Simulazione dell'ambiente reale: **21 Dicembre ore 16 cielo sereno**

Simulazioni con Radiance (Fig. 3.28 e 3.29)

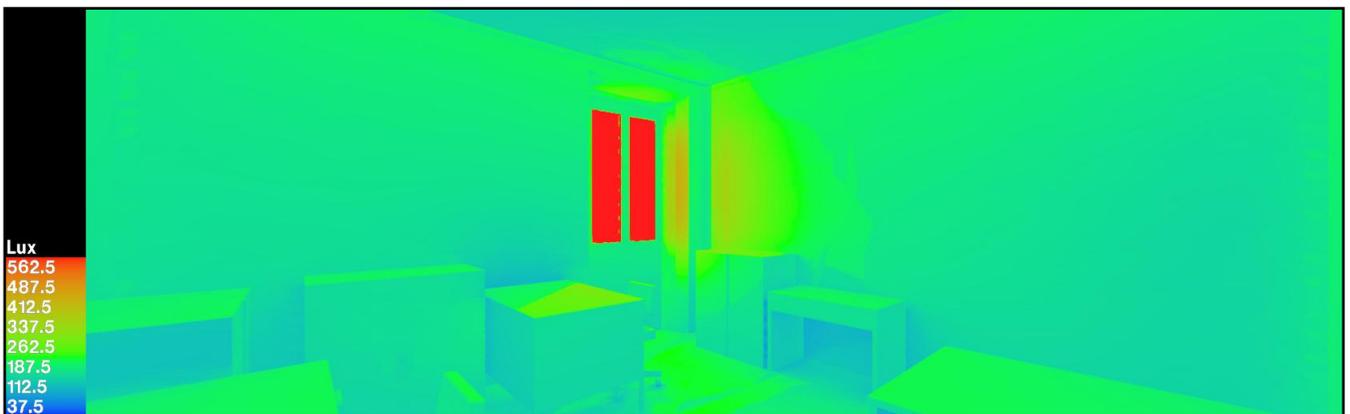


Figura 3.28. Illuminamento

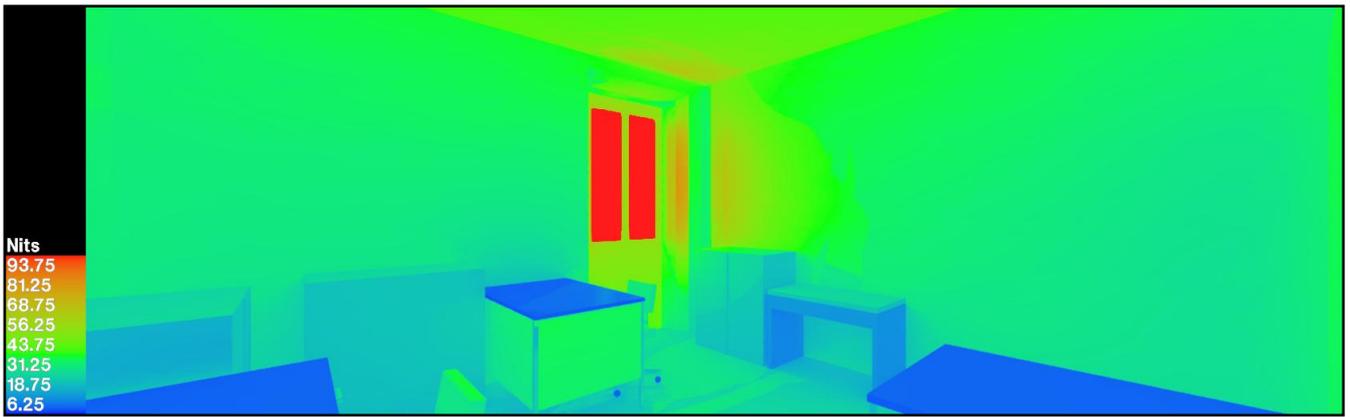


Figura 3.29. Luminanza

Simulazioni con Lightscape (Fig. 3.30 e3.31)

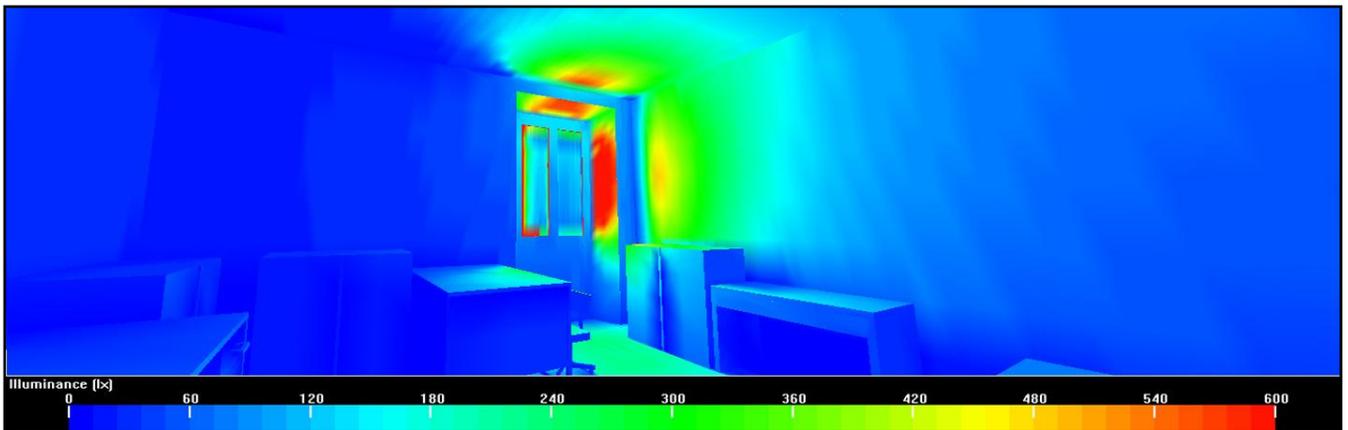


Figura 3.30. Illuminamento

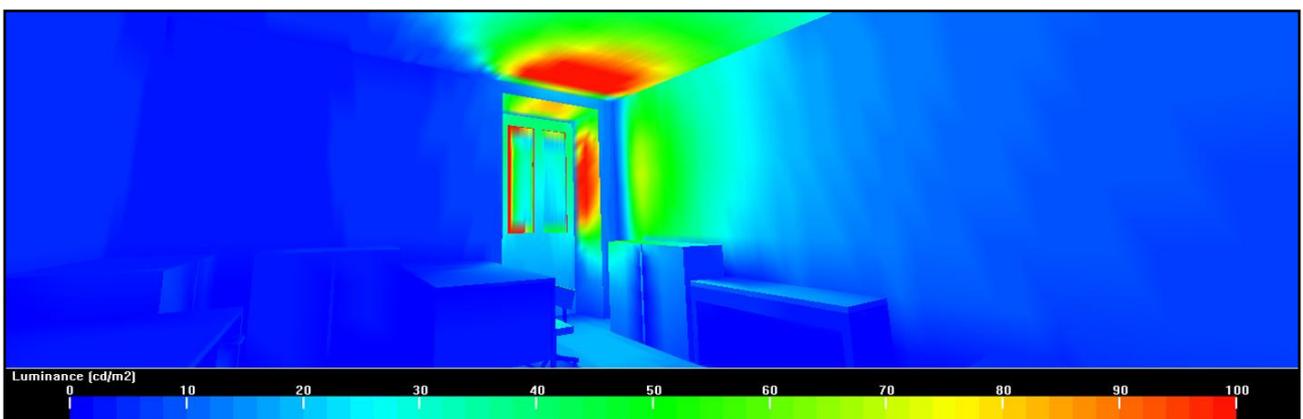


Figura 3.31. Luminanza

Simulazioni con Relux (Fig. 3.32-34)

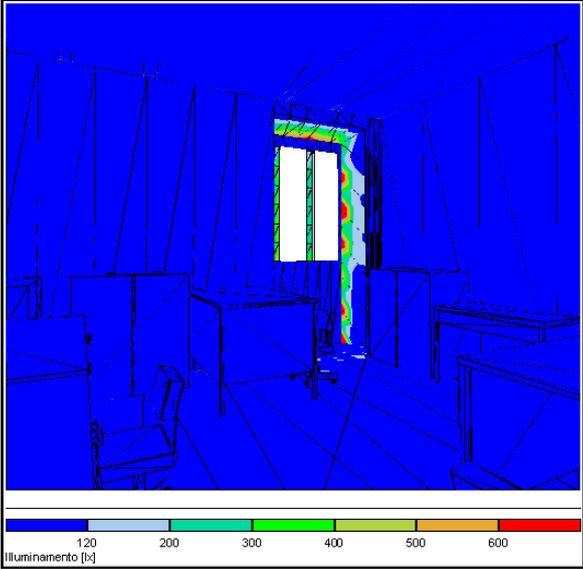


Figura 3.32. Illuminamento

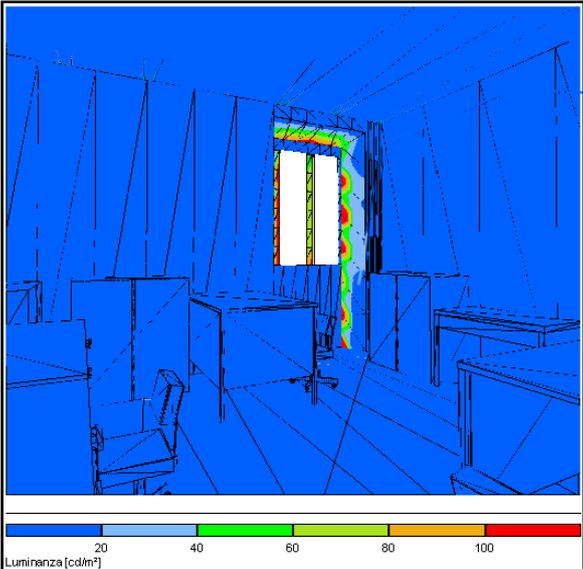


Figura 3.33. Luminanza

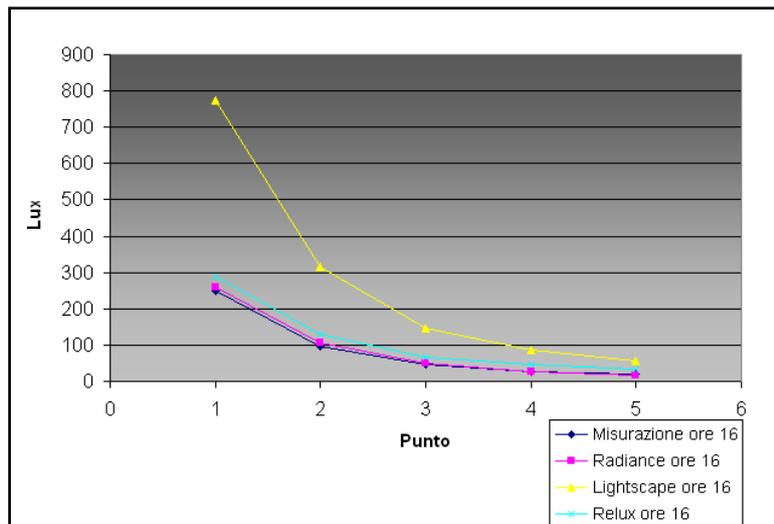


Figura 3.34. Confronto tra le simulazioni dell'ambiente reale nei vari software e le misurazioni effettuate per condizioni di cielo sereno (per i punti: 1-5 ovvero lungo la linea di mezzera della finestra)

Conclusioni

Ad un primo confronto tra le simulazioni e i risultati numerici ottenuti con i vari software effettuati sull'ambiente tipo creato al computer, si nota una somiglianza di risultati tra Radiance e Relux per le due condizioni di cielo simulate. Le simulazioni fatte per l'ambiente reale dell'ufficio, che vedono sempre una discrepanza di risultati del software Lightscape rispetto agli altri, avvalorano allo stesso tempo la tesi della maggiore attendibilità di risultati di Radiance (che pur avendo valori simili a quelli ottenuti con Relux, mostra risultati numerici più vicini a quelli delle misurazioni effettuate nell'ambiente reale e quindi più accurati).

Capitolo III

Linee guida per la progettazione

Negli ambienti dotati di finestre, il contributo di luce naturale in termini di illuminamento interno può essere calcolato secondo indicazioni normative attraverso il coefficiente di luce diurna medio, definito come rapporto tra illuminamento su piano orizzontale non ostruito in ambiente esterno, e contemporaneo valore di illuminamento medio in ambiente, in condizioni di cielo uniformemente coperto (CIE Overcast sky). Il valore di tale coefficiente è definito dalle normative relative agli specifici ambienti del terziario. In mancanza di tali normative, ci si può riferire alla Tabella A che esprime il fattore di luce diurna in funzione della tipologia d'ambiente e della sua destinazione d'uso, ovvero prevedere per il fattore di luce diurna un valore compreso nell'intervallo 2-5%. Ambienti con un fattore di luce diurna medio minore del 2% richiedono l'impiego della luce artificiale anche durante le ore diurne.

Tabella A. Fattore di luce diurna in funzione di tipologia d'ambiente e destinazione d'uso.

Destinazione d'uso	Tipologia di edificio	Valore minimo del fattore medio di luce diurna [%]
Aule	Scuole, collegi, ospedali...	5
Aule di grandi dimensioni	Scuole	5
Sale lettura	Scuole, collegi, ospedali...	5
Sale musica	Edifici ricreazionali ed educativi	5
Ambienti di lavoro	Scuole, collegi, ambienti industriali, uffici...	5
Laboratori per insegnamento	Scuole, collegi, centri di studio e preparazione, ...	5
Laboratori	Uffici, stabilimenti di ricerca, ambienti industriali, ...	5
Sale d'aspetto	Ospedali, uffici, ambienti industriali...	5
Uffici	Edifici di varia tipologia	5
Uffici con superfici trasparenti a nastro	Edifici di varia tipologia	5
Ambienti tipografia e zone con macchine da lavoro	Uffici, ambienti industriali, banche...	5
Zone computer	Uffici, banche, ...	5
Uffici di progettazione e disegno	Uffici, ambienti industriali, ...	5
Officine, laboratori, zone di produzione, ...	Uffici, ambienti industriali, ...	5

A partire dal valore imposto del fattore di luce diurna medio, è possibile dimensionare la superficie della finestra, ovvero dell'apertura, ovvero della superficie effettiva utile per l'illuminamento naturale attraverso la relazione:

$$\eta_m = \frac{\tau \cdot A_n \cdot \theta / 90}{2 \cdot A_i \cdot \rho_m} [\%]$$

dove:

- η_m = fattore di luce diurna medio;
- τ = trasmittanza nel visibile dell'elemento trasparente;
- A_n = area netta dell'elemento trasparente;
- A_i = superficie totale dell'ambiente interno (somma di tutte le superfici interne);
- θ = angolo di vista del cielo, con riferimento al centro della copertura;
- ρ_m = coefficiente di riflessione medio delle singole superfici interne pesato sulla superficie totale dell'ambiente interno; si calcola, indicando con A_i l'i-esima superficie interna, e con ρ_i il rispettivo coefficiente di riflessione, attraverso la seguente espressione:

$$\rho_m = \frac{1}{A_T} \sum_i \rho_i A_i$$

Per i valori di τ , ρ , si possono usare i valori riportati nelle seguenti tabelle B e C.

Tabella B. Trasmittanza nel visibile dei vetri.

Tipologia di vetro	τ
Vetro chiaro singolo	0.89
Vetro chiaro singolo colorato (bronzo)	0.53
Vetro chiaro singolo colorato (grigio)	0.42
Vetro chiaro singolo colorato (blu)	0.57
Vetro chiaro singolo colorato (verde)	0.70
Vetro riflettente chiaro	0.63
Vetro riflettente argento	0.35
Vetro riflettente bronzo	0.25
Vetrocamera: chiaro + chiaro	0.80
Vetrocamera: riflettente chiaro + chiaro	0.44
Vetrocamera: riflettente argento + chiaro	0.49
Vetrocamera: riflettente bronzo + chiaro	0.30
Vetrocamera: riflettente verde + chiaro	0.60
Vetrocamera: assorbente argento + chiaro	0.37

bassoemissivo	
Vetrocamera: assorbente bronzo + chiaro bassoemissivo	0.39
Vetrocamera: assorbente verde + chiaro bassoemissivo	0.52

Tabella C. Coefficienti di riflessione delle pareti interne.

Superficie	ρ (%)
Soffitto	70 – 80%
Pareti interne	50 – 70%
Pavimento	20 – 40%
Arredi	25 – 45%

Per i valori di θ , esso si considera uguale a 180 nel caso dei lucernari, pari a 90 nel caso di finestre su piano verticale prive di ostruzioni esterne che impediscano la vista del cielo. Negli altri casi va valutato in funzione delle ostruzioni esterne presenti, secondo quanto mostrato in Fig. 4.1.

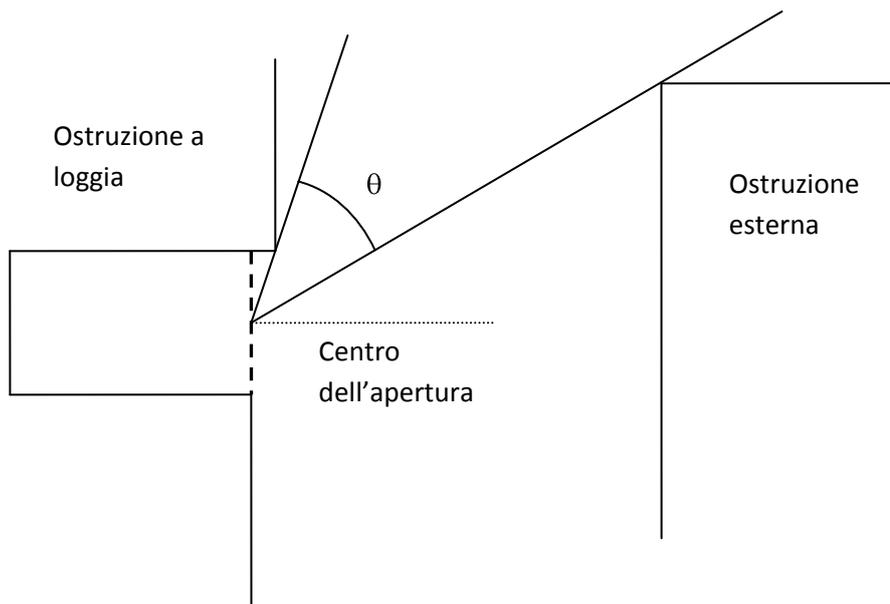


Figura 4.1. Definizione dell'angolo θ .

In presenza di più aperture riferite ad uno stesso ambiente, il calcolo deve essere ripetuto per ciascuna apertura singolarmente; il coefficiente di luce diurna medio è la somma dei coefficienti medi di luce diurna ottenuti per ciascun elemento trasparente considerato.

Indicativamente, la superficie della finestra è circa il 25% in più rispetto alla superficie netta dell'elemento trasparente, per considerare l'introduzione di spessori, telai, etc...

In assenza di sistemi idonei ad incrementare la penetrazione della luce naturale, è opportuno controllare la distribuzione della luce naturale, attraverso il fattore di profondità L_{max} :

$$\frac{L_{\max}}{W} + \frac{L_{\max}}{H} = \frac{2}{1 - \rho_{m/2}}$$

dove con W si è indicata la larghezza dell'ambiente, con H l'altezza dell'architrave della finestra rispetto a pavimento, con L_{\max} la massima profondità dell'ambiente per garantire una uniforme distribuzione della luce naturale, e con $\rho_{m/2}$ il fattore di riflessione medio pesato sulle relative aree delle superfici della metà ambiente opposta alle finestre.

Il contributo della luce naturale in termini di risparmio energetico può essere valutato attraverso il calcolo del Fattore di Convenienza Energetica (FCE):

$$FCE = \frac{A_n}{A_p} \cdot \tau \cdot CO[\%]$$

essendo A_p la superficie della parete che ospita la superficie trasparente considerata, e CO il Coefficiente di Ostruzione della finestra. Tale coefficiente è legato alla percentuale di ostruzione della finestra tramite l'impiego della seguente Tabella D:

Tabella D. Valori del coefficiente di ostruzione.

Ostruzione della finestra	CO
< 50%	1
50% ≤ x < 70%	0.85
70% ≤ x < 90%	0.65
≥ 90%	0.40

dove con ostruzione della finestra si intende la percentuale di finestra che risulta ostruita alla vista di un osservatore interno all'ambiente, posto a 3 metri di distanza dalla finestra e che guardi normalmente alla stessa verso l'ambiente esterno, con occhio posto a 1.7 metri dal pavimento.

Un valore maggiore o uguale al 25% del Fattore di Convenienza Energetica assicura la convenienza energetica del dimensionamento effettuato. Un valore inferiore al 25% impone la ricerca di soluzioni quali la riduzione delle ostruzioni, l'aumento della superficie dell'apertura, l'aumento del coefficiente di trasmittanza nel visibile. Qualora tali modifiche non fossero possibili, l'impiego della luce naturale non avrebbe un effetto positivo in termini di risparmio energetico, ma avrebbe comunque un effetto positivo in termini di benessere visivo, se opportunamente controllati i fenomeni di abbagliamento.

Altre indicazioni generali che possono essere usate nelle prime fasi progettuali sono:

- Non sovradimensionare le superfici trasparenti
- calcolata la superficie trasparente, è preferibile un'estensione orizzontale degli elementi vetrati, piuttosto che uno sviluppo verticale
- rispettare per gli ambienti i limiti dimensionali che consentano un'efficace penetrazione interna della luce naturale
- realizzare ambienti con illuminazione possibilmente bilaterale, con vantaggi sia per gli aspetti relativi all'illuminamento che alla ventilazione degli ambienti;
- evitare l'impiego di vetri troppo scuri, che riducono la quantità di luce filtrante durante l'intero arco dell'anno
- prevedere l'impiego di controlli automatici per la regolazione della luce naturale, e per l'integrazione tra luce naturale e artificiale, in ottica di risparmio energetico
- impiegare schermature e frangisole per evitare abbagliamento ed eccessivi carichi termici.

Alcune indicazioni sono inoltre necessarie per guidare il progettista nella procedura decisionale per la coordinazione della progettazione illuminotecnica di luce naturale e artificiale, e per l'ottimizzazione della loro integrazione.

Con particolare riferimento alla necessaria integrazione tra luce naturale e artificiale, le idee chiave che il progettista può seguire nella definizione della strategia di regolazione per l'integrazione delle due componenti di illuminazione sono:

- considerare l'integrazione tra luce naturale e artificiale come strategia dal principio;
- scegliere una strategia ambientale o di lavoro per una semplice integrazione con la luce naturale;
- usare illuminazione diretta/indiretta per evitare l'abbagliamento e completare la distribuzione della luce naturale;
- bilanciare la luce in una stanza profonda;
- stabilire le tessiture delle superfici per controllare la distribuzione di luce;
- eliminare potenziali conflitti prima possibile;
- bilanciare l'abbagliamento da luce naturale con un'illuminazione ben collocata

Perché le scelte progettuali per la luce artificiale siano orientate alla integrazione con la luce naturale, nel rispetto dei requisiti di efficienza energetica e comfort ambientale, le indicazioni ad oggi più di aiuto per il progettista sono:

- utilizzare lampade fluorescenti tri-fosforo 32 W T8, e dimming;
- cercare di avvicinarsi alla temperatura (fredda) di colore della luce naturale;
- evitare di utilizzare lampade a scarica ad elevata intensità;
- evitare lampade che non possono essere dimmerate in modo efficace;
- scegliere elementi energeticamente efficienti;
- seguire le indicazioni pratiche relative all'abbagliamento con luce dal basso;
- evitare l'abbagliamento delle lampade presenti nel campo visivo;
- utilizzare strategie di controllo della luce per bilanciare l'abbagliamento da luce naturale in assenza di schermature;
- la qualità dell'illuminazione deve venire prima dell'efficienza energetica-

Sulla base di queste indicazioni, è possibile individuare le migliori soluzioni per una progettazione efficiente ed efficace della luce artificiale, che ben si integri con il contributo di luce naturale. Questo contributo, definito dalle indicazioni normative precedentemente illustrate, consente la definizione del clima luminoso dell'ambiente in modo univoco. Mentre però le procedure per la progettazione della luce artificiale risultano ormai ben strutturate e definite, alcune lacune sono ancora presenti per ciò che concerne l'approccio progettuale alla luce naturale. L'esistenza infatti di molteplici soluzioni tradizionali per l'utilizzo e il controllo della luce naturale, affiancate alla sempre maggiore quantità di soluzioni innovative di componenti e sistemi (come indicato nel Cap.1) può comportare un rischio di confusione e cattivo utilizzo dei sistemi e componenti a disposizione del progettista. Per questo, un approccio qualitativo per la realizzazione del giusto clima luminoso può basarsi su un'analisi qualitativa di approccio per la definizione del più adatto sistema di luce naturale per l'ambiente da progettare.

Tale metodologia di approccio, di semplice applicazione, si basa sull'impiego di una matrice di valutazione degli elementi (che potrebbe essere costruita in modo analogo anche per i sistemi di luce artificiale e per i sistemi di regolazione e controllo) in cui compaiano in modo chiaro tutte le caratteristiche che possano portare alla scelta di un sistema per la specifica applicazione in oggetto.

Con riferimento alla matrice descrittiva presentata nel Cap. 1, si può notare come dalla selezione delle caratteristiche di interesse per il caso di studio si può arrivare facilmente a determinare qualitativamente i componenti/sistemi che possono risultare utili per la progettazione dell'ambiente specifico di studio. Dall'analisi della matrice, infatti, si nota come i campi che

caratterizzano i vari materiali sono: classificazione, caratteristiche, prestazioni/criteri di scelta. In particolare, ciascuno di questi campi si specifica in una sotto-tabella (Tab. E-G):

Tabella E. Classificazione del sistema

Sistema di illuminazione diurna	classificazione				
	Con schermatura		Senza schermatura		
	si basano sulla luce diffusa del cielo e respingono la luce diretta del sole	usano la luce diretta del sole (mandandola verso il soffitto o sopra il livello degli occhi)	ridirezionano la luce diffusa del cielo all'interno della stanza	ridirezionano la luce diretta del sole all'interno della stanza	accolgono e trasportano la luce del sole per grandi distanze fino al centro dell'edificio

Tabella F. Caratteristiche del sistema

Sistema di illuminazione diurna	caratteristiche					
	tecnologia: tradizionale/innovativa	altezze solari e condizioni di cielo	Orientamento ottimale	collocazione nell'edificio	collocazione rispetto alla finestra: esterna e/o interna, in intercapedine	tipologia: fissa/mobile, continua/discontinua, orizz./vert./inclinata

Tabella G. Caratteristiche del sistema

Sistema di illuminazione diurna	Prestazioni/criteri di scelta														
	Protezione dall'abbagliamento	Vista verso l'esterno	Disponibilità di luce naturale	Direzione in profondità	Illuminazione uniforme	Risparmio energetico	Alterazione cromatica	Riduzione dei termici	Sfruttamento guadagno solare	Possibilità FV	Regolazione	Manutenzione	Costo	Estetica	Retrofitting

Risulta evidente come la definizione delle specifiche generali di progetto (località, latitudine, altezza solare, condizioni di cielo prevalenti, etc) definiscono le voci della Tab. F, aiutando il progettista in una prima selezione dei sistemi più adatti al caso in studio. Tale selezione può e deve essere evidentemente immediatamente integrata con la specifica retrofitting di Tab. G. In questo modo, il progettista ha già fatto una selezione importante dei diversi sistemi di luce naturale utilizzabili. A questo punto, le scelte del progettista si possono orientare tranquillamente su quelli che ritiene i criteri prevalenti per il suo caso (Tab. G), eventualmente aiutandosi con l'ausilio di un peso (assolutamente indicativo) per facilitare la definizione delle priorità su cui deve basarsi la scelta. Attraverso questa semplice procedura, risulta quindi abbastanza semplice individuare un numero limitato di sistemi che potrebbero essere la soluzione ottimale per il caso di progetto esaminato. A questo punto, l'impiego di software di progettazione illuminotecnica, generalmente di alto livello, offre un contributo fondamentale per la scelta definitiva del sistema.

Capitolo IV

Presentazione di casi studio

La scuola oggetto di studio ed analisi è situata nella parte sud-est di Roma (Fig. 5.1). È una scuola elementare, composta da un piano terra e un primo piano, la cui pianta è organizzata attorno ad un grande atrio centrale a doppia altezza; quindi, ci sono le aule disposte secondo tutti gli orientamenti. La forma di tutte le aule è pressoché quadrata, con un angolo smussato, e il tipo di illuminazione naturale che caratterizza l'accesso della luce diurna è sempre laterale (Fig. 5.2).



Figura 5.1. Planimetria della scuola e del suo intorno (in rosso l'edificio in questione)

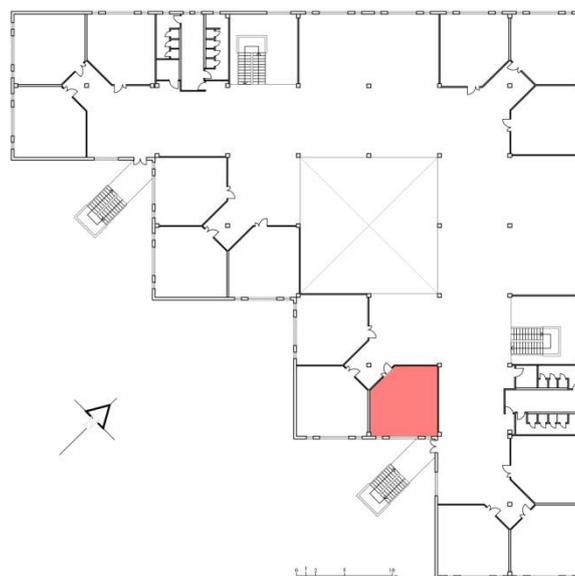


Figura 5.2. Pianta del primo piano dell'edificio scolastico: in rosso l'aula oggetto di studio

Descrizione dell'aula e modalità di misurazione

Oggetto delle misurazioni è un'aula al primo piano, orientamento sud-est. La pianta misura nei suoi lati lunghi rispettivamente 7,05x7,33 m, ed ha un'altezza di 3,25 m. L'aula è solitamente occupata da 18 bambini e un'insegnante (Fig. 5.3-5).



Figura 5.3. Aula: zona muro



Figura 5.4. Aula: lato con cattedra dell'insegnante e lavagna



Figura 5.5. Aula: zona finestra

Per l'effettuazione delle misurazioni, si sono scelti giorni in cui le condizioni di cielo fossero stabili e definite per consentire un più fedele confronto e verifica delle simulazioni rispetto alle misure, negli stessi giorni ed ore e con le stesse condizioni di cielo: cielo totalmente coperto ovvero totalmente sereno. La griglia di punti di misura è stata definita scegliendo una disposizione a forma di croce con bracci che partono dal centro dei lati maggiori dell'aula. I punti sono stati posti alla distanza di un metro circa l'uno dall'altro, ad un'altezza del piano di lavoro di 0,8 m (Fig. 5.6 e 5.7). Nessun tipo di modifica è stata fatta alle classi rispetto alla loro ordinaria disposizione: le misure sono state prese senza togliere nessun mobile.

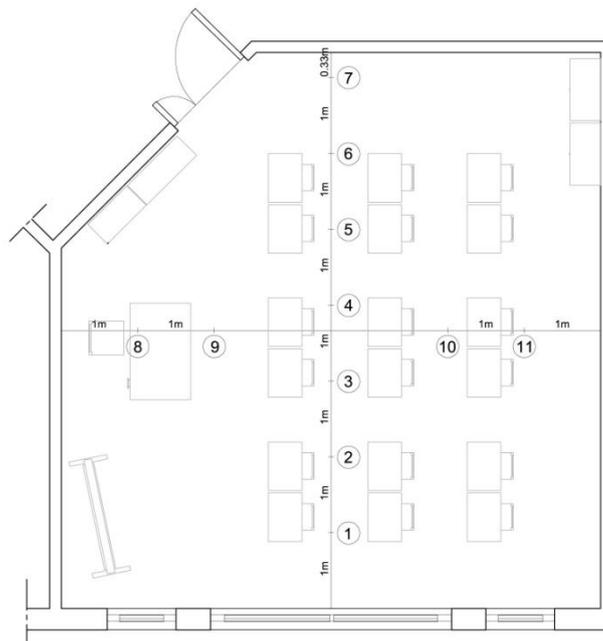


Figura 5.6. Pianta dell'aula oggetto delle misurazioni con l'indicazione dei punti di misura

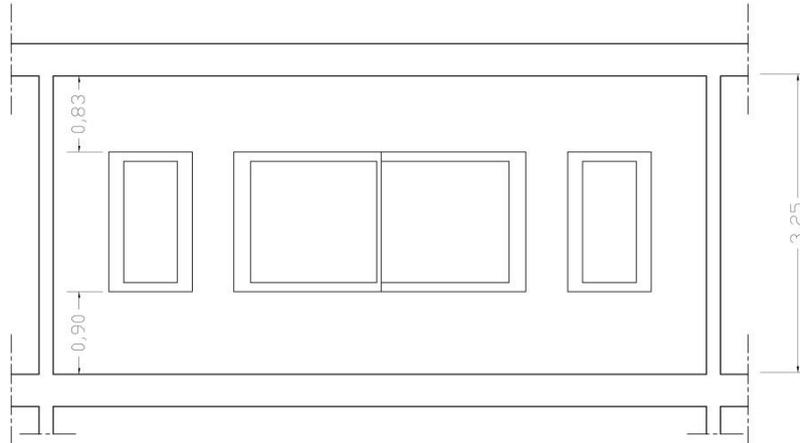


Figura 5.7. Sezione dell'aula oggetto delle misurazioni

Il giorno in cui sono state effettuate le misure è il 21 Dicembre 2007, in condizioni di cielo prevalentemente coperto. Per quanto possibile, si è proceduto ad una rilevazione delle grandezze nei punti di misura ogni 30 minuti, avendo cura di prendere le misure dell'illuminamento esterno all'inizio e a metà di ogni misurazione (per valutare eventuali cambiamenti nelle condizioni di cielo durante le misurazioni dei punti interni). I risultati della campagna di misura sono indicati in Tab. 5.1:

Tabella 5.1. Misure dell'illuminamento interno dell'aula

cielo coperto	cielo poco coperto	cielo sereno	cielo coperto	cielo coperto	cielo coperto	cielo molto coperto	cielo coperto	cielo coperto	cielo coperto	cielo coperto
ore 10:30	ore 11:30	ore 12:00	ore 12:30	ore 13:00	ore 13:30	ore 14:00	ore 15:00	ore 15:30	ore 16:00	ore 16:30

esterno	6500	55000	60000	5000	6600	9000	2600	900	690	290	67
---------	------	-------	-------	------	------	------	------	-----	-----	-----	----

punti

1	1530	27000	31700	1200	2070	1430	440	180	125	52	12
2	1160	25000	27500	408	870	430	170	65	45	20	4
3	560	1100	1200	130	380	160	77	20	16	6	2
4	300	850	890	85	170	110	40	13	9	4	1
5	130	600	550	50	75	70	24	9	6	2	1
6	95	430	400	30	50	35	17	6	4	2	0.5
7	64	380	320	23	40	33	13	4	3	1	0.4

esterno	5900	41800	56000	4400	7800	7900	2400	870	670	270	62
---------	------	-------	-------	------	------	------	------	-----	-----	-----	----

8	135	600	508	43	86	65	29	9	5	3	0.5
9	400	780	660	58	104	85	50	9	8	3	1
10	950*	870	910	130	235	100	33	10	8	3	1
11	410*	640	620	80	110	74	27	9	7	3	0.8

*sono mutate le condizioni ed è comparso il Sole

Caratteristiche dei materiali e degli apparecchi illuminanti

L'aula ha il soffitto bianco, le pareti chiare color crema e il pavimento marrone. Per poter valutare le caratteristiche dell'aula, e poter successivamente riprodurre le medesime condizioni ambientali ed il comportamento dell'aula nelle simulazioni col software, sono stati misurati con uno spettroradiometro Minolta CS1000 i coefficienti di riflettanza dei materiali delle superfici più significative (Fig. 5.8-13): soffitto (coefficiente di riflessione 91,6%), pareti (coefficiente di riflessione medio 69,6%), pavimento (coefficiente di riflessione 36,2%), banchi (coefficiente di riflessione 27,6%) e lavagna (coefficiente di riflessione 27,7%), vetro. (coefficiente di trasmissione 81,6%).

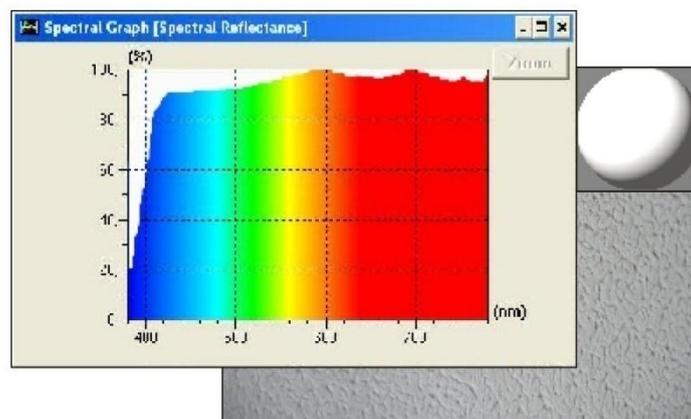


Figura 5.8. Grafico di riflettanza del soffitto, foto, campione del materiale utilizzato in Radiance.
Coefficiente di riflessione: 91,6%

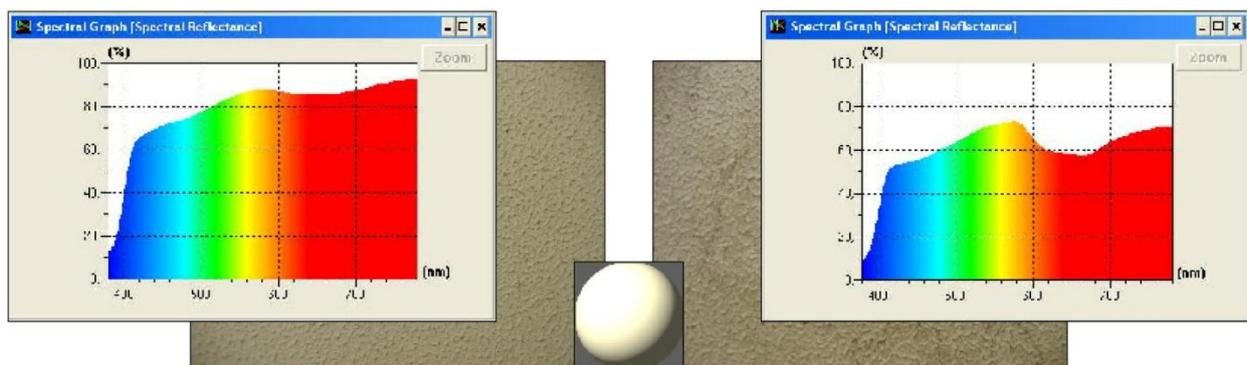


Figura 5.9. Grafico di riflettanza delle pareti pulite (coefficiente di riflessione: 78,9%), foto, campione del materiale utilizzato in Radiance (sinistra); grafico di riflettanza delle pareti sporche (Coefficiente di riflessione: 60,4%), foto, campione del materiale utilizzato in Radiance (destra). Coefficiente di rifl. medio utilizzato: 69,6%

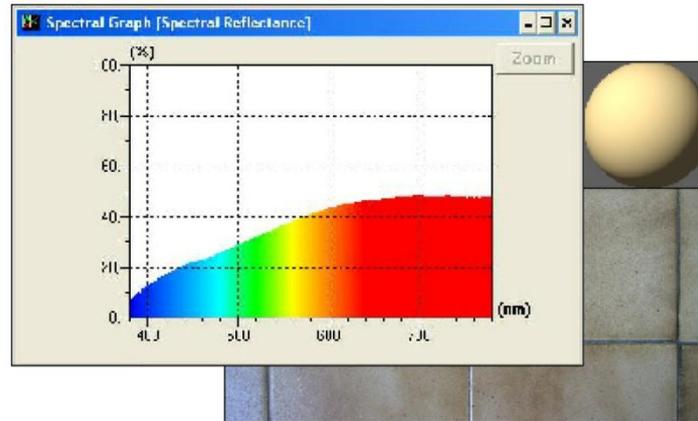


Figura 5.10. Grafico di riflettanza del pavimento, foto, campione del materiale utilizzato in Radiance.
Coefficiente di riflessione: 36,2%

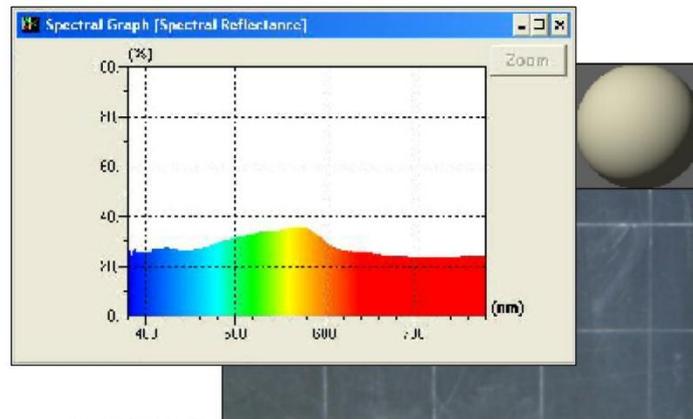


Figura 5.11. Grafico di riflettanza della lavagna, foto, campione del materiale utilizzato in Radiance.
Coefficiente di riflessione: 27,7%

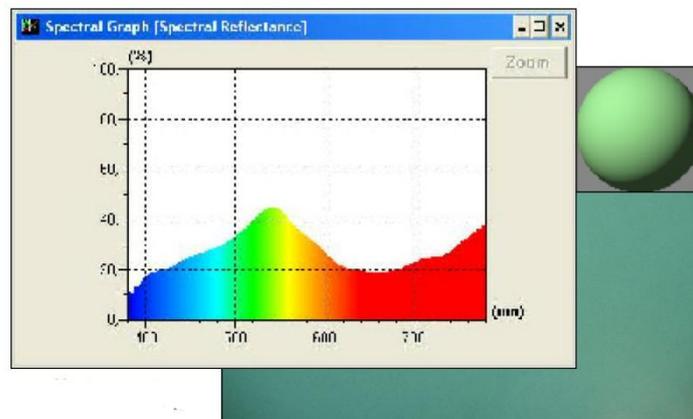


Figura 5.12. Grafico di riflettanza dei banchi, foto, campione del materiale utilizzato in Radiance.
Coefficiente di riflessione: 27,6%

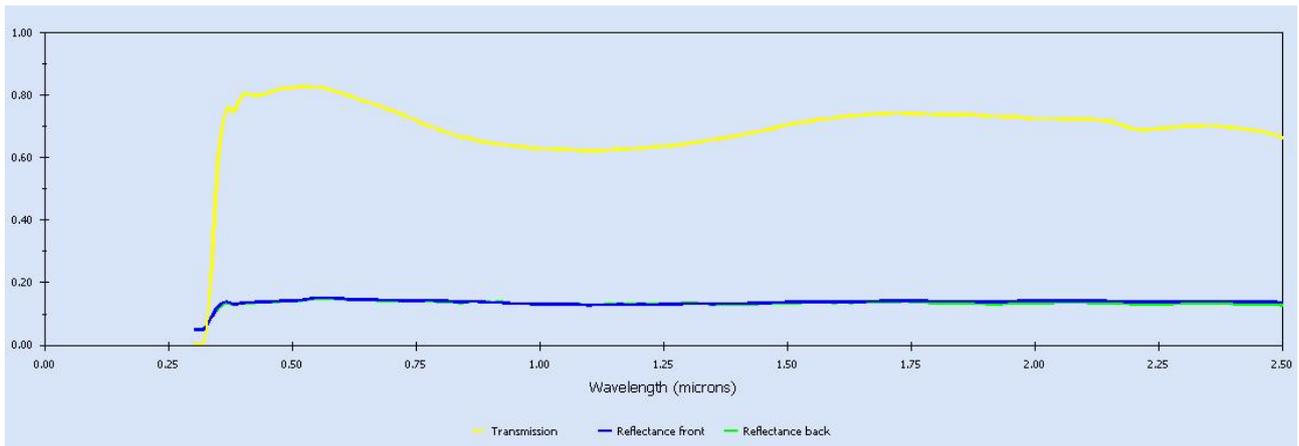
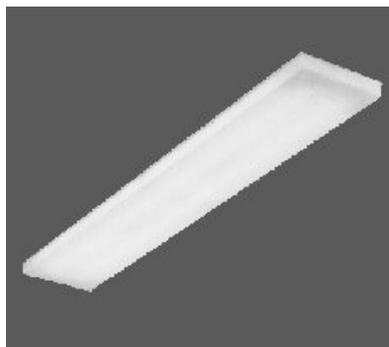


Figura 5.13. Grafico di trasmittanza del vetro.
Coefficiente di trasmittanza: 81.6%

Si è poi passati alla valutazione del sistema di illuminazione artificiale esistente. L'aula presenta quattro apparecchi montati a soffitto, disposti in due file da due apparecchi ognuna parallele alla parete contenente la finestra. Ogni apparecchio è composto da due lampade fluorescenti da 36W racchiuse da un involucro di vetro acrilico opalino traslucido. Non c'è possibilità di regolazione del flusso delle lampade: è presente il solo dispositivo di controllo di accensione/spegnimento. Non sono presenti lampade aggiuntive per illuminare la zona della lavagna (Fig. 5.14-16). I dati riassuntivi principali sono: W/m^2 installati: $7,60W/m^2$, efficienza globale di un apparecchio a piena potenza: $75lm/W$, illuminamento medio, massimo, minimo, e uniformità di illuminamento rispettivamente: 307 lux, 374 lux, 205 lux, $>0,5$.



	<p>Plafoniera per 2 lampade fluorescenti da 36W l'una (flusso luminoso 3350 lm). Involucro bianco termolaccato, involucro di vetro acrilico opalino (traslucido nella massa a causa della diversità degli indici di rifrazione fra vetro e particelle eterogenee). L=1250mm B=250mm H=61mm</p>
	<p>rendimento punto luce: 55% (A41) potenza tot. del sistema: 92W temperatura di colore: 4000K flusso luminoso totale: 6700 lm resa cromatica: 1B (80<Ra<90)</p>

Figura 5.14. Foto e principali caratteristiche tecniche dell'apparecchio

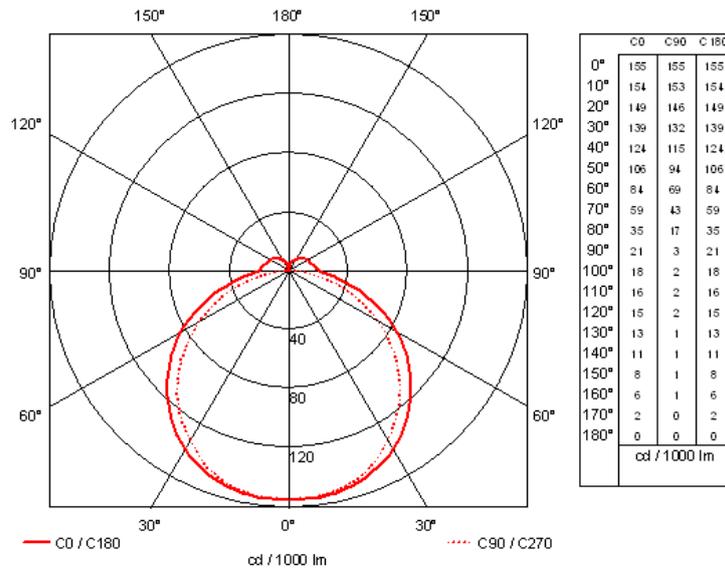


Figura 5.15. Curva fotometrica dell'apparecchio

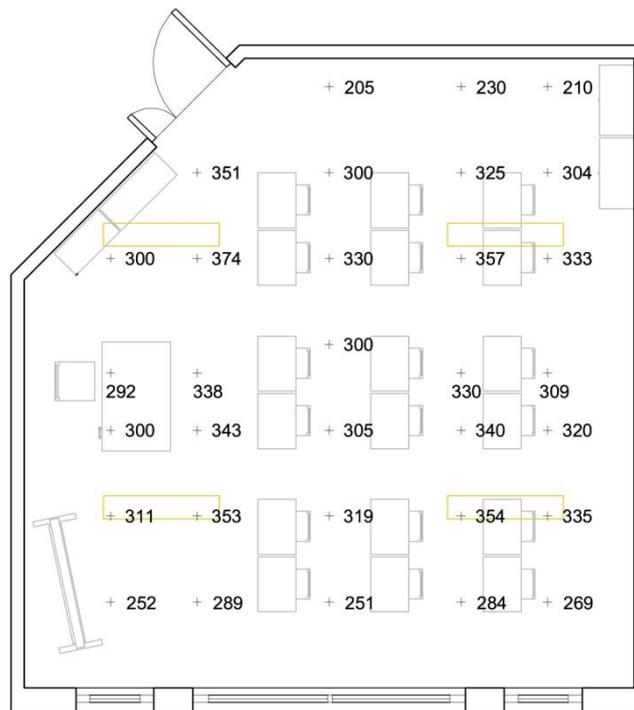


Figura 5.16. Pianta con l'indicazione dei valori di illuminamento sul piano di lavoro prodotti dalla sola illuminazione artificiale (in giallo sono indicati gli apparecchi e la loro disposizione)

Normativa vigente

I valori indicati da normativa, per quel che riguarda l'illuminazione naturale e artificiale che un'aula scolastica deve rispettare sono illustrati nella norma UNI 10840, maggio 2007 riguardante i locali scolastici, della quale si presenta uno stralcio in Tab. 5.2.

Tabella 5.2. Norma UNI 10840 Locali scolastici

UNI 10840 maggio 2007	Locali scolastici criteri generali per l'illuminazione artificiale e naturale			
Tipo di interno, compito o attività	Em [lux]	Ra	hm (%)	Note
Aule scolastiche	300	80	≥3	L'impianto deve consentire la regolazione del flusso luminoso
Lavagna	500	80	-	Evitare riflessioni speculari

Em:illuminamento medio; Ra:resa cromatica; hm:fattore medio di luce diurna

La norma UNI EN 12464-1 dà inoltre indicazione dell'intervallo di valori consigliati per i fattori di riflessione dei principali elementi che compongono i posti di lavoro degli ambienti interni. Uno stralcio di tale norma è riportato in Tab 5.3.

Tabella 5.3. Norma UNI EN 12464-1 Illuminazione dei posti di lavoro in interni

UNI EN 12464-1 ottobre 2004	Illuminazione dei posti di lavoro parte 1: posti di lavoro in interni
Gli intervalli consigliati per i fattori di riflessione delle principali pareti di un locale sono:	
soffitto:	da 0,6 a 0,9
pareti:	da 0,3 a 0,8
pavimento:	da 0,1 a 0,5
piani di lavoro:	da 0,2 a 0,6

Per quanto riguarda i valori di luminanza, si è assunto che valori accettabili devono essere inferiori a 3000 cd/m^2 , mentre accettabili contrasti di luminanza nell'intero campo visivo devono risultare inferiori a 1:30.

Verifica dell'adeguatezza dei coefficienti di riflettanza e dell'illuminazione artificiale

Ad una prima analisi, l'aula risulta avere un sufficiente quantitativo di luce naturale. I valori dei coefficienti di riflettanza delle superfici dei vari elementi sono entro gli intervalli consigliati dalla norma, e forniscono quindi una buona distribuzione di luce e un giusto ammontare di luce riflessa,

contribuendo a ridurre il consumo di elettricità, e pertanto non c'è necessità di cambiarli (né nel colore né nella finitura superficiale).

Il sistema di illuminazione artificiale rispetta i valori imposti da normativa (l'illuminamento medio sul piano di lavoro è 307 lux), distribuisce in modo uniforme il flusso all'interno dell'ambiente e non causa abbagliamento. Quindi anche il sistema di illuminazione artificiale presente è efficiente e non va cambiato.

Nonostante una prima rispondenza a tutti i requisiti imposti dalla normativa, sul posto sono stati riscontrati problemi causati dalla luce diurna, come l'abbagliamento (i bambini si sono lamentati del Sole nelle ore centrali del giorno); in più, la disposizione e la grandezza delle finestre lasciano supporre possibili problemi di surriscaldamento in particolare nel periodo estivo.

Si ritiene pertanto necessario un ulteriore miglioramento delle condizioni ambientali raggiungibile attraverso l'impiego di sistemi di daylighting, in grado di risolvere i problemi precedentemente detti. Per migliorare poi le condizioni relative al risparmio energetico, il sistema di illuminazione artificiale deve essere fornito di sensori della luce del giorno e rivelatori di presenza.

Simulazioni software e problemi riscontrati

Una più approfondita conoscenza dei problemi derivanti dalla luce del giorno e della sua distribuzione in ambiente (fondamentale per applicare lo PSALI), ha reso necessario conoscere le condizioni di illuminamento e la distribuzione di luminanza nell'aula anche per altre ore e giorni cruciali (ad es. equinozi e solstizi).

Grazie a simulazioni fatte nelle stesse ore e condizioni delle misurazioni, è stata verificata l'attendibilità del software in termini di resa qualitativa, cioè foto realistica, dei render prodotti, e soprattutto quantitativa, cioè l'esattezza dei risultati fotometrici ottenuti. Ciò ha permesso di poter ricreare attraverso il software tutte le altre condizioni di illuminamento e luminanza indispensabili per conoscere il comportamento della luce del giorno durante l'anno (Fig. 5.17-19).

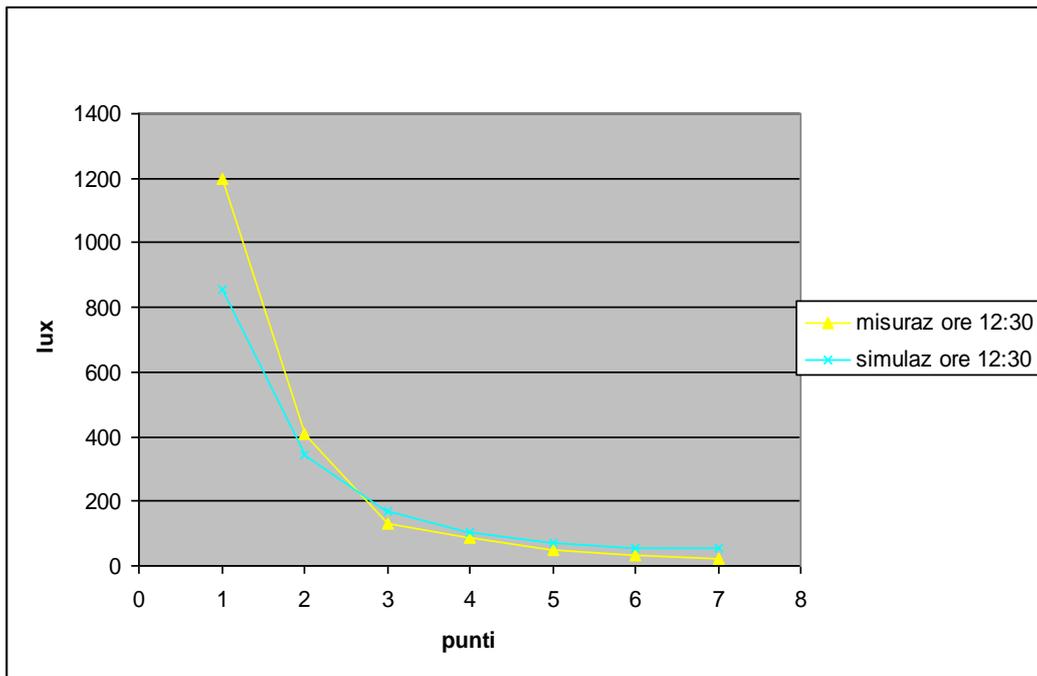


Figura 5.17. Grafico di confronto tra misurazioni effettuate in ambiente e simulazioni eseguite col software alle ore 12:30 per i punti 1-7

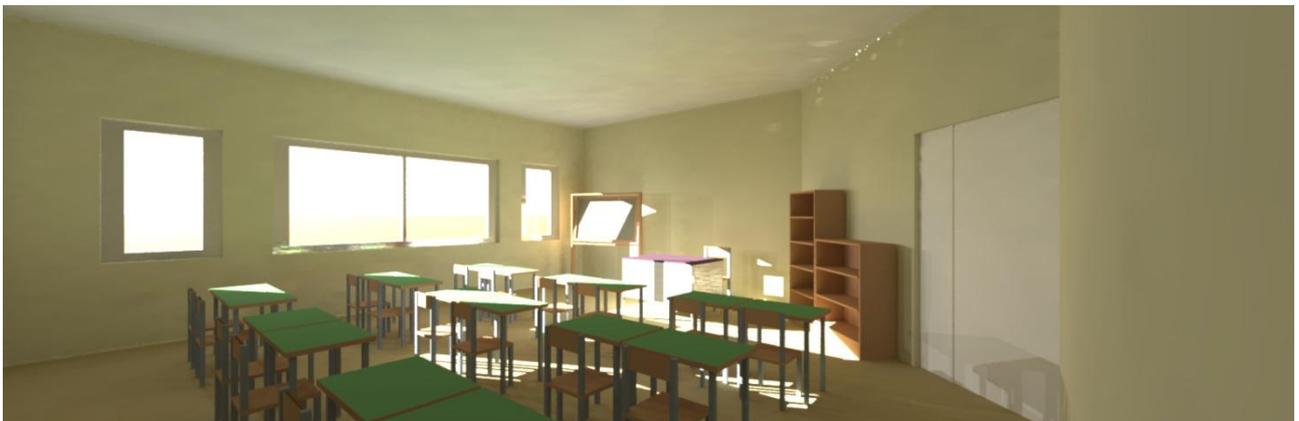


Figura 5.18. Simulazione della luce naturale nell'aula col software Radiance

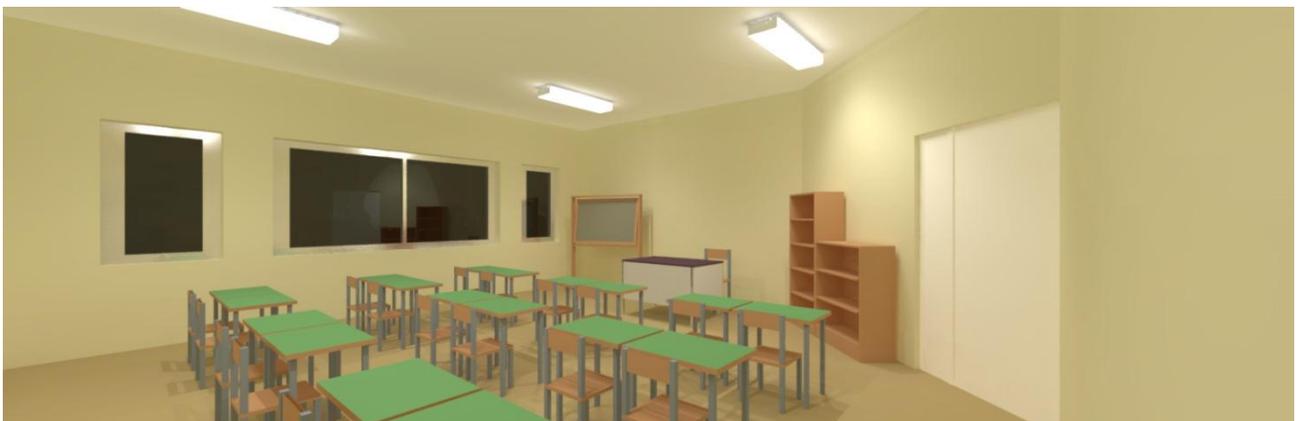


Figura 5.19. Simulazione della sola luce artificiale nell'aula col software Radiance

Attraverso simulazioni effettuate col software Radiance, si sono studiate le condizioni di illuminamento e luminanza a cui è sottoposta l'aula durante tutto l'anno, individuando eventuali problemi o carenze presenti. Le simulazioni sono state fatte per i giorni:

- 21 Dicembre, alle ore 8, 12, 16;
- 21 Marzo nelle ore 8, 12, 17;
- 21 Giugno nelle ore 8, 12, 18.

Ogni giorno e ogni ora sono stati simulati sia per condizioni di cielo sereno che per condizioni di cielo coperto CIE. I problemi riscontrati dall'osservazione delle simulazioni sono:

- in condizioni di cielo sereno
 - frequente presenza di valori di luminanza e contrasti di luminanza elevati, tali da causare abbagliamento (luminanze oltre le 3000 cd/m^2 e contrasti maggiori di 1:30)
 - valori di illuminamento mediamente discreti, anche se spesso insufficienti nella parte dell'ambiente più lontana dalla finestra
- in condizioni di cielo coperto
 - assenza di luminanze tanto elevate da causare abbagliamento (sono tutte sotto le 3000 cd/m^2); in nessun periodo dell'anno si verifica abbagliamento dovuto a contrasti di luminanza elevati (maggiori di 1:30)
 - valori di illuminamento inadeguati o sufficienti solo nelle immediate vicinanze della finestra

Per semplicità si riportano solo alcune delle simulazioni che rendono più immediata la comprensione dei problemi legati alla luce diurna (Fig. 5.20-25).



Figura 5.20. 21 Dicembre Cielo Sereno ore 12 Illuminamento

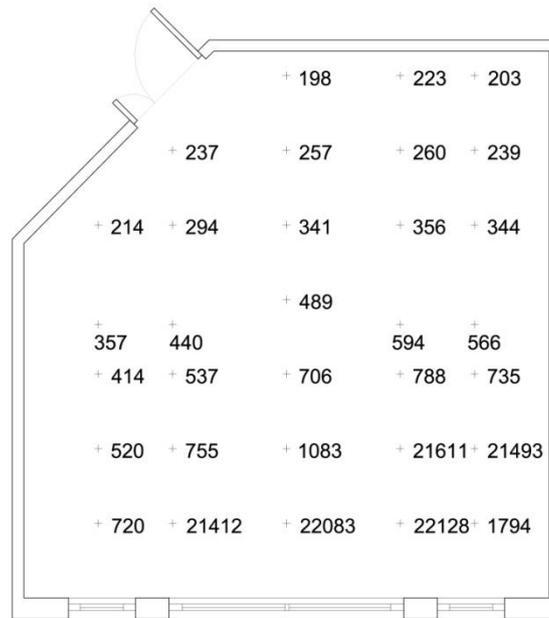


Figura 5.21. 21 Dicembre Cielo Sereno ore 12 Illuminamento sul piano di lavoro

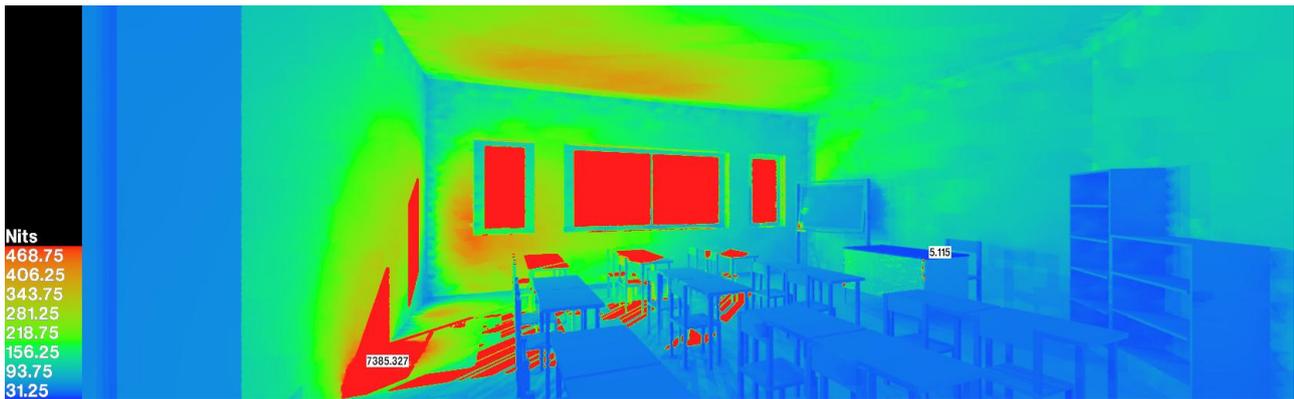


Figura 5.22. 21 Dicembre Cielo Sereno ore 12 Luminanza



Figura 5.23. 21 Giugno Cielo Sereno ore 12 Illuminamento

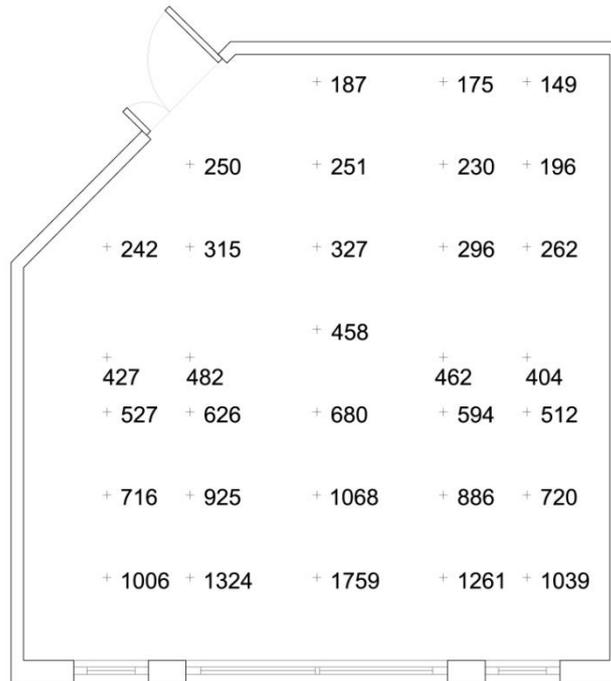


Figura 5.24. 21 Giugno Cielo Sereno ore 12 Illuminamento sul piano di lavoro

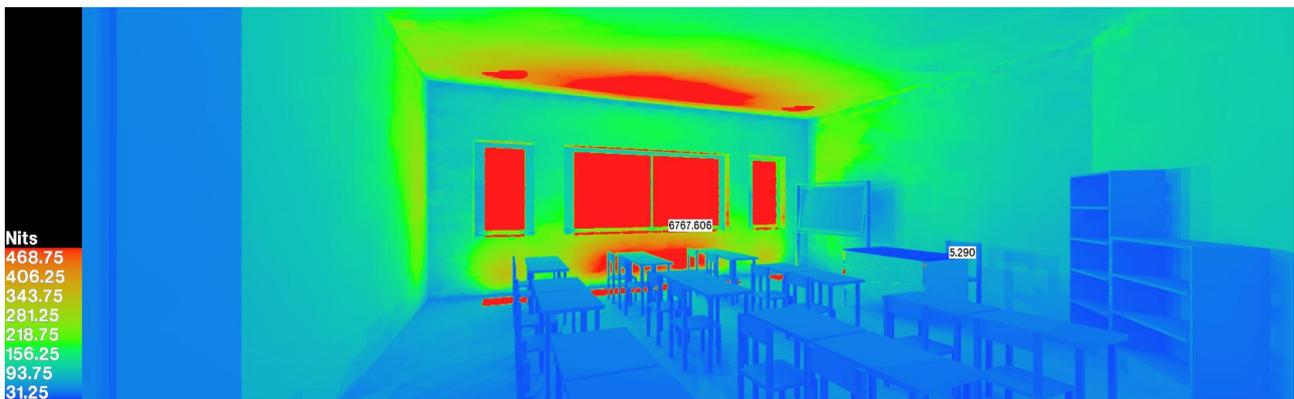


Figura 5.25. 21 Giugno Cielo Sereno ore 12 Luminanza

Iter e soluzioni progettuali, applicazione dello PSALI

L'individuazione dei problemi ha permesso di determinare le caratteristiche che il sistema di daylighting da applicare deve avere affinché si abbia un miglioramento delle condizioni. Ideale sarebbe usare un sistema che:

- protegga dall'abbagliamento (specie nelle immediate vicinanze della finestra)
- ridirezioni la luce in profondità (profondità piuttosto elevate)
- mantenga la vista verso l'esterno

Ciò porterebbe ad un abbassamento degli elevati livelli di illuminamento nei pressi della finestra, ad un loro aumento nel fondo della stanza, ed in generale ad un illuminamento più uniforme.

La scelta dei sistemi di daylighting più adatti da applicare tra i molteplici esistenti è stata fatta inizialmente sulla base di un **criterio qualitativo**: i possibili sistemi da applicare sono stati individuati grazie alle funzioni e alle caratteristiche presenti per ognuno, secondo quanto già mostrato nelle tavole di classificazione (Cap. 1), ed indicato nelle linee guida. Nel caso specifico, i sistemi scelti sono: light-shelf trattato otticamente e schermature che guidano la luce.

La scelta definitiva del sistema da utilizzare, tra quelli determinati, è stata poi dettata da un **criterio quantitativo**, formulato secondo delle ipotesi che vedono assegnati alle varie prestazioni nelle tavole di classificazione pesi diversi a seconda della destinazione d'uso dell'ambiente. Il sistema con il punteggio più alto sarà quello che verrà applicato all'ambiente (Fig. 5.26).

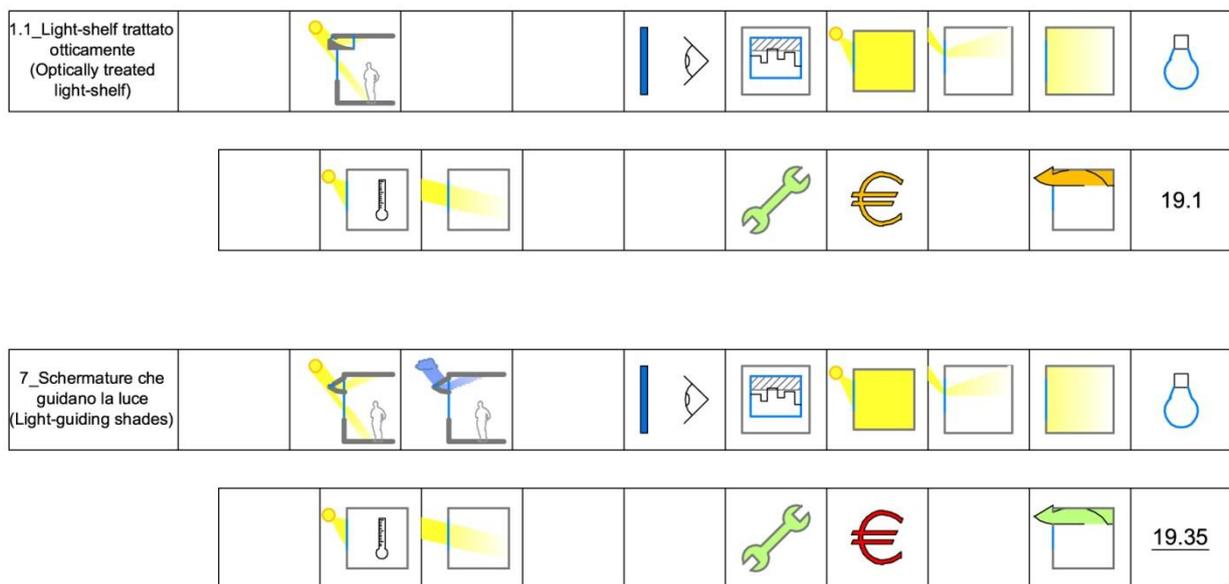


Figura 5.26. Scelta quantitativa del sistema tra le due opzioni precedentemente selezionate tramite criterio qualitativo

L'applicazione del criterio quantitativo ai sistemi selezionati ha portato pertanto alla scelta delle schermature che guidano la luce come sistema da applicare (Fig. 5.27). Come mostrato in Fig. 5.28-31, il sistema applicato fa aumentare i livelli di illuminamento in profondità nella stanza e li diminuisce nelle vicinanze della finestra, rendendoli più uniformi e risolvendo allo stesso tempo il problema dell'abbagliamento.

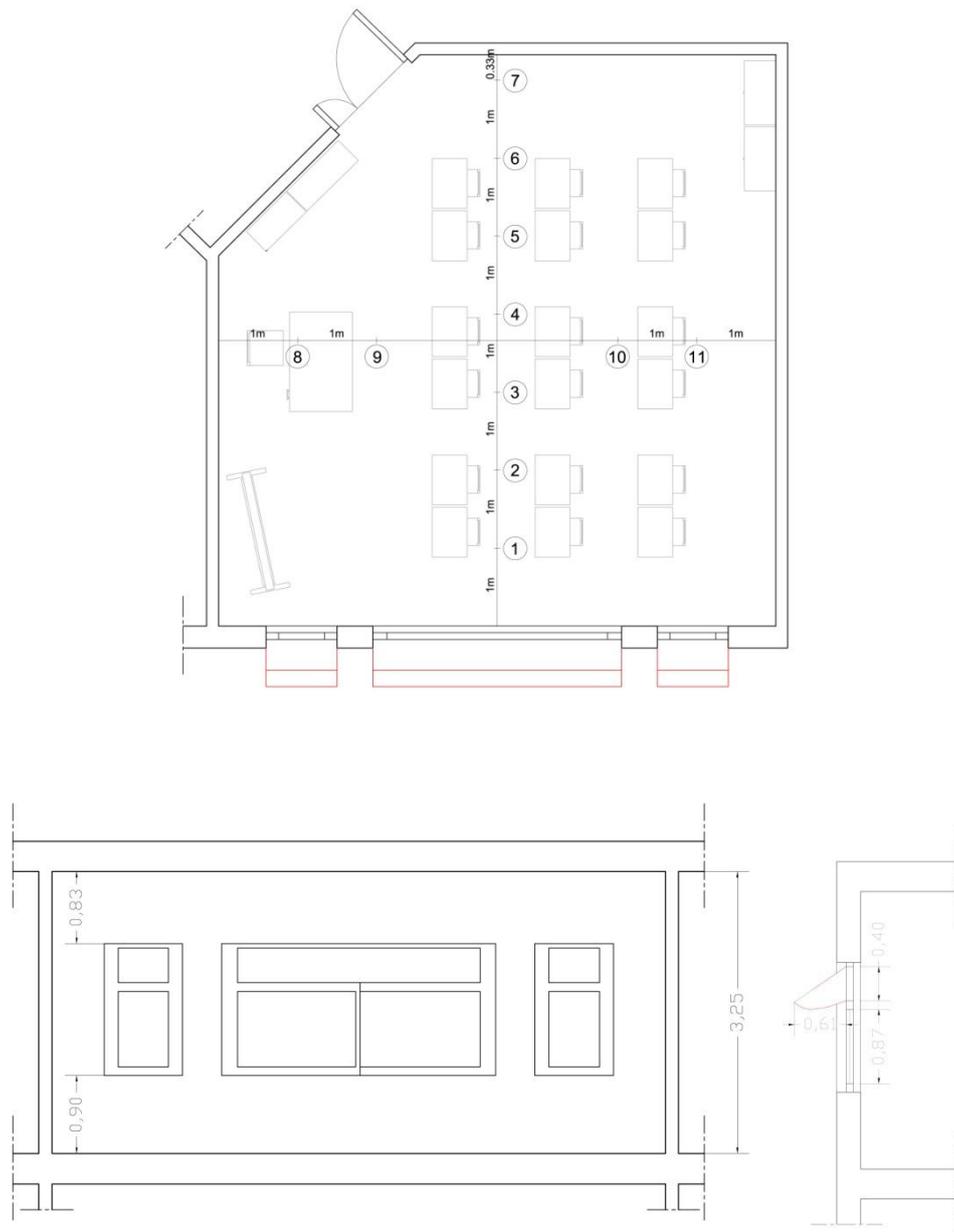


Figura 5.27. Illustrazione dell'applicazione del sistema di daylighting in pianta, sezione e sezione trasversale della parete esterna



Figura 5.28. 21 Giugno Cielo Sereno ore 12: valori di illuminamento in presenza del sistema di daylighting

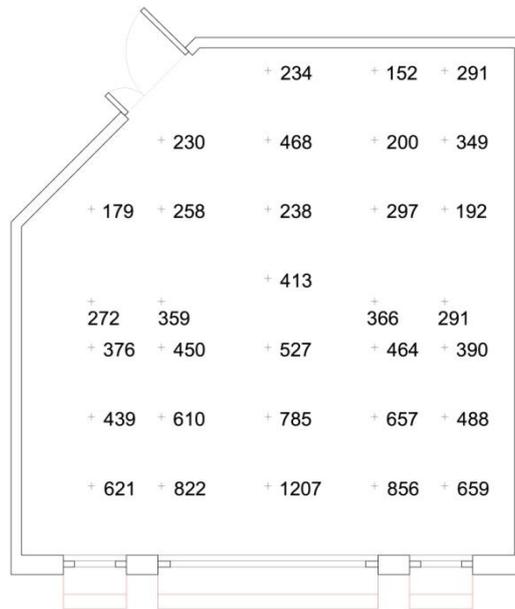


Figura 5.29. 21 Giugno Cielo Sereno ore 12: valori di illuminamento sul piano di lavoro in presenza del sistema di daylighting



Figura 5.30. 21 Giugno Cielo Sereno ore 12: valori di luminanza in presenza del sistema di daylighting





Figura 5.31. Confronto delle simulazioni dell'aula senza (in alto) e con sistema di daylighting (in basso). La luce diurna, che senza il sistema produce abbagliamento nella zona immediatamente vicina la finestra, viene ridirezionata al soffitto e in profondità nella stanza dal sistema. Si risolve così il problema dell'abbagliamento uniformando allo stesso tempo la distribuzione di luce nello spazio e dell'illuminamento sul piano di lavoro

Per poter applicare il sistema PSALI all'ambiente così modificato dall'inserimento del sistema di daylighting, è stato necessario individuare il limite massimo e minimo di penetrazione della luce diurna in ambiente. Il 21 Giugno alle ore 12 in condizioni di cielo sereno si verifica il limite massimo di penetrazione della luce diurna, mentre il 21 Dicembre alle ore 8 in condizioni di cielo coperto il limite minimo.

I limiti massimi e minimi di penetrazione della luce diurna individuati consentono di suddividere l'ambiente in zone per avere la possibilità di trovare un buon bilanciamento tra la luce del giorno e quella elettrica (PSALI). Nell'applicazione dello PSALI, le luci artificiali vengono dimmerate in base alla disponibilità di luce diurna consentendo di risparmiare energia elettrica pur raggiungendo i valori di illuminamento richiesti dalla normativa e uniformando la distribuzione di luce nell'ambiente. Di seguito, per aiutare la comprensione del funzionamento, è illustrato un esempio di applicazione per la situazione di limite massimo di penetrazione della luce diurna con PSALI (Fig. 5.32-34).



Figura 5.32. 21 Giugno Cielo Sereno ore 12, limite massimo di penetrazione della luce diurna: valori di illuminamento in presenza dei sistemi di daylighting e PSALI



Figura 5.33. 21 Giugno Cielo Sereno ore 12, limite massimo di penetrazione della luce diurna: valori di illuminamento sul piano di lavoro in presenza dei sistemi di daylighting e PSALI



Figura 5.34. 21 Giugno Cielo Sereno ore 12, limite massimo di penetrazione della luce diurna: valori di luminanza in presenza dei sistemi di daylighting e PSALI

Il sistema PSALI è stato applicato e verificato anche nella condizione di limite minimo di penetrazione della luce diurna e in un caso di penetrazione della luce diurna a metà tra il limite massimo e minimo.

Riduzione delle potenze impegnate grazie all'uso dello P.S.A.L.I.

Il calcolo delle potenze impegnate utilizzando lo PSALI nei vari casi al posto di un normale sistema di illuminazione artificiale o di un sistema di illuminazione artificiale dotato di un dispositivo

dimmer classico, dà idea dei possibili risparmi energetici che si possono ottenere attraverso l'uso di questo sistema.

- potenza impegnata per il sistema di luci artificiali a **pieno regime**: 368W, 26800 lm
- potenza impegnata per il **limite massimo di penetrazione** della luce diurna:
 - con tutte le lampade dimmerate allo stesso modo (30%): 110W, 2010 lm (**riduzione 70%**)
 - con le lampade dimmerate secondo le reali necessità (PSALI) (20% lampada sx zona muro, 30% lampada dx zona muro; 0% lampade zona finestra): 46W, 3350 lm (**riduzione 87%**)
- potenza impegnata per il **limite minimo di penetrazione** della luce diurna:
 - con tutte le lampade dimmerate allo stesso modo(100%): 368W, 26800 lm (riduzione 0%)
 - con le lampade dimmerate secondo le reali necessità (PSALI) (100% lampade zona muro; 90% lampade zona finestra): 350W, 25460 lm (riduzione 5%)
- potenza impegnata per una **situazione intermedia di penetrazione** della luce diurna:
 - con tutte le lampade dimmerate allo stesso modo (65%): 239W, 17420 lm (**riduzione 35%**)
 - con le lampade dimmerate secondo le reali necessità (PSALI) (65% lampade zona muro, 10% lampade zona finestra): 138W, 10050 lm (**riduzione 62%**).

Capitolo V

Attività svolte in ambito IEA

Da luglio 2004 fino a Dicembre 2008, e successivamente con proroga fino a Dicembre 2009, il gruppo ha partecipato attivamente all'Annex 45 della IEA (International Energy Agency) organizzato dall'ECBCS (Energy Conservation in Buildings and Community Systems) dal titolo "Energy Efficient Electric Lighting for Buildings", rappresentando assieme all'ENEA il contatto chiave per l'Italia.

Nell'ambito di questo Annex, è stato portato avanti un intenso lavoro di raccolta informazioni, di ricerca e di misura, testimoniati dalla presenza di paragrafi e capitoli all'interno del Guidebook on Energy Efficient Electric Lighting for Buildings, edito dalla Prof. Liisa Halonen (Operating Agent dell'Annex) e dal Dr. Eino Tetri, (Helsinki University of Technology, HUT) risultato dei 4 anni di lavoro da parte del gruppo di lavoro internazionale. In particolare:

- 5.2.2 Filament lamps, pag. 100 (Simonetta Fumagalli, ENEA TER ENESIST and Fabio Bisegna, Dipartimento di Fisica Tecnica, Università di Roma "Sapienza")
- 5.2.3 Fluorescent lamps, pag. 103 (Simonetta Fumagalli, ENEA TER ENESIST and Fabio Bisegna, Dipartimento di Fisica Tecnica, Università di Roma "Sapienza")
- 5.4.3 Lighting design aspects, pag. 145 (Franco Gugliermetti, Fabio Bisegna, Università di Roma "La Sapienza", Italy)
- 8.11 Electric lighting for classrooms, pag. 294 (Truus de Bruin-Hordijk, Arnaud Deneyer and Fabio Bisegna)

Il gruppo ha partecipato attivamente a gran parte dei Meeting che sono stati organizzati dall'Annex, e si è fatto carico dell'organizzazione di uno di questi a Roma, nelle sedi dell'ENEA e della Facoltà di Architettura "L. Quaroni", dove si è anche organizzato e svolto un Workshop Internazionale dal titolo "VISUAL QUALITY AND ENERGY EFFICIENCY IN INDOOR LIGHTING: TODAY FOR TOMORROW".

Nell'anno di attività finanziata, sono stati prodotti o sono in via di realizzazione, ovvero ancora in via di accettazione diversi articoli destinati alla pubblicazione su riviste scientifiche e in congressi nazionali o internazionali. Considerazione a parte merita la pubblicazione dei Proceedings del Workshop "VISUAL QUALITY AND ENERGY EFFICIENCY IN INDOOR LIGHTING: TODAY FOR TOMORROW" organizzato a Roma in occasione del 7 Expert Meeting dell'Annex 45, ospitato dalla Facoltà di Architettura "L. Quaroni" e dall'ENEA.

Di seguito, si riportano esclusivamente gli articoli ad oggi già pubblicati o comunque accettati per la pubblicazione:

1. F. Gugliermetti, F. Bisegna (2008)
“Sistemi finestra dinamici, semi-dinamici e statici per ambienti confortevoli” (Parte I)
Condizionamento Dell’Aria (CDA), Sezione Ricerca, Luglio 2008 (parte prima).
2. F. Gugliermetti, F. Bisegna (2008)
“Sistemi finestra dinamici, semi-dinamici e statici per ambienti confortevoli” (Parte II)
Condizionamento Dell’Aria (CDA), Sezione Ricerca, Settembre 2008 (parte seconda).
3. F. Bisegna, S. Fumagalli (2008)
Proceedings of the International Workshop and 7th IEA Annex 45 Expert Meeting: “Visual Quality and Energy Efficiency in Indoor Lighting: Today for Tomorrow”
ISBN: 978-88-548-1673-2. ROMA: ARACNE (ITALY).
4. F. Bisegna, P. Gori (2008)
“Genetic Algorithms for Lighting Design Optimisation”
Proc. Int. WORKSHOP and 7th IEA ANNEX 45 Expert Meeting “Visual Quality and Energy Efficiency in Indoor Lighting: Today for Tomorrow”, Rome, 31 March 2008, ISBN/ISSN: 978-88-548-1673-2, ARACNE (ITALY).
5. F. Gugliermetti, F. Bisegna, L. Monti (2008)
“Energy Efficient Buildings by Energy Efficient Lighting: the Role of New Systems and Materials”
COBEE, The First Int. Conf. on Building Energy and Environment, Dalian (China), July 13-16, 2008.
6. F. Gugliermetti, F. Bisegna, S. Ferri (2009)
“Sustainable lighting design by hybrid solutions in industrial places”
CIE Midterm Light and Lighting Conference, Budapest, Ungheria, May 27-29, 2009
7. Truus de Bruin-Hordijk and Fabio Bisegna (2009)
“Lighting in classrooms european case studies”
Experiencing Light 2009 Conference, Eindhoven, Olanda, October 26-27, 2009
8. F. Gugliermetti, F. Bisegna, L. Monti (2009)
“Integrated and cooperative systems to support natural lighting in non residential buildings”
Lux Europa 2009, Istanbul, Turchia, September 9-11, 2009