



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

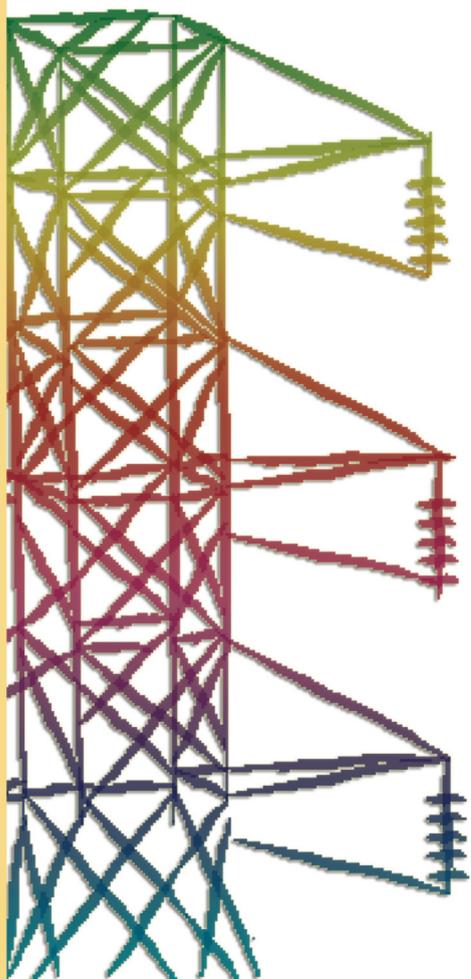


Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Integrazione luce naturale/luce artificiale in ambito industriale **Parte 2: Analisi delle possibili tecniche, componenti e regolazioni** **per l'illuminazione artificiale/naturale**

Franco Gugliermetti, Fabio Bisegna





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



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Integrazione luce naturale/luce artificiale in ambito industriale Parte 2: Analisi delle possibili tecniche, componenti e regolazioni per l'illuminazione artificiale/naturale

Franco Gugliermetti, Fabio Bisegna

INTEGRAZIONE LUCE NATURALE/LUCE ARTIFICIALE IN AMBITO INDUSTRIALE
PARTE 2: ANALISI DELLE POSSIBILI TECNICHE, COMPONENTI E REGOLAZIONI PER
L'ILLUMINAZIONE ARTIFICIALE/NATURALE

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

Aprile 2009

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Usi finali

Tema: Promozione delle tecnologie elettriche innovative negli usi finali

Responsabile Tema: Ennio Ferrero, ENEA

Sommario

La presente relazione riporta i risultati della ricerca su diversi argomenti. La relazione è stata suddivisa in 6 parti (e files), corrispondenti ai capitoli.

Parte 1. Analisi dell'ambiente luminoso del capannone AleniaAermacchi

L'analisi è riferita al caso studio nella sua struttura generale, con particolare attenzione all'aspetto dell'illuminazione naturale. I valori di illuminamento e fattore di luce diurna sono studiati tramite simulazioni.

Parte 2. Analisi delle possibili tecniche, componenti e regolazioni per l'illuminazione artificiale/naturale

Stato dell'arte sul controllo dell'illuminazione naturale: le funzioni da svolgere, i sistemi di illuminazione diurna ovvero componenti schermanti opache o trasparenti innovativi. Il sistema di illuminazione artificiale: stato dell'arte sulle sorgenti, gli apparecchi, i sistemi di controllo e integrazione con la luce naturale. Aspetti di progettazione architettonica delle applicazioni integrate.

Parte 3. Simulazioni numeriche delle possibili soluzioni per il capannone AleniaAermacchi

Analisi dell'ambiente luminoso del caso studio simulando diverse disposizioni / aree delle superfici finestrate.

Parte 4. Linee guida per la progettazione di interni con presenza di illuminazione naturale e progettazione di massima

Riferite a illuminazione in interni con presenza di illuminazione naturale. Indicazioni per individuare le migliori soluzioni per una progettazione efficiente ed efficace della luce artificiale, che ben si integri con il contributo di luce naturale

Parte 5. Protocolli di monitoraggio

Riferite alla verifica del soddisfacimento dei requisiti normativi, laddove presenti, in funzione delle grandezze fotometriche (illuminamenti, luminanze, colore della radiazione luminosa...) sulle diverse superfici presenti all'interno di uno spazio confinato, da cui si ricavano indici quali valori medi, fattori di luce diurna, coefficienti di uniformità, indici di abbagliamento...

Parte 6. Tecniche di modellazione avanzate e tradizionali per l'analisi dell'ambiente visivo in presenza di sistemi tradizionali e innovativi

Sono presentati metodi di calcolo manuali, i modelli in scala e alcuni software di calcolo computerizzato, evidenziandone le diverse caratteristiche a confronto.

**ATTIVITA' DI RICERCA:
INTEGRAZIONE LUCE NATURALE / ARTIFICIALE
IN AMBITO INDUSTRIALE**

Nell'ambito del Tema di ricerca 5.4.3.1
*"Promozione delle tecnologie elettriche innovative negli usi finali",
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

PARTE 2

Roma, Aprile 2009

CONTENUTI

CAPITOLO 2. ANALISI DELLE POSSIBILI TECNICHE, COMPONENTI E REGOLAZIONI PER LA ILLUMINAZIONE NATURALE/ARTIFICIALE	3
LE SORGENTI DI LUCE ARTIFICIALE	15
GLI APPARECCHI ILLUMINANTI.....	18
SISTEMI PSALI E HSL	19
<i>Applicazione</i>	<i>19</i>
<i>Stima della profondità della zona di luce diurna e della zona PSALI per spazi illuminati lateralmente</i>	<i>19</i>
<i>Principi base.....</i>	<i>20</i>
<i>Progettazione delle finestre e abbagliamento nelle installazioni integrate</i>	<i>21</i>
<i>Scelta delle sorgenti di luce artificiale.....</i>	<i>22</i>
<i>Colore delle decorazioni interne con lo PSALI.....</i>	<i>23</i>
<i>Scelta dei sistemi per l'illuminazione supplementare</i>	<i>24</i>

Capitolo 2. Analisi delle possibili tecniche, componenti e regolazioni per la illuminazione naturale/artificiale

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. 2.1.

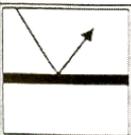
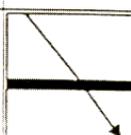
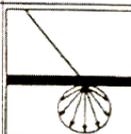
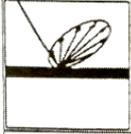
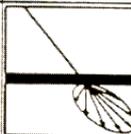
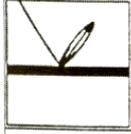
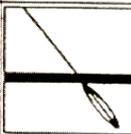
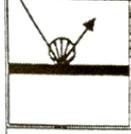
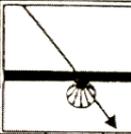
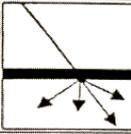
RIFLESSIONE		TRASMISSIONE
	<p>S P E SPECULARE $\delta = 0^\circ$</p>	
	<p>D I F DIFFUSO $45^\circ < \delta < 60^\circ$</p>	
	<p>S C A W SEMI DIFFUSO A FASCIO LARGO $15^\circ < \delta < 45^\circ$</p>	
	<p>S C A N SEMI DIFFUSO A FASCIO STRETTO $0^\circ < \delta < 15^\circ$</p>	
	<p>D I F + S P E DIFFUSO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

Figura 2.1. 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. 2.2 mostra le diverse tipologie di materiali trasparenti attualmente presenti in commercio o in fase di pre-commercializzazione.

CLASSIFICAZIONE DEI COMPONENTI

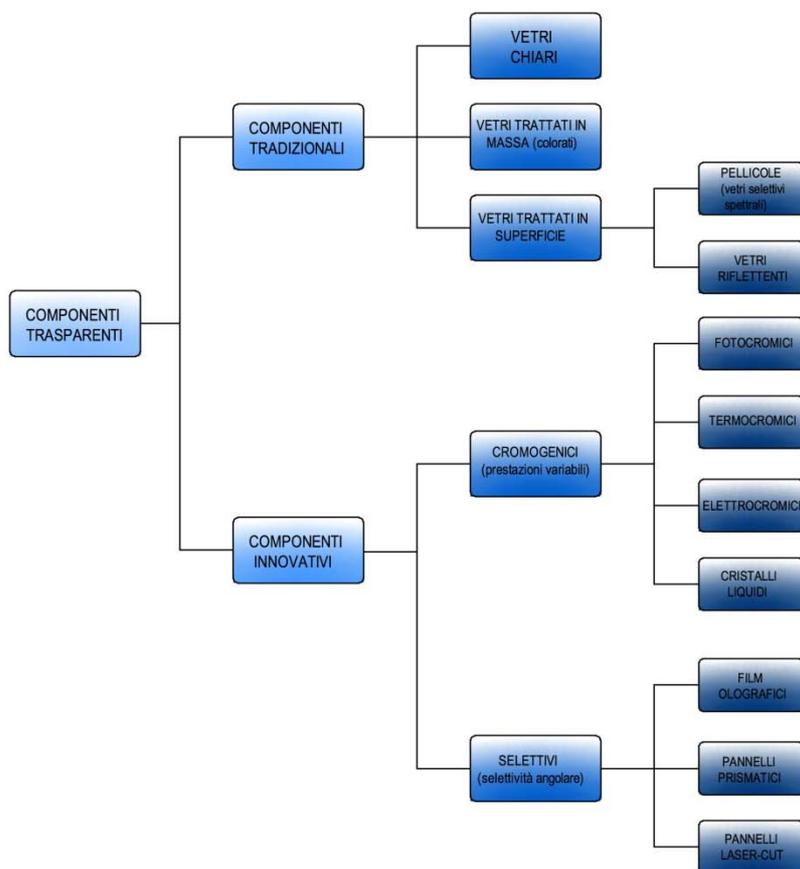


Figura 2.2. Classificazione dei materiali trasparenti.

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):
 - o 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
- o 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):
- o 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
- o svantaggi:
 - possibile limitazione della vista verso l'esterno dell'edificio (per alcune tipologie)
- schermi esterni/interni (fissi o mobili)
- o 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)
- o possibilità di arricchire esteticamente il prospetto dell'edificio
- o 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):
- o 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
 - o 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
 - o 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
 - o 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
 - o vantaggi:
 - possono variare la loro posizione nel corso della giornata e delle diverse stagioni
 - o 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
 - o vantaggi:
 - ridirezionamento della luce verso le zone volute, caratterizzate altrimenti da bassi livelli di illuminamento
 - o 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
 - o vantaggi:
 - illuminazione uniformemente distribuita all'interno degli ambienti
 - o 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:

$$FL = \frac{\Phi_{\text{lu min oso incidente sulla vetrata con schermo}}}{\Phi_{\text{lu min oso incidente sulla vetrata senza schermo}}}$$

- 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. 2.1:

Tabella 2.1. 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. 2.3 mostra le diverse tipologie di materiali schermanti attualmente presenti in commercio o in fase di pre-commercializzazione.

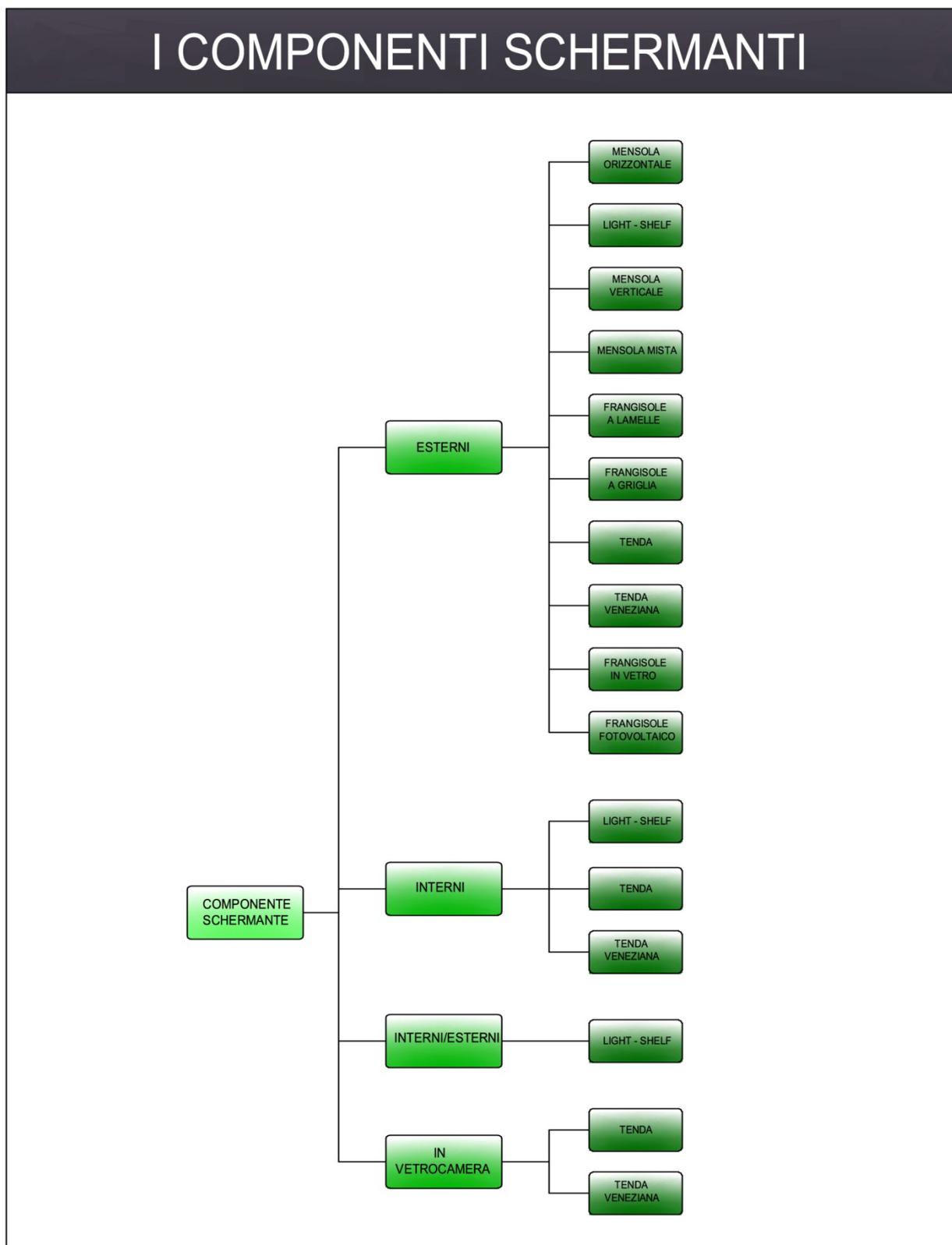


Figura 2.3. Classificazione dei componenti schermanti.

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.

Le sorgenti di luce artificiale

La scelta di una lampada adatta ad una specifica applicazione in fase di progettazione è complessa, essendo molti i parametri sulla base dei quali effettuare la scelta: tensione di alimentazione, potenza elettrica, flusso luminoso, efficienza luminosa, durata, consumi e risparmio energetico, indice di resa cromatica, temperatura di colore, comfort e miniaturizzazione. Tutti questi parametri influiscono sul tipo di attività svolta, sull'estetica del progetto, sugli oggetti che si vogliono evidenziare, sul benessere visivo; a tutto ciò va poi aggiunta la valutazione dell'impatto economico e ambientale. In Fig. 2.4 viene riportata una sintetica classificazione e di seguito una sommaria descrizione delle principali sorgenti di luce artificiale.

CLASSIFICAZIONE DELLE SORGENTI ILLUMINANTI ARTIFICIALI

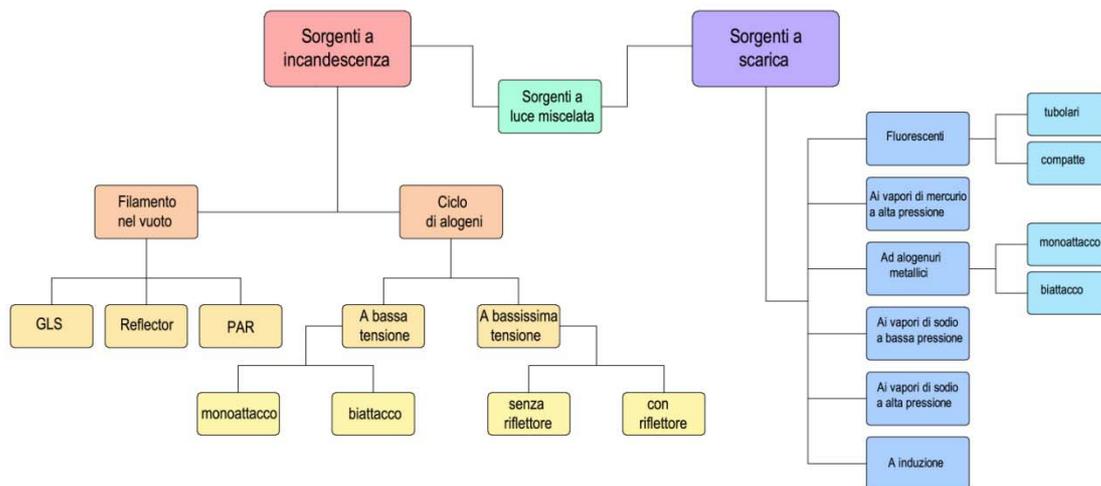


Figura 2.4. Classificazione delle sorgenti artificiali.

Le lampade ad incandescenza, il cui principio di funzionamento si basa sull'emissione per temperatura, rappresentano il tipo più comune di sorgente luminosa. Le più comuni lampade ad incandescenza sono del tipo GLS (General Lighting Service), ma esistono anche lampade ad incandescenza con riflettore incorporato per direzionare la luce (Reflector) e PAR (Parabolic aluminized reflector) che coniugano la possibilità di illuminazione direzionale e una grande robustezza della lampada. L'evoluzione della lampada ad incandescenza ha portato alla realizzazione della lampada alogena, che si distingue per alcune fondamentali caratteristiche: dimensioni ridotte, l'alta qualità cromatica possibilità di regolazione. Tali lampade si dividono in due categorie: "bassa tensione" (230v) e "bassissima tensione" (12v). Un'ulteriore evoluzione è rappresentata dalle lampade alogene "dicriche", caratterizzate dalla presenza di uno schermo interno che riflette solo la luce visibile lasciando disperdere i raggi infrarossi.

Le lampade a scarica sono invece un tipo di sorgente luminosa artificiale basata sulla luminescenza, fenomeno tipico di alcune sostanze che sono in grado di riemettere sotto forma di radiazione elettromagnetica una parte dell'energia che hanno assorbito. Tra le lampade a scarica si possono distinguere due famiglie principali, differenti dal tipo di metallo usato: lampade a vapori di mercurio e lampade a vapori di sodio. Tra queste due famiglie la differenza sta nel fatto che la luce generata presenta dominanti di colore differenti: quelle al mercurio producono una luce bianca con dominante verdognola, mentre per quelle al sodio la dominante è gialla. Per entrambe le famiglie, esistono realizzazioni a bassa e alta pressione.

Una menzione a parte meritano:

- le lampade ad alogenuri metallici, lampade al mercurio con l'aggiunta di sali di diversi alogeni, fatto che permette di aggiungere diverse righe spettrali al mercurio migliorando lo spettro luminoso
- Le lampade a luce miscelata, lampade al mercurio ad alta pressione in cui il reattore di alimentazione è sostituito da un filamento, che funge da limitatore di corrente, posizionato assieme alla lampada in un tubo secondario. Durante il funzionamento, il filamento diventa incandescente ed emette luce come in una lampada ad incandescenza che va a miscelarsi con quella prodotta dal mercurio
- I LED (light emitting diode), dispositivi elettronici che emettono luce per elettroluminescenza.

In Tab. 2.2 viene presentato un confronto tra le principali tipologie di lampade.

Tabella 2.2. Confronto tra le principali tipologie di lampade

	VANTAGGI	SVANTAGGI
A incandescenza	Basso costo di acquisto Piccole dimensioni Eccellente Ra Varietà di forme Regolabile	Bassa efficienza Elevato sviluppo di calore Alti costi di esercizio Breve durata
Alogene	Piccole dimensioni Maggiore efficienza Maggiore durata Eccellente indice Ra Luce bianca brillante	Elevato sviluppo di calore
Fluorescenti	Elevata efficienza Lunga durata Scelta di temperatura di colore Bassi costi di esercizio Basso sviluppo di calore Sorgenti luminose diffuse	Elevato costo iniziale Sensibile alla temperatura Controllo ottico limitato Richiede alimentatore
Alogenuri metallici	Elevata efficienza Lunga durata Buon controllo ottico Bassi costi di esercizio Buona resa cromatica	Elevato costo iniziale Necessità di alimentatore Lungo periodo di accensione/riaccensione
Al sodio	Efficienza eccezionale Buon controllo ottico Costi di esercizio molto bassi Basso decadimento del flusso luminoso	Costo iniziale elevato Necessità alimentatore Tempi lunghi di accensione/riaccensione Scarsa resa cromatica
Led	Bassissimi costi di esercizio Lunghissima durata Piccole dimensioni	Omogeneità della luce emessa non sempre comparabile con altri tipi di sorgenti luminose

Gli apparecchi illuminanti

Per apparecchio illuminante si intende il contenitore della sorgente luminosa. Le principali funzioni che deve assolvere sono:

- Modifica delle caratteristiche di emissione della lampada, al fine di ottenere una determinata distribuzione del flusso.
- Controllo della luminanza della lampada.
- Protezione meccanica ed elettrica.
- Controllo termico della sorgente luminosa contenuta.
- Facilità di installazione e manutenzione.

In base alle caratteristiche di ripartizione del flusso luminoso, gli apparecchi per l'illuminazione d'interni sono classificati dalla CIE in sei diversi gruppi in funzione della percentuale di flusso totale distribuita al di sopra o al di sotto del piano orizzontale passante per l'asse della lampada (Fig. 2.5).

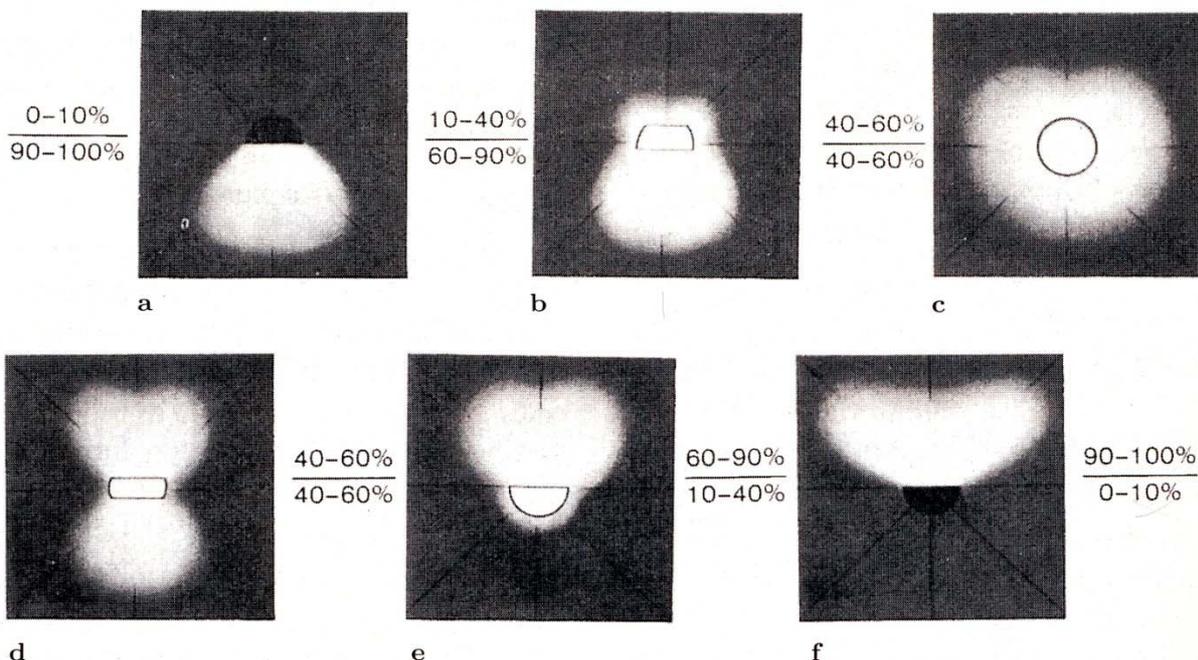


Figura 2.5. Classificazione CIE per gli apparecchi illuminanti.

Sistemi PSALI e HSL

Il sistema PSALI integra la luce naturale 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. 2.6).

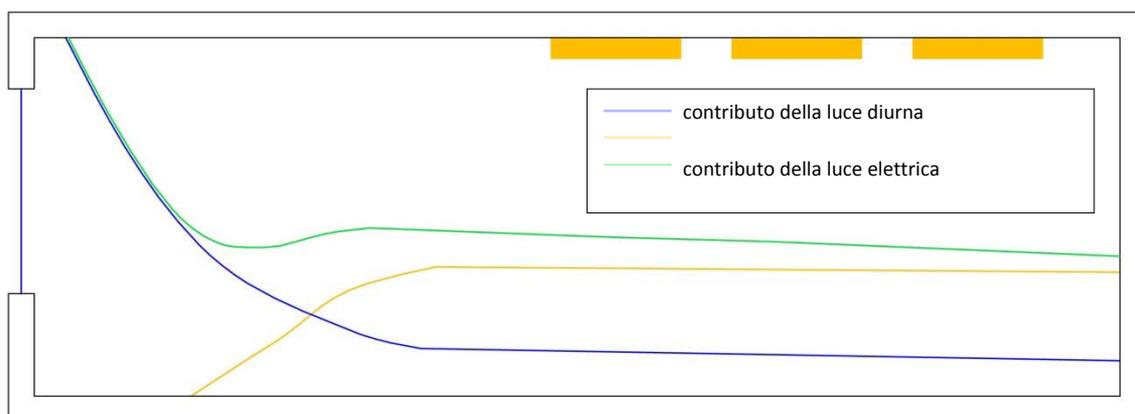


Figura 2.6. Schema PSALI.

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. 2.7). 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).

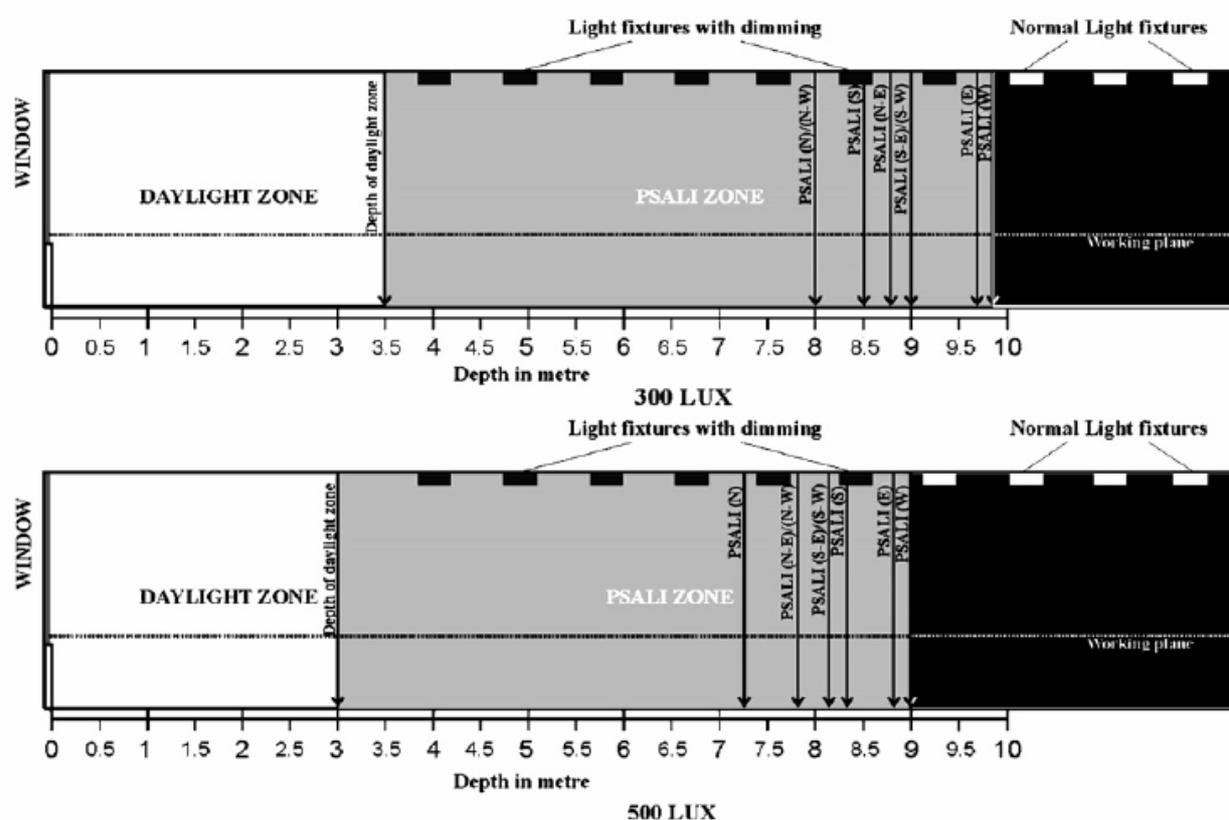


Figura 2.7. Sezione di un modello di ufficio tipo: sono individuate la profondità della zona di luce diurna (daylight zone) e della zona PSALI (PSALI zone) per un illuminamento sul piano di lavoro di 300 e 500 lux. Per ambienti particolarmente profondi, una parte del sistema è mantenuta in funzione in 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 combinarsi 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 neutro per il muro di fondo, ugualmente reso sia dalla luce artificiale che naturale.

La Tab. 2.3 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.