

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI "MEDITERRANEA"
DI REGGIO CALABRIA
FACOLTA' DI INGEGNERIA
Dipartimento di Informatica Matematica Elettronica e Trasporti**

QD-SD 01/01

Elementi di illuminotecnica

Antonino Nucara, Matilde Pietrafesa

QUADERNO DI DIPARTIMENTO

Serie didattica

Feo di Vito - 89100 Reggio Calabria - Italy

INDICE

Sommario	1
Abstract	1
1. Illuminazione di interni	3
2. Elementi di fotometria	3
2.1 La visione nell'occhio umano.....	3
2.2 Grandezze fotometriche.....	5
2.2.1 Flusso luminoso.....	5
2.2.2 Intensità luminosa.....	6
2.2.3 Radianza.....	7
2.2.4 Luminanza (o brillantezza).....	8
2.2.5 Illuminamento.....	9
2.3 Sorgenti secondarie.....	9
2.4 Sorgenti puntiformi, lineari ed estese.....	10
3. Illuminazione naturale	17
3.1 Sorgenti naturali di luce.....	17
3.2 Aperture.....	19
3.3 Il progetto di illuminazione naturale.....	21
3.4 Metodi di valutazione del Daylight Factor.....	25
3.4.1 Metodi Zijl e CIE.....	26
3.4.2 Metodo Waldram.....	29
3.4.3 Metodo BRS.....	30
4. Illuminazione artificiale	39
4.1 Sorgenti luminose artificiali.....	39
4.2 Apparecchi illuminanti.....	39
4.2.1 Tipologie di apparecchi illuminanti.....	39
4.2.2 Classificazione degli apparecchi.....	41
4.3 Lampade.....	44
4.3.1 Parametri caratteristici di una lampada.....	44
4.3.2 Classificazione delle lampade.....	47
4.3.3 Lampade a combustione.....	47
4.3.4 Lampade ad incandescenza.....	48
4.3.5 Lampade a scarica di gas.....	51
4.3.6 Lampade fluorescenti.....	58
4.3.7 Lampade a luce miscelata.....	60
4.3.8 Lampade ad induzione.....	60
5. Progetto di un impianto di illuminazione artificiale interna	63
5.1 Metodo del flusso totale o del coefficiente di utilizzazione.....	64
5.2 Procedura per la realizzazione di un progetto di impianto di illuminazione interna con il metodo del coefficiente di utilizzazione.....	66
5.3 Un'applicazione.....	75
5.4 Contrasto.....	77
5.5 L'abbagliamento.....	78
5.6 Metodo delle curve di luminanza.....	79
5.7 Un'applicazione.....	82
6. Bibliografia	85

Elementi di illuminotecnica

Antonino Nucara, Matilde Pietrafesa

Sommario

La crescente richiesta di qualità ambientale, unita al sempre maggior tempo trascorso dall'uomo in ambienti confinati, comporta la necessità di modificare il "microclima" interno, creando un ambiente in grado di soddisfare le esigenze degli occupanti.

In particolare sotto l'aspetto dell'illuminazione ciò comporta la necessità di assicurare adeguate condizioni visive, realizzando condizioni di comfort visuale nei riguardi dell'ambiente occupato. Il controllo energetico ed ambientale delle soluzioni adottate costituisce inoltre un aspetto della progettazione dal quale al giorno d'oggi non è ormai più possibile prescindere.

In quest'ottica il quaderno si configura come trattazione di supporto a corsi a carattere ambientale, con riferimento alle problematiche concernenti le tecniche di illuminazione degli ambienti interni.

Esso consiste più specificamente di una parte introduttiva di fotometria, in cui vengono descritte le grandezze di base necessarie per effettuare valutazioni di energia luminosa, e di ulteriori capitoli dedicati alle tecniche di illuminazione, sia naturale che artificiale.

Nell'ambito di queste ultime le diverse tipologie di apparecchi illuminanti e di lampade vengono analizzate con dettaglio, confrontandole sulla base di parametri fotometrici ed economici.

In ultimo viene descritta la metodologia più diffusa di progettazione di impianti di illuminazione artificiale interna, corredandola di applicazioni, anche relative alle tecniche di prevenzione dell'abbagliamento.

Abstract

Today's increasing call for environmental quality, joined to the fact that people spend more and more time in confined environments, requires modifications of indoor microclimate in order of realizing environments able to match occupants' requirements.

In particular from lighting point of view this implies that suitable visual conditions should be guaranteed, accomplishing visual comfort conditions within occupied environments. In addition, the energetic and environmental control of adopted solutions nowadays represents an aspect of design which cannot anylonger be left out of consideration.

Within this frame this paper represents a useful treatise for environmental courses, particularly referring to the analysis of problems concerning lighting techniques in indoor environments.

The paper specifically consists of an introductory part concerning photometry in which the basic quantities necessary for evaluations of light energy are described and of other parts devoted to lighting techniques, both natural and artificial.

As regards the latter, the different typologies of lighting apparatus and of lamps are described in detail, comparing them with reference to photometric and economic parameters.

At the end a wide-spread planning method for indoor artificial lighting systems, accompanied by applications, also referring to glare risk prevention, is described.

1. Illuminazione di interni

L'illuminotecnica studia i problemi relativi all'illuminazione, sia naturale che artificiale, nell'ottica di assicurare all'uomo adeguate condizioni visive. In particolare in un ambiente interno l'illuminazione deve garantire l'espletamento dei compiti visivi svolti e realizzare condizioni di comfort visuale, ossia condizioni mentali di soddisfazione espresse nei riguardi dell'ambiente visivo. Tali requisiti sono soddisfatti se tutti gli elementi interni possono essere distinti chiaramente senza difficoltà ed i compiti svolti senza sforzo.

Per ottenere un tale risultato l'illuminazione da realizzare può essere ottenuta essenzialmente sia sfruttando quella naturale che integrandola con quella elettrica.

Le due opzioni non sono tuttavia equivalenti: infatti sebbene l'illuminazione elettrica, a differenza di quella naturale, possa essere progettata con definite caratteristiche di qualità e quantità, a vantaggio di quella naturale vanno la migliore qualità della luce (migliore resa dei colori) ed i più elevati livelli di illuminamento raggiungibili, grazie alla sua quantità, impossibili da realizzare con illuminazione elettrica. Inoltre l'illuminazione naturale utilizza fonti rinnovabili di energia (il sole) consentendo notevoli risparmi energetici e benefici per l'ambiente.

2. Elementi di fotometria

2.1 La visione nell'occhio umano

La luce è energia radiante elettromagnetica che l'occhio umano è capace di percepire; in particolare la luce bianca è data da una miscela di tutte le lunghezze d'onda dello spettro visibile e contiene anche radiazioni appartenenti alla regione degli infrarossi e degli ultravioletti.

La valutazione delle grandezze fondamentali che si utilizzano per misurare l'energia radiante emessa o ricevuta da una superficie in relazione alle sensazioni prodotte sull'individuo attraverso l'occhio costituisce l'oggetto di una parte preliminare dell'illuminotecnica che va sotto il nome di *fotometria*.

Per analizzare le caratteristiche della visione nell'occhio umano si può osservare come in esso la cornea e soprattutto il cristallino costituiscano un sistema ottico centrato che permette la formazione delle immagini sulla retina, nella parte posteriore del globo oculare. Questo nel suo complesso costituisce un sensore "passabanda" molto sensibile, con una diversa sensibilità alle radiazioni delle varie lunghezze d'onda, che per di più associa ad ogni lunghezza d'onda della banda visibile (780 nm ÷ 380 nm) una sensazione di colore variabile dal rosso al violetto.

Tale fenomeno può essere spiegato in termini di rifrazioni¹ subite da un raggio luminoso attraversando l'occhio: i raggi di piccola lunghezza d'onda (blu) vengono fortemente deviati e convergono un po' prima della retina, quelli di grande lunghezza d'onda (rosso) convergono un

¹ Il fenomeno della rifrazione è una conseguenza del cambiamento di velocità della luce che si verifica al passaggio fra due mezzi diversi. Nell'attraversamento di un mezzo la velocità della luce infatti decresce rispetto a quella del vuoto, in maniera proporzionale alla sua densità, e poiché la frequenza rimane costante, ne consegue una diminuzione della lunghezza d'onda. Al passaggio fra mezzi diversi è associata quindi una modifica delle caratteristiche cromatiche della luce. L'*indice di rifrazione* (rapporto fra la velocità della luce nel vuoto e nel mezzo attraversato) dipende pertanto dalla lunghezza d'onda; in particolare si osserva come le onde corte si rifrangano maggiormente di quelle lunghe.

po' dopo, mentre quelli la cui lunghezza d'onda è circa 555 nm (giallo) formano un'immagine nitida direttamente sulla retina (fig. 2.1). In particolare in corrispondenza a quest'ultima lunghezza d'onda risulta massima, per una data potenza, la sensazione luminosa prodotta.

Per quantificare la sensibilità visiva dell'occhio umano medio a radiazioni di differente lunghezza d'onda, ma eguale energia, viene utilizzata una funzione detta *fattore di visibilità* $K(I)$.

Essa è definita in maniera tale che, date due potenze raggianti $P(I_1)$ e $P(I_2)$ relative a radiazioni monocromatiche di diversa lunghezza d'onda, le sensazioni di visibilità da esse generate risultino equivalenti per intensità luminosa, sia cioè verificata la seguente relazione:

$$P(\lambda_1) \cdot K(\lambda_1) = P(\lambda_2) \cdot K(\lambda_2), \quad (2.1)$$

in cui il fattore di visibilità viene definito a meno di una costante scelta convenzionalmente.

Il massimo di tale funzione, e quindi di sensazione di visibilità, $K(I)=K_{max}$ si ha per $I = 555$ nm.

Per comodità si definisce inoltre un ulteriore parametro, detto *coefficiente di visibilità* $V(I)$ (o *coefficiente spettrale di visibilità* o *efficacia relativa*), tramite la relazione:

$$V(\lambda)=K(\lambda)/K_{max} \quad (2.2)$$

il cui andamento in funzione della lunghezza d'onda (*curva di visibilità*) è riportato in figura 2.2 rispettivamente per la visione in piena luce (*fotopica*) e per quella in bianco e nero (*scotopica*).

In particolare nella visione fotopica vi è una nitida percezione dei colori ed un rapido adattamento alle variazioni d'intensità di radiazione, mentre la visione scotopica è caratterizzata da mancanza del discernimento dei colori, lentezza dei processi di adattamento (la visione si attiva in alcune decine di minuti passando da piena luce a semioscurità) e scarsa definizione delle immagini in tutto il campo visivo.

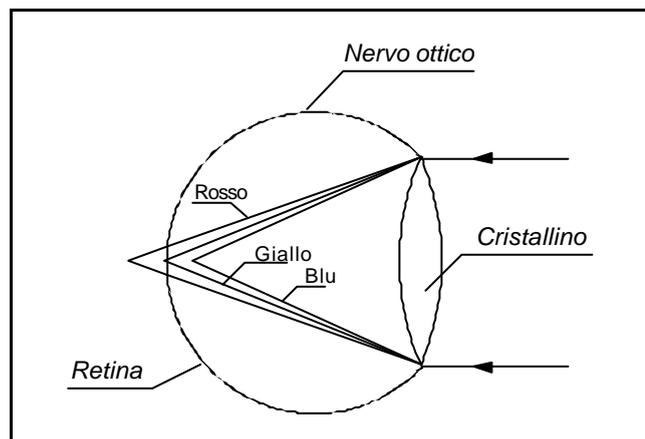


Figura 2.1 - Rifrazioni subite dai raggi luminosi attraversando l'occhio.

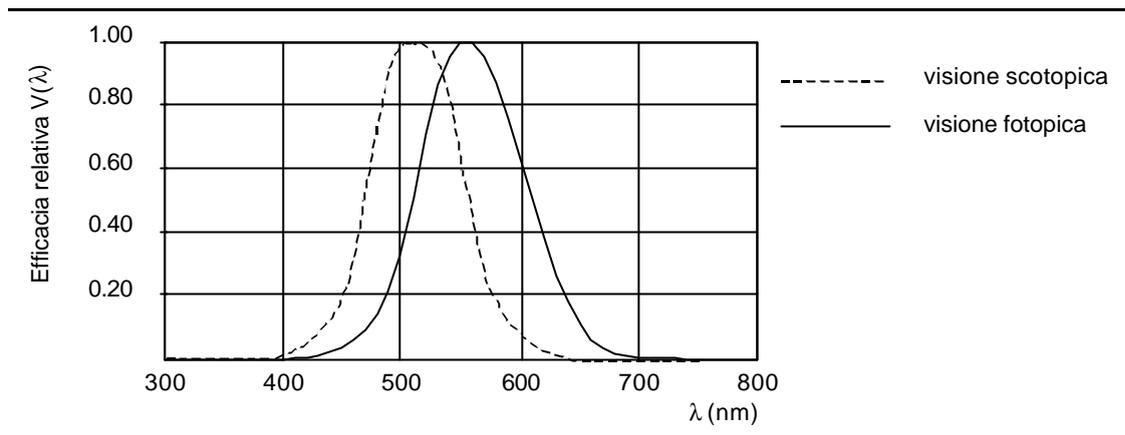


Figura 2.2 – Andamento del coefficiente di visibilità in funzione della lunghezza d'onda.

Dalla figura si vede come il massimo di sensibilità per la visione scotopica si abbia per lunghezze d'onda minori di quelle relative alla visione fotopica, ossia in condizioni di semioscurità tale massimo si sposta a lunghezze d'onda minori (fenomeno di *Purkinje*).

2.2 Grandezze fotometriche

Le principali grandezze fotometriche sono:

- a) il *flusso luminoso*;
- b) l'*intensità luminosa*;
- c) la *radianza*;
- d) la *luminanza*;
- e) l'*illuminamento*.

Di esse le prime quattro caratterizzano l'emissione della sorgente, rispettivamente per sorgenti puntiformi (flusso ed intensità luminosa) ed estese (luminanza e radianza), l'ultima l'illuminazione che incide sulla superficie ricevente.

2.2.1 Flusso luminoso

Rappresenta la potenza luminosa \mathbf{j} emessa da una sorgente puntiforme attraverso un angolo solido $d\omega$.

In particolare la potenza luminosa associata ad una potenza radiante $P(\mathbf{I})$ è data dalla quantità:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K(\lambda)P(\lambda)d\lambda = K_{\max} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V(\lambda)P(\lambda)d\lambda \quad (2.3)$$

(con $I_1=380 \text{ nm}$ e $I_2=780 \text{ nm}$), ossia dalla potenza radiante ponderata in base alla curva di visibilità.

Il fattore di visibilità consente quindi di passare da grandezze energetiche a grandezze fotometriche; conseguentemente per la misura del flusso luminoso viene definita una nuova unità di misura, il *lumen* (*lm*).

Si può in proposito osservare come mentre 1 W in una radiazione monocromatica di lunghezza d'onda pari a 555 nm (alla quale si verifica $V(\lambda)=1$) fornirebbe 683 lm, la stessa quantità fornirebbe invece solo 200 lm in uno spettro continuo ad energia egualmente ripartita nel campo delle radiazioni visibili.

Confrontando in particolare la visione scotopica e quella fotopica osserviamo come in quest'ultima l'occhio umano, pur perdendo sensibilità ai colori, divenga più sensibile: infatti 1 W di radiazione a 505 nm (a cui corrisponde il massimo di sensibilità) produce 1745 lm, contro i 683 prodotti alla lunghezza d'onda di massima sensibilità nella visione fotopica (555 nm).

2.2.2 Intensità luminosa

Rappresenta il flusso luminoso emesso da una sorgente puntiforme in un angolo solido elementare $d\omega$ spiccato attorno ad una direzione r :

$$I = \frac{d\phi}{d\omega} \quad (2.4)$$

Si misura in *candele* (*cd*).

La candela è la grandezza illuminotecnica fondamentale nel Sistema Internazionale di unità di misura: conseguentemente il flusso luminoso in tale sistema è una grandezza derivata, definita mediante la (2.4) come "il flusso luminoso emesso entro un angolo solido di uno steradiano da una sorgente puntiforme isotropa avente l'intensità di una candela".

Nota la distribuzione delle intensità luminose di una sorgente nelle varie direzioni I_α si può calcolare quindi il flusso luminoso ϕ emesso per mezzo dell'integrale:

$$\phi = \int_0^{4\pi} I_\alpha d\omega \quad (2.5)$$

In particolare per una sorgente isotropa, con intensità luminosa I uguale in tutte le direzioni, si ha:

$$\phi = 4\pi I.$$

Una classe particolare di sorgenti luminose è costituita da quelle che seguono la legge di Lambert. Per tali sorgenti l'intensità emessa lungo una certa direzione dipende solo dall'angolo formato dalla direzione stessa con la normale n al piano della sorgente secondo la relazione

$$I_\alpha = I_n \cos \alpha \quad (2.6)$$

Si dimostra che una sorgente lambertiana di radiazione è anche una sorgente luminosa lambertiana.

Per ogni sorgente luminosa è possibile tracciare un *solido fotometrico*, costituito dalla superficie che congiunge gli estremi dei vettori intensità luminosa spiccati in ogni direzione dal suo baricentro luminoso (figura 2.3).

Generalmente, per le comuni lampade, il solido fotometrico presenta un asse di simmetria, per cui esso può anche ottenersi per rotazione di una sezione meridiana: l'intensità luminosa varia in tal caso solo lungo i meridiani mentre rimane costante lungo i paralleli. In questo caso il solido fotometrico resta quindi caratterizzato dalla sua sola curva di intersezione con uno dei piani del fascio definito dall'asse di simmetria. Tale curva, che rappresenta pertanto il contorno di una sezione meridiana, costituisce la *curva fotometrica* di una sorgente.

In particolare per una sorgente lambertiana il solido fotometrico è costituito da una sfera tangente alla superficie emittente.

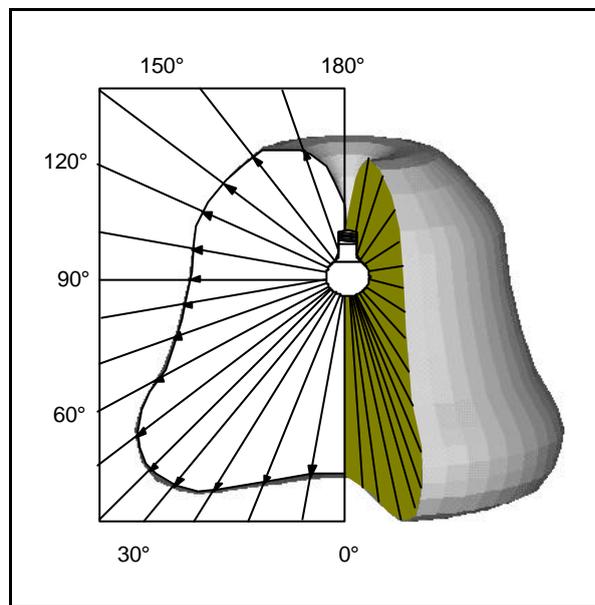


Figura 2.3 Esempio di solido fotometrico e curva fotometrica di una sorgente luminosa.

2.2.3 Radianza

La radianza M in un punto di una superficie estesa è data dal rapporto tra il flusso luminoso $d\phi$ emesso da un elemento di superficie contenente il punto e l'area della superficie stessa:

$$M = \frac{d\phi}{dA} \quad (2.7).$$

Si misura in lm/m^2 .

Alla radianza fa riferimento la curva di visibilità: essa vale fin quando la sorgente osservata ha una radianza di $100 lm/m^2$ (visione fotografica); nella visione scotopica la radianza invece scende al di sotto di $0.01 lm/m^2$.

2.2.4 Luminanza (o brillantezza)

La luminanza in un punto di una superficie estesa, in una particolare direzione \mathbf{a} normale ad essa, è data dal rapporto fra l'intensità luminosa dI emessa in quella direzione e la superficie emittente proiettata in un piano perpendicolare alla direzione stessa dA_n (superficie apparente vista dalla direzione α), ossia l'intensità emessa dall'unità di superficie apparente dA_n (figura 2.4):

$$L = \frac{dI}{dA_n} = \frac{dI}{dA \cos \alpha} = \frac{d\phi}{d\omega dA \cos \alpha} = \frac{M}{d\omega \cos \alpha} \quad (2.8).$$

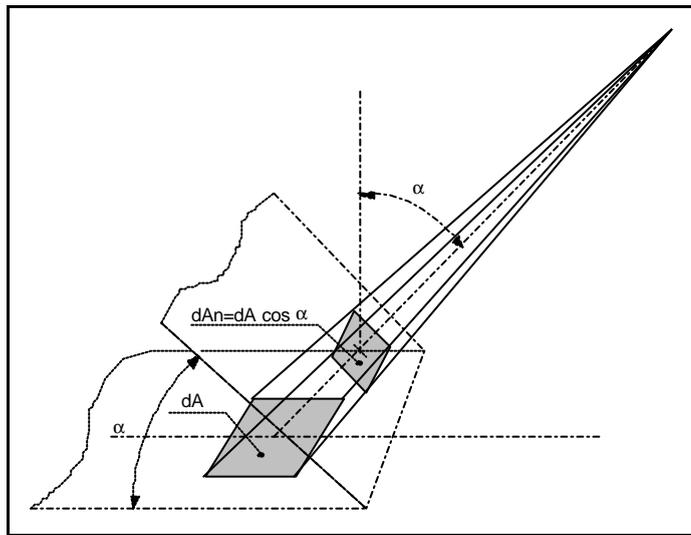


Figura 2.4 - Luminanza in un punto di una superficie.

Per superfici lambertiane, perfettamente diffondenti, la luminanza è costante in tutte le direzioni. In tal caso si ha:

$$L = \frac{I}{A \cos \phi} = \text{cost.} \quad (2.9)$$

e

$$M = \int_{2\pi} L d\omega \cos \alpha = \pi L \quad (2.10).$$

L'unità di misura della luminanza è la cd/m^2 , detta *nit*, o il suo multiplo cd/cm^2 , detto *stilb* ($1 \text{ stilb} = 10^{-4} \text{ nit}$).

Un'altra unità di misura talora usata è il *lambert*, che rappresenta la luminanza di una superficie lambertiana di 1 cm^2 che emetta un flusso luminoso di 1 lm . Vale la relazione:

$$1 \text{ lambert} = (10^4/\pi)cd/m^2.$$

2.2.5 Illuminamento

L'illuminamento in un punto di una superficie è definito come rapporto fra il flusso luminoso $d\phi$ incidente su una superficie elementare dA che contiene il punto e l'area della superficie stessa:

$$E = \frac{d\phi}{dA} \quad (2.11).$$

La sua unità di misura è il *lumen/m²* che viene detta *lux (lx)*.

La misura dell'illuminamento viene effettuata per mezzo di *luxmetri*, apparecchi costituiti da celle fotovoltaiche contenenti un sensore a semiconduttore nel quale, se investito da luce, si genera una forza elettromotrice proporzionale alla potenza della radiazione secondo una curva di sensibilità che riproduce la curva di visibilità normale dell'occhio umano.

2.3 Sorgenti secondarie

Un corpo che riceva una radiazione elettromagnetica ne rinvia una frazione pari al proprio coefficiente di riflessione r^2 . Poiché il coefficiente di riflessione può assumere valori diversi nei diversi punti di una superficie e dipende anche dall'angolo d'incidenza della radiazione, generalmente si fa riferimento al suo valore medio.

Essendo inoltre r funzione della lunghezza d'onda, ne consegue che la radiazione incidente e quella rinviata dalla superficie differiscono, oltre che per la potenza, anche per la composizione spettrale.

In particolare il rinvio della luce incidente può avvenire per riflessione speculare (un singolo raggio incidente produce un singolo raggio riflesso) come accade sulle superfici lucide o lisce, diffusa (la presenza di infinite superfici infinitesime riflettenti specularmente e orientate in tutte le direzioni fa sì che la luce venga globalmente riflessa in modo casuale), nel caso di superfici matte o opache, che presentano un certo grado di rugosità³, o mista (riflessione diffusa con una componente dominante nella direzione speculare) su superfici semilucide.

Il corpo riflettente può, a tutti gli effetti, essere considerato a sua volta una sorgente luminosa, che viene detta sorgente secondaria.

Anche una sorgente secondaria può seguire la legge di Lambert o avere caratteristiche direzionali: infatti l'intensità del raggio riflesso da una superficie perfettamente diffondente segue la legge di Lambert (2.6).

Pertanto, se E è l'illuminamento su una superficie, la sua radianza vale:

$$M = rE. \quad (2.12)$$

Se $r = 1$, come avviene per superfici perfettamente riflettenti, si ha

$$M = E.$$

² Va osservato come il coefficiente di riflessione in questione sia diverso da quello utilizzato nell'irraggiamento termico, poiché in illuminotecnica si considera solo quello relativo alla banda visibile.

³ Ciò si verifica quando le dimensioni delle irregolarità della superficie sono dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda della luce incidente.

Analogamente, nel caso di superfici trasparenti, se t è il coefficiente di trasmissione si ha:

$$M = tE \quad (2.13).$$

Se la superficie è lambertiana, la luminanza L vale

$$L = \frac{M}{\pi} = \frac{rE}{\pi} = \frac{I}{A} \quad (2.14).$$

2.4 Sorgenti puntiformi, lineari ed estese

In base alla loro geometria le sorgenti luminose possono essere suddivise in:

- a) puntiformi;
- b) lineari;
- c) estese.

Una sorgente può essere considerata puntiforme se le sue dimensioni sono piccole rispetto alla distanza dai punti da illuminare (la distanza deve essere almeno 5 volte maggiore della dimensione più grande della sorgente); è invece considerata lineare se presenta una dimensione molto maggiore delle altre e paragonabile con la distanza dal punto da illuminare; si può infine considerare estesa se almeno due sue dimensioni sono paragonabili alla distanza dal punto da illuminare.

Nei progetti illuminotecnici un aspetto fondamentale è rappresentato dal calcolo dell'illuminamento prodotto in un punto da una o più sorgenti.

Nel caso più semplice di una sola sorgente puntiforme S , posta a distanza r da un punto P di una superficie elementare dA , detta I_a l'intensità luminosa della sorgente nella direzione di P e detto $d\omega$ l'angolo solido sotto cui la sorgente vede dA , l'illuminamento su di essa è dato da (figura 2.5):

$$E_\alpha = \frac{d\phi}{dA} = \frac{I_a d\omega}{dA}.$$

Essendo $d\omega = dA_n/r^2$, con dA_n proiezione di dA in direzione normale all'asse dell'angolo solido data da:

$$dA_n = dA \cos \alpha$$

per cui

$$E_\alpha = \frac{I_a dA \cos \alpha}{r^2 dA} = \frac{I_a \cos \alpha}{r^2} \quad (2.15).$$

Essendo inoltre

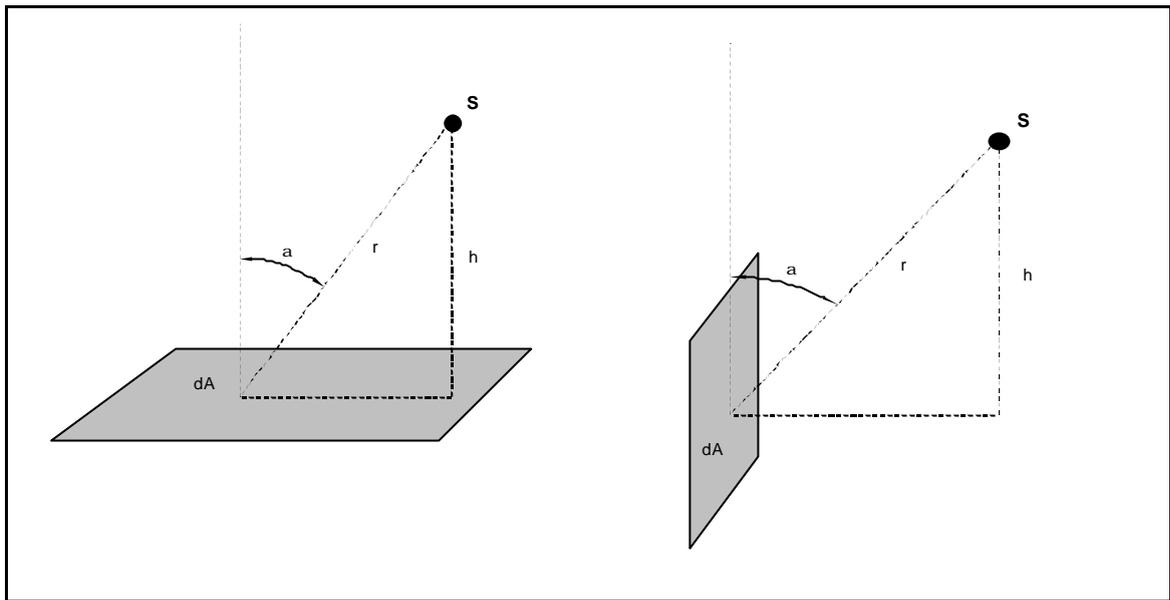


Figura 2.5 - Sorgente puntiforme.

$$r^2 = \frac{h^2}{\cos^2 \alpha}$$

con h altezza della sorgente sul piano di lavoro, si ha:

$$E_\alpha = I_\alpha \frac{\cos^3 \alpha}{h^2} \quad (2.16).$$

In generale tale espressione va applicata punto per punto sulla superficie illuminata.

La (2.15) esprime anche un'altra proprietà dell'illuminamento, valida quando la superficie è normale alla direzione dell'intensità ($\cos \theta = 1; E_\alpha = \frac{I}{r^2}$), ossia la legge dell'inverso del quadrato, secondo la quale l'illuminamento prodotto su una superficie per effetto di una sorgente puntiforme diminuisce con il quadrato della distanza.

L'illuminamento in un punto P di un piano verticale (ad esempio su un monumento o un quadro) è invece dato da:

$$E_\alpha = \frac{I_\alpha \sin \alpha}{r^2} = \frac{I_\alpha \cos^2 \alpha \sin \alpha}{h^2} \quad (2.17)$$

essendo in questo caso

$$dA_n = dA \sin \alpha .$$

Nel caso siano presenti più sorgenti concentrate, l'illuminamento prodotto in un punto è dato dalla somma dell'illuminamento prodotto dalle singole sorgenti.

Per una sorgente non puntiforme (lineare o estesa) il calcolo può essere condotto in modo concettualmente analogo, suddividendo la sorgente in tanti elementi di lunghezza o area infinitesima, ciascuno dei quali può essere trattato come una sorgente puntiforme. L'effetto prodotto dall'intera sorgente luminosa viene ottenuto quindi per integrazione su tutta la lunghezza o su tutta la superficie della sorgente, secondo il caso.

Per ogni elemento infinitesimo si ha pertanto:

$$dE = \frac{dI_{\alpha} \cos \alpha}{r^2}$$

e quindi:

$$E = \int_1 \frac{\cos \alpha}{r^2} dI_{\alpha} ; E = \int_S \frac{\cos \alpha}{r^2} dI_{\alpha} \quad (2.18).$$

In molti casi pratici la forma e la disposizione delle superfici emittenti sono tali da consentire il calcolo dell'integrale senza troppe difficoltà.

Sono inoltre disponibili diagrammi (diagrammi di *Zijl*) che forniscono un fattore adimensionale f , funzione delle dimensioni del locale, utilizzabile per il calcolo dei valori dell'illuminamento in un punto o di quello medio su una superficie o una linea in funzione del flusso luminoso j emesso da diversi tipi di sorgente. Vale la seguente relazione:

$$E = \frac{\Phi}{fh^2} \quad (2.19)$$

in cui h è una dimensione lineare.

Un esempio di tali diagrammi è riportato in figura 2.6.

Alternativamente il calcolo può essere condotto in termini di luminanza.

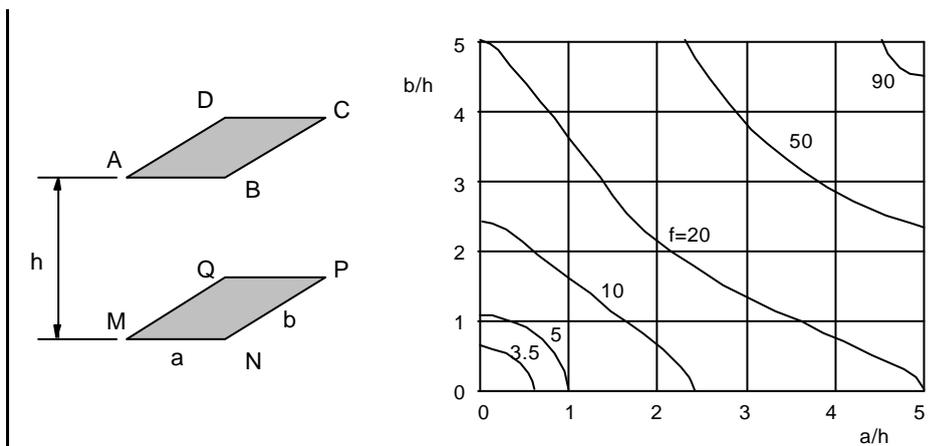


Figura 2.6 Diagramma di *Zijl* per il calcolo dell'illuminamento prodotto in una stanza rettangolare di altezza h da una sorgente posta al soffitto.

Se la sorgente è lineare di lunghezza l , ipotizzando ancora di suddividerla in tanti elementi infinitesimi di lunghezza dl , ciascuno con intensità dI , si può introdurre una particolare grandezza fotometrica, detta *luminanza lineare* L_l e definita da:

$$L_l = \frac{dI}{dl \cos \alpha'} \quad (2.20)$$

che rappresenta l'intensità infinitesima riferita all'elemento apparente dl (ossia quel che appare di dl ad un osservatore posto in P), in cui l'angolo α' per definizione di luminanza, è quello formato fra la direzione di osservazione e la normale alla sorgente (figura 2.7).

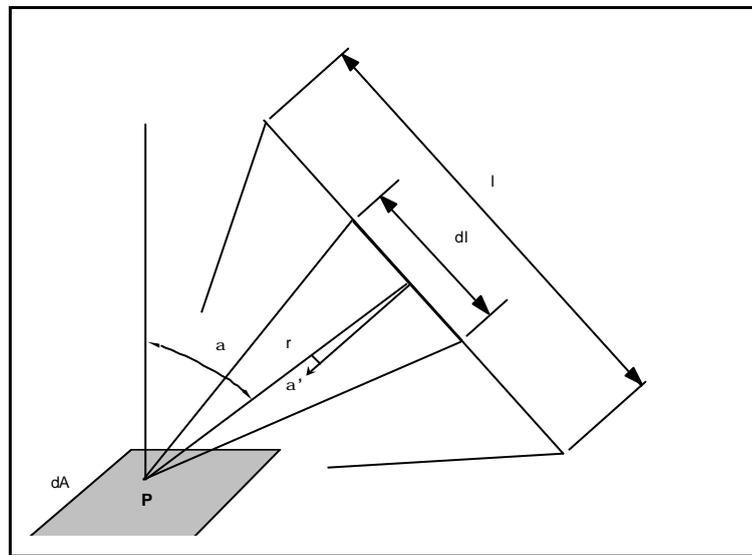


Figura 2.7 - Sorgente lineare.

In tal caso l'illuminamento vale:

$$dE = \frac{dI_{\alpha} \cos \alpha}{r^2} = \frac{L_l dl \cos \alpha \cos \alpha'}{r^2}.$$

L'illuminamento complessivo in P sarà quindi dato dalla somma dei diversi contributi relativi ai diversi elementi dl_i

$$E = \int_i dE_i = \int_{l_i} \frac{L_l dl \cos \alpha \cos \alpha'}{r^2} \quad (2.21)$$

integrale tuttavia non facilmente risolubile.

Analogo ragionamento può essere effettuato per sorgenti estese (figura 2.8), suddividendole in elementi di superficie dS , cui corrisponde un'intensità infinitesima dI , ed introducendo la grandezza *luminanza superficiale* L_s :

$$L = \frac{dI}{dS \cos \alpha'}$$

dove α' assume lo stesso significato del caso precedente. Si ha:

$$dE = \frac{L_s dS \cos \alpha \cos \alpha'}{r^2} \quad \text{ed} \quad E = \int_{S_i} \frac{L_s dS \cos \alpha \cos \alpha'}{r^2}.$$

In entrambi i casi è possibile tuttavia effettuare una semplificazione effettuando l'ipotesi di emissione diffusa, ossia supponendo che la sorgente segua la legge di Lambert. Poiché il procedimento è analogo, ci si riferirà per semplicità ad uno solo dei due casi, quello di sorgente estesa.

In tal caso, ipotizzando costante la luminanza superficiale L_s , si ha:

$$E = L \int_{S_i} \frac{\cos \alpha \cos \alpha'}{r^2} dS.$$

Il termine $\frac{dS \cos \alpha'}{r^2}$ che compare sotto il segno di integrale è pari all'angolo solido $d\omega$ sotto cui il punto P vede l'areola dS . Ma $d\omega$ è pari anche all'angolo solido sotto cui il punto P vede l'areola dS' posta su una sfera di raggio unitario con centro P. Riferendosi alle intere superfici S ed S' vale quindi la relazione:

$$d\omega = \frac{dS \cos \alpha'}{r^2} = \frac{dS'}{1^2}.$$

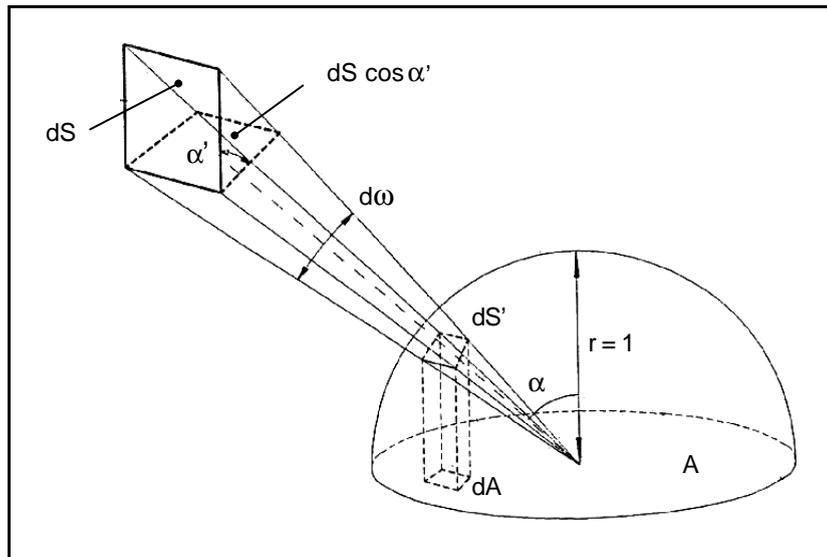


Figura 2.8 - Sorgente estesa.

Proiettando dS' sul piano di A si ottiene:

$$dA = dS' \cos \alpha = \frac{dS \cos \alpha'}{r^2} \cos \alpha$$

e quindi l'integrale varrà

$$\int_{S_i} dA .$$

L'insieme delle proiezioni dei vari elementi di superficie dS_i su A formerà nell'insieme una superficie circolare di raggio unitario, e quindi di area pari a π . Il valore dell'illuminamento sarà dato allora da:

$$E = L\pi \tag{2.22},$$

ossia esso risulta dato dal prodotto della luminanza per la proiezione della superficie emittente sul piano contenente P. Ricordando che

$$L = \frac{M}{\pi},$$

si ha

$$E = M,$$

ossia si può concludere affermando che l'illuminamento in un punto P di una superficie, dovuto ad una sorgente infinitamente estesa (qual può essere ad esempio la volta celeste), è dato dalla radianza della superficie stessa.

3. Illuminazione naturale

3.1 Sorgenti naturali di luce

Le sorgenti primarie di luce naturale sono il *sole* e la *volta celeste*.

In particolare la luce nell'ambiente interno può provenire direttamente dal sole, seppure parzialmente assorbita dall'atmosfera (*illuminazione diretta*), oppure consistere in quella diffusa dalla volta celeste, che è costituita dalla radiazione scatterata in atmosfera dai gas, dal vapor d'acqua e dal particolato e riflessa dalle varie superfici dell'ambiente, sia naturale (cielo, alberi, rilievi, ecc.) che artificiale (edifici, parti dell'ambiente interno) (*illuminazione diffusa*). Lo spazio esterno svolge infatti un ruolo analogo a quello di un apparecchio illuminante (che ha la funzione di filtrare e distribuire la luce artificiale) per quanto riguarda la luce naturale, scatterando, riflettendo e trasmettendo la luce nell'interno.

L'insieme dell'illuminazione diretta e diffusa costituisce l'illuminazione diurna globale; il valor medio dell'irradianza solare extraterrestre (detta *costante solare*) è di 1353 W/m^2 .

La radiazione solare, attraversando l'atmosfera, varia la sua composizione spettrale ed il processo in generale dipende fortemente dalle condizioni del cielo: si può tuttavia assumere che la radiazione, così come arriva sulla superficie terrestre, presenti una distribuzione spettrale che si avvicina a quella di un corpo nero alla temperatura di $\sim 5760 \text{ K}$ (figura 3.1).

La curva normale di visibilità dell'occhio umano in visione fotopica si adatta bene a tale composizione spettrale: il suo massimo (per $\lambda = 555 \text{ nm}$) corrisponde infatti al massimo dell'emittanza spettrale del corpo nero alla temperatura di 5225 K .

Nel campo delle radiazioni visibili ed ultraviolette ed in larghe bande della radiazione infrarossa la potenza spettrale della radiazione solare è però inferiore a quella del corpo nero, soprattutto in corrispondenza con le bande di assorbimento caratteristiche delle molecole di O_2 , N_2 , H_2O , O_3 e CO_2 che costituiscono le specie chimiche, tra quelle presenti in atmosfera, che determinano un maggiore assorbimento delle relative componenti spettrali.

Al riparo dalla radiazione solare diretta, dove la luce arriva solo dopo aver subito la riflessione diffusa attraverso l'atmosfera e sui corpi circostanti, la composizione spettrale è invece variabile a seconda della presenza di pulviscolo e nubi nell'aria e risente anche della presenza di edifici, monti alberi, ecc.: in generale la radiazione solare diffusa ha una colorazione che tende all'azzurro.

Ovviamente l'illuminazione sulla superficie terrestre dipende dalla posizione del sole (e quindi dalla sua *altezza* ed *azimut*) ed è pertanto variabile nei diversi mesi dell'anno, sia quantitativamente, in intensità, che qualitativamente, nel contenuto spettrale.

Le condizioni estreme possibili sono quella di cielo completamente chiaro, senza nuvole, e quella di cielo uniformemente coperto.

Il primo caso corrisponde ad un'emisfera trasparente, che disperde la luce solo in piccoli angoli (è questo fenomeno che fa sì che il cielo appaia blu e non nero), il secondo corrisponde invece ad un'emisfera traslucida che disperde la radiazione in grandi angoli; tutte le altre condizioni possono riguardarsi come intermedie fra le due.

Il cielo (o la volta celeste) come sorgente luminosa può essere caratterizzato per mezzo della distribuzione delle luminanze o dell'illuminamento su una superficie orizzontale non ostruita. Nota

la distribuzione delle luminanze in funzione dell'altezza θ e dell'azimut α , $L(\mathbf{q}, \mathbf{a})$, è possibile quindi calcolare il valore dell'illuminamento per mezzo dell'integrale:

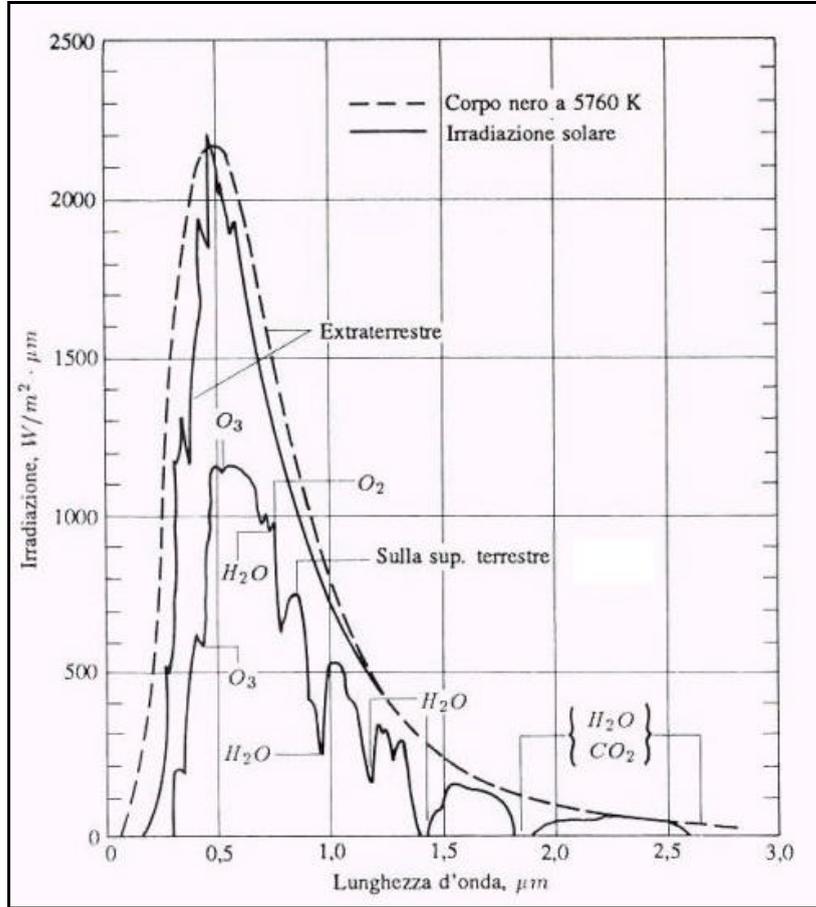


Figura 3.1 – Distribuzione spettrale della radiazione solare che arriva sulla superficie terrestre quando il sole è allo zenit.

$$E = \int_0^{2\pi} L d\omega = \int_{\vartheta=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\varphi=0}^{2\pi} L(\theta, \alpha) \sin\vartheta \cos\vartheta d\vartheta d\alpha \quad (3.1)$$

Per la distribuzione di luminanza sono stati definiti alcuni modelli matematici. In particolare per un cielo coperto sono stati definiti due modelli principali:

- *cielo coperto internazionale*, standardizzato dalla CIE (1955), secondo cui la luminanza L_q dipende dall'angolo di altezza q e dai valori della luminanza allo zenit L_z :

$$L_\theta = L_z \frac{1 + 2 \sin\vartheta}{3} \quad (3.2)$$

con L_z dato da:

$$L_z = \frac{9E_e}{7\pi}$$

in cui E_e è l'illuminamento orizzontale esterno. E' evidente come la luminanza aumenti man mano che dall'orizzonte ci si avvicina allo zenith, dove raggiunge poi un valore 3 volte maggiore di quello dell'orizzonte; lungo l'azimut il valore di L_q si mantiene invece costante (figura 3.2a);

- *cielo a luminanza uniforme*, che presuppone che il cielo si comporti come una sorgente estesa che emette secondo la legge di Lambert, con radianza uniforme:

$$L_{\vartheta} = \text{costante.} \quad (3.3)$$

L'assunzione di cielo a luminanza uniforme corrisponde invece ad una situazione di cielo parzialmente coperto, in inverno e con il sole basso sull'orizzonte; inoltre la sua luminosità è uniforme indipendentemente dalla direzione (figura 3.2b). A tale riguardo viene normalmente attribuito al cielo un valore di luminanza pari a 1600 nit, con conseguente illuminamento medio esterno pari a 5000 lux.

Per un cielo chiaro ancora è stato standardizzato un modello dalla CIE (1973):

$$L_{\vartheta} = \frac{1 - e^{\frac{-0.32}{\sin \theta}} (0.91 + 10e^{-3k} + 0.45 \cos^2 k)}{0.274 (0.91 + 10e^{-3\theta_{ZEN}} + 0.45 \cos^2 \theta_{ZEN})} \quad (3.4)$$

con k distanza angolare del punto dal sole e θ_{ZEN} angolo zenitale del sole.

Le zone più luminose del cielo in tal caso risultano quella attorno al sole e quella in direzione ad esso ortogonale, mentre nella zona di cielo simmetrica rispetto a quella occupata dal sole si ha un minimo di luminanza; inoltre l'orizzonte può risultare più luminoso dello zenit (figura 3.2c).

Con cielo coperto (radiazione diffusa) l'illuminamento su una superficie orizzontale non ostruita raggiunge valori che vanno dai 5.000 ai 15.000 lux; con cielo sereno (radiazione diretta + diffusa) si possono ottenere da 100.000 a 150.000 lux.

Nella figura 3.3 è riportato un esempio di curve di luminosità diurna che forniscono, in termini di valori medi mensili, i valori dell'illuminamento su una superficie orizzontale nelle diverse ore del giorno dei vari mesi dell'anno (AA.VV., 1988): è possibile osservare come nella quasi totalità dell'anno tali valori si mantengano sempre superiori ai 5.000 lux da 90 minuti dopo l'alba a 90 minuti prima del tramonto.

3.2 Aperture

La luce entra quindi negli ambienti attraverso le superfici trasparenti, che vanno progettate essenzialmente per fini di illuminazione, pur tenendo conto di altri elementi importanti (rumore, dispersioni termiche, ecc.).

Il rapporto fra il flusso luminoso che penetra all'interno dell'ambiente ed il flusso incidente sulla superficie esterna del vetro definisce l'*efficienza* dell'apertura.

Essa è ovviamente legata essenzialmente all'efficienza del vetro, e quindi alla sua trasparenza. Per aperture di 2-5 m² fornite di doppi vetri di 3.50 mm i valori si aggirano su 0.4-0.5 e diminuiscono per spessori maggiori.

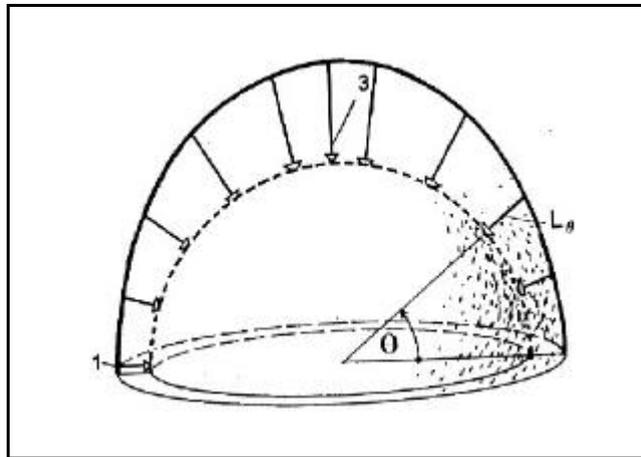


Figura 3.2a – Modello CIE di cielo coperto internazionale.

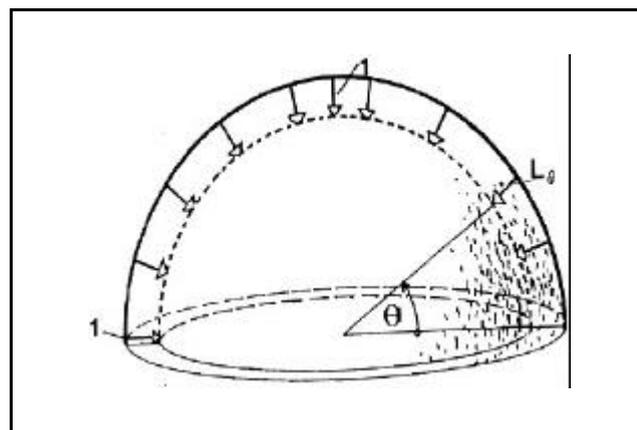


Figura 3.2b – Modello di cielo a luminanza uniforme.

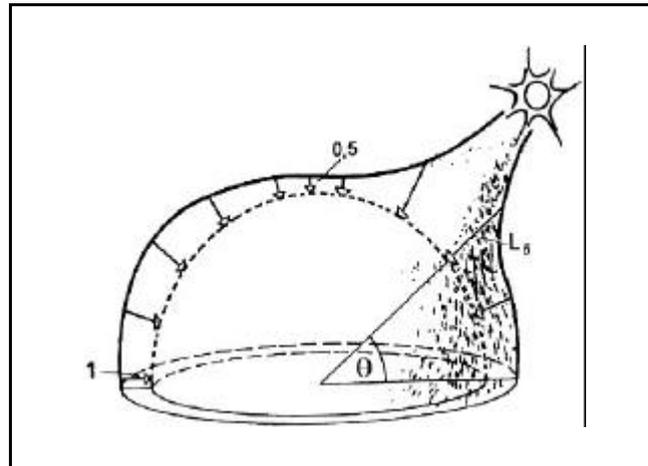


Figura 3.2c – Modello CIE di cielo chiaro.

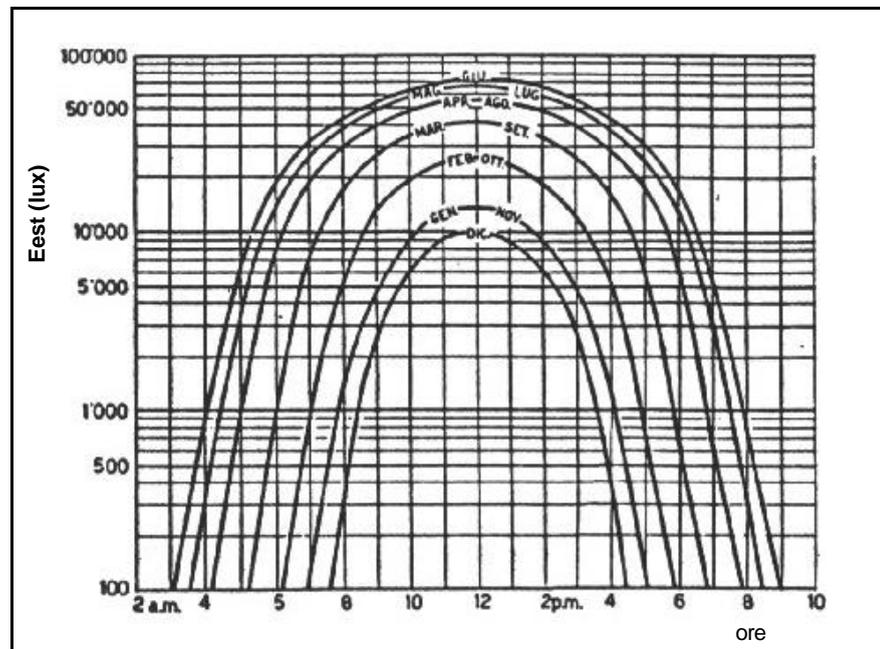


Figura 3.3 – Andamento giornaliero dei valori dell'illuminamento esterno nei diversi mesi dell'anno.

Tuttavia le superfici sporcandosi riducono la loro efficienza: comunemente le riduzioni dovute allo spessore sono dell'ordine del 10%, quelle dovute all'inquinamento del 30%.

La maggiore o minore trasparenza caratterizza inoltre un vetro dal punto di vista della dispersione della luce. In relazione a tale fenomeno un vetro può risultare trasparente o opaco: attraverso il primo la luce passa senza subire cambiamenti di direzione (conseguentemente tali superfici non distorcono la vista degli oggetti), mentre al contrario le superfici opache disperdono la luce (di conseguenza la visione attraverso tali superfici è sfumata e gli oggetti possono risultare non ben distinguibili). In generale le superfici lambertiane mostrano le maggiori dispersioni.

La trasmissione della luce è inoltre variabile con l'angolo di incidenza. Per un vetro trasparente, che è il materiale più usato, l'efficienza è pressochè costante per angoli di incidenza compresi fra 0° e 60° e decresce gradualmente al crescere dell'angolo, fino ad annullarsi per incidenze parallele alla superficie (angolo di incidenza di 90°).

Per luce diffusa pertanto i valori della trasmittanza sono in generale valori medi pesati sui vari angoli di incidenza, oltre che sulle varie distribuzioni di intensità.

3.3 Il progetto di illuminazione naturale

Comporta una progettazione architettonica che consenta di garantire idonei requisiti di illuminazione. Questi possono essere schematizzati in:

- valori dell'illuminamento medio adeguati per le attività svolte nell'ambiente ed uniformità di tali valori;
- grado di abbagliamento accettabile (vedi cap.5).

La continua variabilità dell'illuminazione naturale fa sì che frequentemente i parametri e gli indici di qualità deputati a caratterizzare i locali chiusi nei riguardi dell'utilizzazione della luce diurna facciano riferimento a valori comparativi di illuminamento e non a valori assoluti. Pertanto, riguardo a tale parametro l'illuminazione interna può essere caratterizzata in due maniere:

- a) in maniera diretta, fornendo la distribuzione dei valori dell'illuminamento sul piano di lavoro;
- b) in maniera indiretta, rapportando l'illuminazione interna con quella che si manifesta nello stesso istante all'esterno. In tal caso si fa riferimento ad un parametro, detto *Daylight Factor D* e generalmente espresso in %, definito come "rapporto tra il valore dell'illuminamento E_{int} che si ha in un punto dell'ambiente per effetto dell'illuminazione globale ricevuta da un cielo di nota distribuzione di luminanza e quello dell'illuminamento E_{est} che, nello stesso istante, si avrebbe su una superficie orizzontale esposta all'aperto solo alla radiazione solare diffusa e pertanto schermata dall'irraggiamento solare diretto":

$$D = \frac{E_{int}}{E_{est}} 100 . \quad (3.5)$$

Il significato del Daylight Factor è quello di valutare fino a che punto l'edificio, il suo interno e le sue ostruzioni esterne riducono l'illuminazione naturale potenzialmente disponibile.

Essendo l'illuminamento interno variabile da punto a punto, il Daylight Factor ne seguirà la distribuzione. Si può tuttavia fare riferimento anche a valori medi dell'illuminamento o a distribuzioni tipiche: nel caso si utilizzino valori medi si otterrà ovviamente un Daylight Factor medio.

Inoltre, essendo l'illuminamento esterno funzione del tempo, a sua volta anche quello interno sarà esprimibile come funzione temporale (figura 3.4):

$$E_{int}(t) = DE_{est}(t) . \quad (3.6)$$

Tuttavia, mentre i valori dell'illuminamento esterno E_{est} ed interno E_{int} variano continuamente con l'ora del giorno, in uno stesso istante il loro rapporto si mantiene costante.

Per calcolare tale parametro è necessario caratterizzare preliminarmente le condizioni esterne, ossia definire le condizioni del cielo (*cielo di progetto*) e fissare i valori dell'illuminamento esterno (*illuminamento esterno di progetto* E_D).

Quest'ultimo parametro può essere definito con riferimento alla percentuale di giorni dell'anno in cui i requisiti di illuminazione richiesti possono essere soddisfatti per mezzo dell'illuminazione naturale. Generalmente si sceglie convenzionalmente un valore dell'illuminamento pari a 5000 lux, che consente di soddisfare tali requisiti per il 90% dei giorni (o delle ore lavorative) dell'anno.

Il progetto effettivo consiste quindi nella determinazione del Daylight Factor necessario, D_R , in funzione dei valori dell'illuminamento medio interno necessario per l'ambiente, E_R , e di quello esterno di progetto E_D :

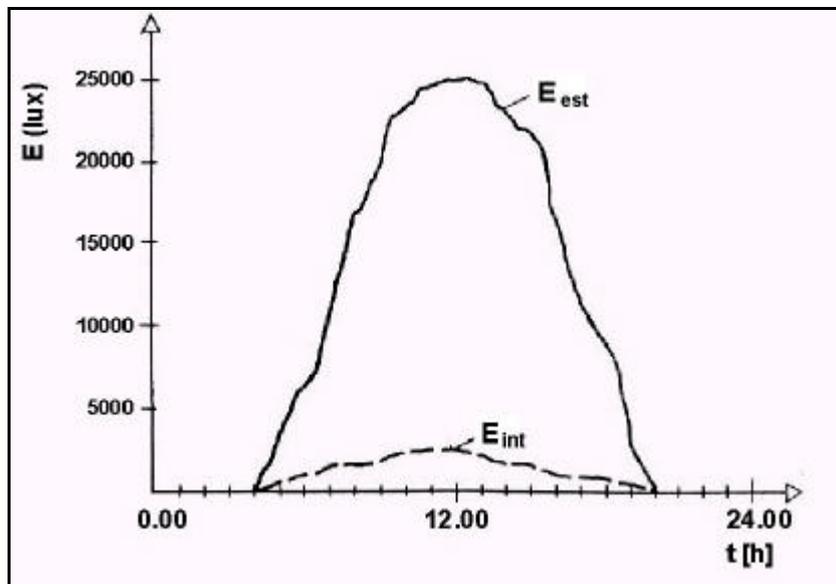


Figura 3.4 – Andamento dei valori dell'illuminamento interno in relazione a quello esterno.

$$D_R = \frac{E_R}{E_D} \cdot 100 \quad (3.7)$$

e nella conseguente scelta del tipo di aperture e nel loro dimensionamento. In generale tutti tali parametri di progetto vengono stabiliti per i diversi paesi dagli standard locali.

In tabella 3.1 sono riportati i valori di D consigliati (IES, 1972) per diverse destinazioni d'uso, da considerarsi come valori minimi assoluti (Moncada Lo Giudice e De Lieto Vollaro, 1993).

Di converso, assegnato un ambiente, è possibile calcolare il corrispondente Daylight Factor in funzione dell'illuminamento interno effettivamente presente nel locale e delle condizioni esterne, allo scopo di valutarne la qualità dell'illuminazione naturale.

In tal caso per valutare la distribuzione dell'illuminamento interno si può analizzare il flusso luminoso che ricade sui diversi punti del piano di lavoro di una stanza (figura 3.5).

Esso consiste di diversi contributi: in parte proviene direttamente dall'ambiente esterno, e cioè dalla porzione di cielo visibile dal punto attraverso le finestre (*illuminamento diretto*) ed in parte è dovuto alle riflessioni del soffitto, delle pareti e del pavimento (*illuminamento indiretto*); a sua volta il flusso che entra dalla finestra è in parte diretto ed in parte riflesso da oggetti esterni (ad esempio edifici).

La distribuzione dell'illuminamento all'interno è tuttavia determinata prevalentemente dalla componente diretta. Il valore di tale componente su un generico punto del piano di lavoro dipende sia dalla porzione di cielo visibile dal punto stesso che dall'angolo di incidenza medio della luce diffusa nel punto; entrambi tali elementi dipendono quindi, a loro volta, dall'ubicazione delle aperture.

Sinteticamente, l'illuminamento in un punto del piano di lavoro si può considerare costituito da tre aliquote:

- un'aliquota E_c dovuta al flusso proveniente direttamente dal cielo;
- un'aliquota E_e dovuta al flusso proveniente da riflessioni su superfici esterne;
- un'aliquota E_i dovuta al flusso proveniente da riflessioni su superfici interne.

Tabella 3.1 – Valori consigliati per il Daylight Factor per diverse destinazioni d'uso.

Ambiente	D(%) non minore di	Raccomandazioni
cucina	2	su almeno il 50% dell'area del pavimento (minimo 4.50 m ²)
soggiorno	1	su almeno il 50% dell'area del pavimento (minimo 7 m ²)
stanza da letto	0.5	su almeno il 50% dell'area del pavimento (minimo 5.50 m ²)
scuola	2	in tutte le aule e nelle cucine
ospedale	1	nelle camere di degenza
sala da disegno	6	sui tavoli da disegno
	2	sul resto dell'area
copisteria	4	su tutta l'area di lavoro
officina	3÷6	secondo se prevale l'illuminazione laterale o dall'alto
industria	5	
edificio pubblico	1	
ufficio	1	con illuminazione laterale a 3.6 m dalla finestra
	2	con illuminazione dall'alto su tutta l'area

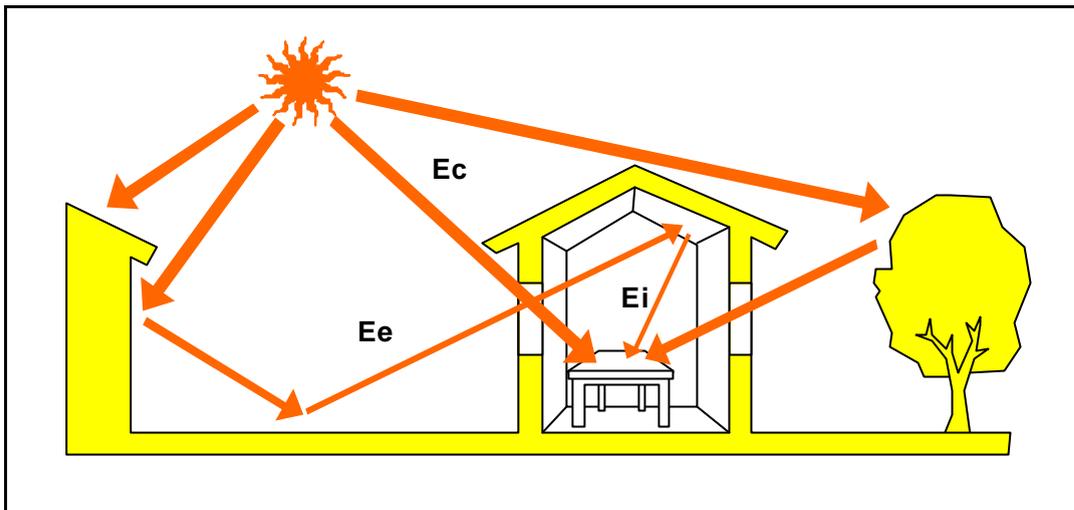


Figura 3.5 – Componenti del flusso luminoso che raggiunge il piano di lavoro di un ambiente.

Con riferimento ai tre contributi, a sua volta il coefficiente di illuminazione diurna è scomponibile nella somma di tre componenti, dette rispettivamente *componente cielo* D_c , *componente di riflessione esterna* D_e e *componente di riflessione interna* D_i .

In particolare la componente cielo indica la quantità di luce (espressa in %) che arriva nel punto considerato direttamente dal cielo

$$D_c = \frac{E_c}{E_e} 100, \quad (3.8)$$

mentre le componenti di riflessione esterna ed interna indicano rispettivamente le quantità di luce (in %) che arrivano nel punto dopo aver subito riflessioni causate rispettivamente da superfici esterne (alberi, costruzioni, ecc.) e interne (pavimento, pareti, soffitto, ecc.):

$$D_e = \frac{E_e}{E_{est}} 100 \quad D_i = \frac{E_i}{E_{est}} 100. \quad (3.9)$$

Si avrà:

$$D = D_c + D_e + D_i. \quad (3.10)$$

Se la somma di tali tre componenti uguaglia o supera il fattore ottimale del 4%, l'ambiente preso in considerazione gode di un'ottima illuminazione naturale. Poichè tutti e tre i fattori sono legati al tipo ed alle dimensioni delle finestre, la loro valutazione consente di ottenere indicazioni progettuali sul dimensionamento delle aperture esterne.

3.4 Metodi di valutazione del Daylight Factor

In generale per il calcolo del coefficiente D si possono utilizzare metodi riconducibili a tre categorie principali, ossia metodi matematici, grafici o tabellari. Per geometrie di interni complesse molto diffusi risultano inoltre modelli di simulazione fisica al computer.

I metodi matematici per la maggior parte non consentono di separare le tre componenti dell'illuminamento ed in generale forniscono le dimensioni delle aperture necessarie per ottenere un richiesto fattore di daylight: fra di essi i più noti sono il metodo del flusso totale, il metodo dell'efficienza e quello generativo.

In particolare il metodo del flusso totale viene utilizzato anche per i progetti di illuminazione artificiale (vedi capitolo 5) e consente di calcolare il valore del flusso totale che entra in un ambiente una volta fissato l'illuminamento su piano di lavoro moltiplicandone il valore per l'area della finestra e la sua trasmittanza.

Al contrario i metodi grafici ed i metodi tabellari consentono invece di determinare separatamente le diverse componenti dell'illuminamento (di solito le componenti cielo e di riflessione esterna). Fra i primi citiamo i diagrammi di *Zijl* e di *Waldran*, i nomogrammi *CIE* ed i metodi di *Daniluk* e di *Grün*, fra i secondi il metodo inglese *BRS*.

Nel seguito saranno illustrate le procedure di valutazione delle varie componenti dell'illuminazione con i più importanti metodi grafici e fra i metodi tabellari il metodo *BRS* verrà descritto in dettaglio per la sua vasta diffusione in campo tecnico.

3.4.1 Metodi *Zijl* e *CIE*

Valutazione della componente cielo

Utilizzando il metodo *Zijl* si distribuiscono uniformemente 10000 punti sulla semisfera celeste centrata nel punto di osservazione *P*.

Nell'ipotesi che il modello di cielo adottato sia quello a luminanza uniforme, la componente cielo è data dalla percentuale di semisfera celeste che *P* vede attraverso la finestra, che coincide con la percentuale *N* di punti visibili da *P* attraverso di essa:

$$D_C = \frac{N}{10000} 100 = \frac{N}{100}. \quad (3.11)$$

Il daylight factor del locale si otterrà quindi sommando i contributi di tutte le finestre :

$$D_C = \sum_i \frac{N_i}{100}. \quad (3.12)$$

Per facilitare l'uso del metodo, ai punti della sfera vengono sostituiti i corrispondenti punti ottenuti con una proiezione a centro da *P* su di un piano verticale, parallelo alla parete finestrata del locale e tangente alla sfera celeste (se il locale ha finestre orizzontali la proiezione va effettuata su un piano orizzontale). In pratica si procede sovrapponendo il diagramma (che viene detto "a grani di pepe") alla finestra, disegnata in scala 1:100, in modo tale che il suo centro coincida con *P* e si contano i punti che cadono all'interno del riquadro della finestra: tale numero fornisce quindi il valore percentuale di D_c .

Il metodo *CIE* è analogo a quello *Zijl*, differenziandosi solo per il fatto che sulla sfera celeste vengono distribuiti 1000 punti in maniera tale da riprodurre la distribuzione di luminanza del modello di cielo coperto internazionale (figura 3.6).

Analogamente al metodo precedente, ai punti sulla sfera vengono sostituiti i corrispondenti punti ottenuti con una proiezione a centro da P su di un piano verticale parallelo alla parete finestrata del locale e tangente alla sfera celeste.

In tal caso la componente cielo è data da:

$$D_c = \sum_i \frac{N_i}{1000} 100 = \sum_i \frac{N_i}{10}. \quad (3.13)$$

La presenza di un'ostruzione esterna può ridurre l'angolo solido sotto il quale dal punto P viene vista, attraverso la finestra, la volta celeste: ciò comporta la riduzione della componente cielo, dato che viene nascosta una parte della volta stessa.

La conseguente riduzione della superficie della finestra implica quindi l'eliminazione dal conteggio di un certo numero di punti. Il numero dei punti annullati dipende dal rapporto fra l'altezza dell'ostruzione e la sua distanza dal punto di osservazione.

Proiettando da P l'ostruzione sul piano della finestra l'area rimanente attraverso cui si continua a vedere la calotta celeste corrisponderà allora alla componente cielo e potrà essere valutata in base ai punti che ricadono al suo interno.

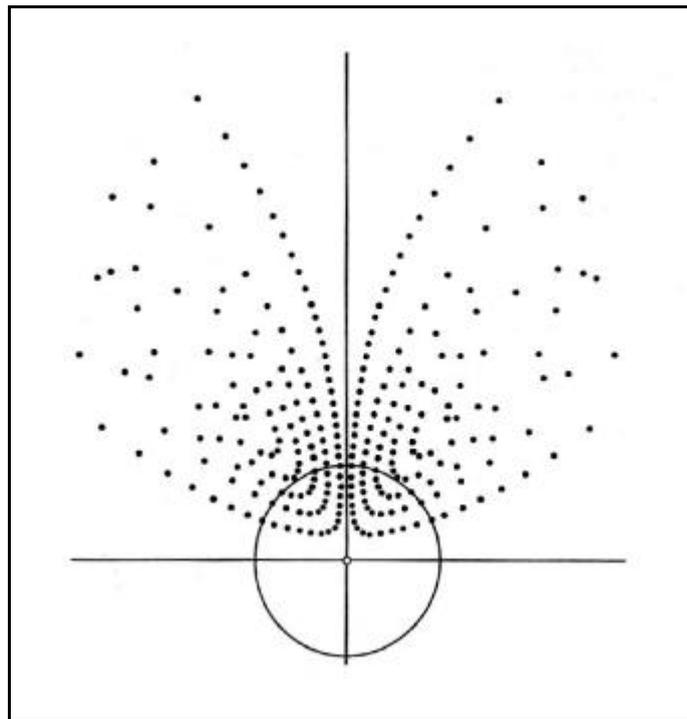


Figura 3.6 – Diagramma CIE “a grani di pepe”.

Valutazione della componente di riflessione esterna

La presenza di ostacoli esterni può, come visto, parzializzare l'angolo solido con cui dal punto P viene vista, attraverso la finestra, la calotta celeste. Proiettando da P l'ostruzione esterna sul piano della finestra l'area attraverso cui si vedono le ostruzioni corrisponderà alla componente di riflessione esterna, che può essere ottenuta come se fosse una componente cielo, corretta però del rapporto tra la luminanza dell'ostruzione e quella del cielo.

In mancanza di dati certi tale rapporto può essere assunto pari a 0.1 nel caso di cielo uniforme e 0.2 nel caso di cielo coperto internazionale.

Valutazione della componente di riflessione interna

Per valutare infine la componente di riflessione interna si può fare ricorso all'espressione:

$$D_i = \frac{A_{fin}}{A_{pav}} uv$$

in cui A_{fin} ed A_{pav} rappresentano rispettivamente l'area delle superfici vetrate e quella del pavimento ed u e v due parametri tabellati (tabella 3.2) in funzione dei coefficienti di riflessione r del pavimento, del soffitto e delle pareti e di un altro parametro geometrico, detto *indice del locale*, K , definito dalla seguente espressione:

$$K = \frac{ab}{h(a+b)} \quad (3.15)$$

con a , b , h rispettivamente lunghezza, larghezza ed altezza del locale.

Il fattore di Daylight così calcolato non tiene tuttavia conto del progressivo accumulo di polvere e sporizia sulle superfici sia opache che trasparenti ed è valido per vetri chiari e puliti di spessore fino a 6 mm inseriti in finestre senza telai.

Per tenere conto di tutto ciò si introduce un fattore di deprezzamento d che dipende dall'inclinazione dei vetri e dalla localizzazione dell'edificio (tabella 3.3), un fattore di correzione V per vetri diversi da quello standard (tab. 3.4) ed un fattore B dato dal rapporto fra l'area effettiva della vetrata e quella totale dell'apertura che, se l'infisso non è ancora definito, può porsi pari a 0.75.

Tabella 3.2 – Valori dei parametri u , v in funzione dei coefficienti di riflessione delle superfici e dell'indice del locale.

Pavimento	r										
	0.3			0.1			0.1			0.1	
Soffitto	0.7			0.7			0.5			0.3	
Pareti	0.5	0.3	0.1	0.5	0.3	0.1	0.5	0.3	0.1	0.3	0.1
K	u										
1.0	1.1	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
1.25	1.2	1.1	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
1.5	1.3	1.2	1.1	1.3	1.2	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0
2.0	1.4	1.3	1.2	1.4	1.3	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0
2.5	1.6	1.5	1.3	1.5	1.4	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.0

3.0	1.8	1.6	1.4	1.6	1.5	1.2	1.3	1.2	1.1	1.2	1.1
4.0	2.1	1.9	1.6	1.9	1.7	1.4	1.4	1.3	1.2	1.3	1.2
5.0	2.4	2.2	1.7	2.1	1.9	1.5	1.6	1.5	1.3	1.5	1.2

<i>Pavimento</i>	<i>r</i>										
	0.3			0.1			0.1			0.1	
	0.7			0.7			0.5			0.3	
<i>Soffitto</i>	0.5			0.3			0.1			0.3	
<i>Pareti</i>	0.5			0.3			0.1			0.3	
<i>K</i>	<i>v</i>										
1.0	3.9	3.2	1.4	3.2	2.4	1.3	2.2	1.8	1.0	1.4	0.8
1.25	3.8	3.1	1.4	3.1	2.3	1.3	2.1	1.7	1.0	1.4	0.7
1.5	3.7	3.0	1.3	3.0	2.2	1.2	2.0	1.7	1.0	1.3	0.6
2.0	3.5	2.8	1.3	2.8	2.0	1.1	1.9	1.6	0.9	1.2	0.4
2.5	3.3	2.6	1.2	2.6	1.8	1.0	1.8	1.4	0.8	1.1	0.4
3.0	3.1	2.4	1.1	2.4	1.7	1.0	1.7	1.3	0.8	1.0	0.3
4.0	2.6	2.0	1.0	2.0	1.3	0.8	1.5	1.1	0.7	0.8	0.3
5.0	2.2	1.5	0.9	1.6	1.0	0.7	1.2	0.9	0.6	0.6	0.3

Tabella 3.3 – Fattore di deprezzamento *d* per diversi ambienti.

<i>Ambiente</i>	<i>d</i>		
	<i>Vetratura</i>		
	<i>verticale</i>	<i>inclinata</i>	<i>orizzontale</i>
<i>Pulito</i>	0.9	0.8	0.7
<i>Industriale</i>	0.8	0.7	0.6
<i>Molto sporco</i>	0.7	0.6	0.5

Tabella 3.4 – Fattore di correzione *V* per diversi tipi di vetratura (illuminazione laterale).

<i>Tipo di vetratura</i>	<i>V</i>
Vetro ordinario da 6 mm	1.0
Vetro ordinario retinato	1.0
Vetro temperato retinato	0.9
Vetro temperato	0.95÷1.0
Vetro “cattedrale” e disegnato	0.80÷1.0
Vetro atermico da 6 mm	0.55
Vetro doppio ordinario	0.85
Plastica acrilica opalina diffondente da 3 mm	0.65÷0.90

3.4.2 Metodo Waldram

Il metodo Waldram consente invece di determinare la componente cielo in un punto P interno ad un locale facendo uso di un reticolo graduato che rappresenta la sfera celeste (figura 3.7).

Su tale reticolo vengono riportate le finestre del locale, individuandole per mezzo delle coordinate angolari (angoli azimutale e di altezza) delle congiungenti il punto P con i vertici delle finestre lette sui piani di pianta e di sezione.

La componente cielo si determina quindi come rapporto fra le superfici delle finestre ed il doppio della superficie del rettangolo che contorna il diagramma.

La semplicità del metodo è legata al fatto che utilizzando coordinate angolari non è richiesto alcun adattamento di scala.

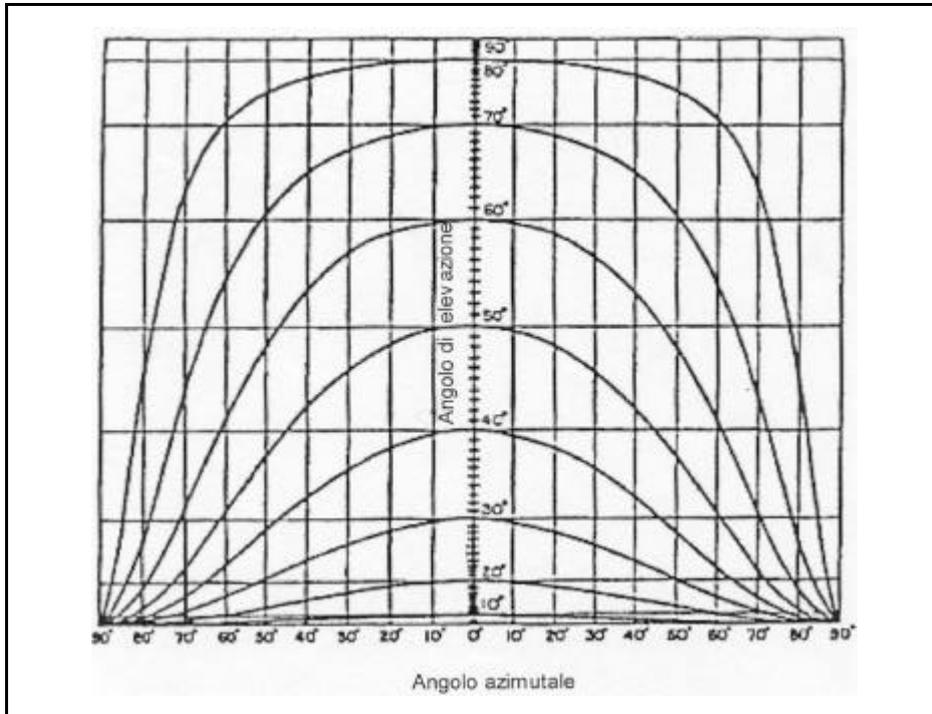


Figura 3.7 – Diagramma di Waldram.

Per la valutazione della componente di riflessione esterna valgono le stesse considerazioni viste per i metodi precedenti, salvo che la valutazione delle componenti cielo viene ovviamente riferita alle aree e non ai punti che ricadono al loro interno.

Dal diagramma di Waldram la *Building Research Station (BRS)* ha derivato un regolo calcolatore semicircolare che consente di pervenire alla determinazione diretta della componente cielo relativa ad un punto P interno ad un locale tramite poche misure angolari orizzontali e verticali (figura 3.8). La parte superiore (A) si riferisce a finestre molto estese, mentre la parte inferiore (B) riporta il fattore di correzione per aperture di dimensioni finite.

La determinazione della componente di riflessione esterna viene effettuata valutando la componente cielo relativa all'ostruzione e moltiplicando il valore ottenuto per il coefficiente di riflessione della sua superficie.

Simile al metodo Waldram è infine il metodo di Daniluk che fornisce, per mezzo di diagrammi polari, la misura della superficie di cielo vista attraverso la finestra dal punto considerato e quindi la componente cielo del Daylight Factor. Esso si riferisce sia al caso di cielo uniforme che a quello di cielo coperto.

Sia questo diagramma che quello di *Waldram* sono detti "ad aree uguali" poiché l'emisfera della volta celeste viene suddivisa in aree uguali (rettangoli o triangoli) per mezzo di semicerchi longitudinali e paralleli.

3.4.3 Metodo BRS

Valutazione della componente cielo

E' un metodo tabellare di facile impiego, che per mezzo di due tabelle fornisce i valori della componente cielo prodotta attraverso una finestra verticale in un punto di una superficie orizzontale da un *cielo a radianza uniforme* o un *cielo coperto internazionale CIE*. Si distinguono due casi:

- a) finestra senza ostruzione esterna;
- b) finestra con ostruzione esterna.

Nel caso a) si considera una finestra rettangolare di altezza H e larghezza B , con davanzale sul piano di riferimento e con il punto di riferimento P posto a distanza d sulla perpendicolare alla linea mediana della finestra (figura 3.9). La tabella fornisce il valore della componente cielo in funzione dei due rapporti H/d e B/d (tabella 3.5)

Per il caso b) di finestra parzialmente schermata da ostruzione esterna (figura 3.10; tabella 3.6) la componente cielo può invece essere calcolata proiettando da P l'ostruzione esterna sul piano della finestra e calcolando la differenza fra la componente cielo relativa all'intera finestra e la componente cielo relativa alla parte di finestra ostruita.

A tal fine sulla colonna a destra di ciascuna tavola è riportato l'angolo di ostruzione che sostituisce i valori di H/d e che consente, insieme ai valori di B/d , di valutare il valore della componente cielo relativa alla frazione di finestra ostruita dall'ostruzione.

Le tabelle tuttavia non tengono conto dell'assorbimento dovuto al telaio ed ai montanti della finestra e presuppongono un vetro semplice e pulito: per tale ragione si suole moltiplicare il valore trovato per un fattore di deprezzamento, che vale 0.8 nel caso di infissi metallici e 0.7 nel caso di infissi in legno.

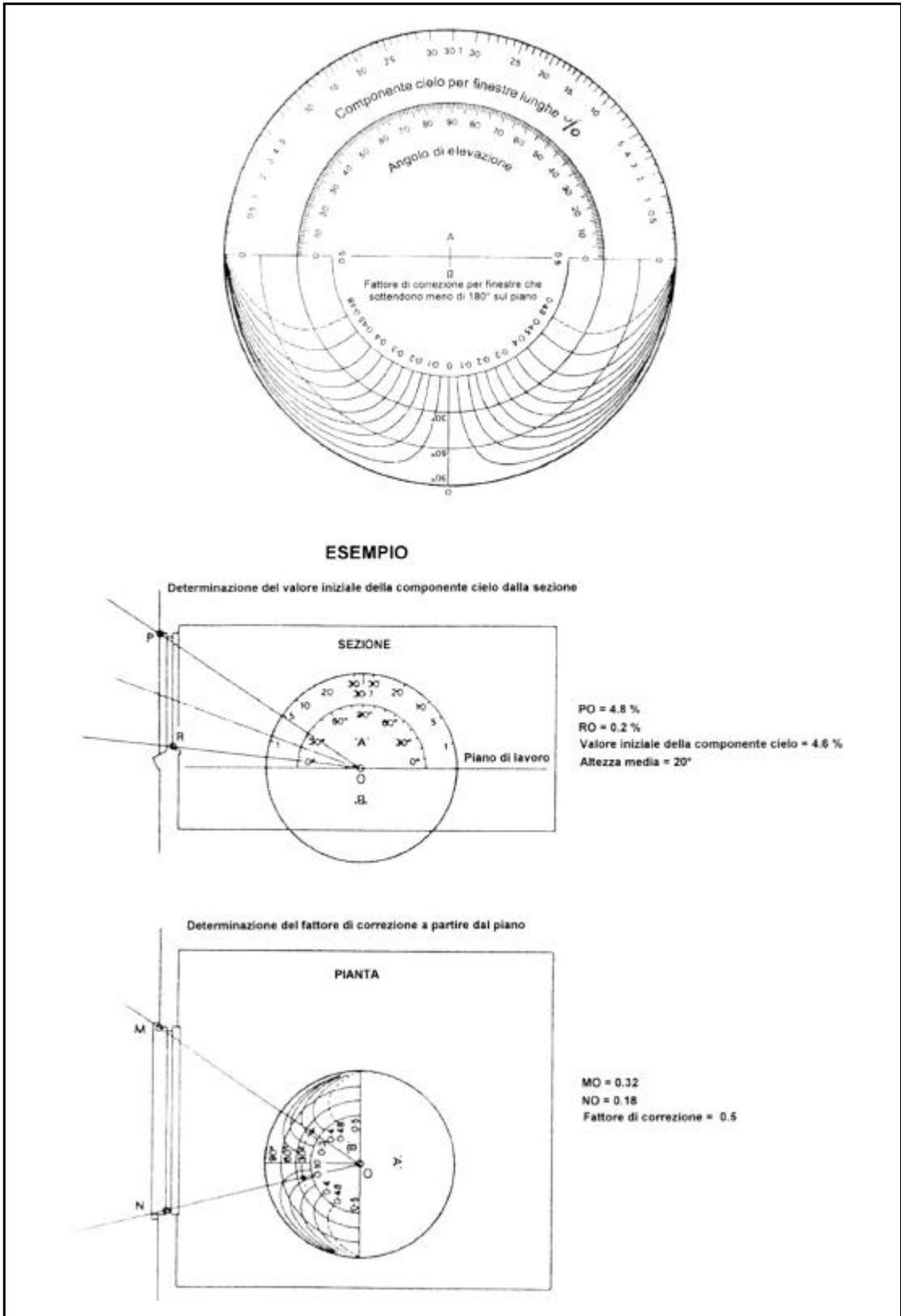


Figura 3.8 – Regolo calcolatore BRS derivato dal diagramma di Waldram.

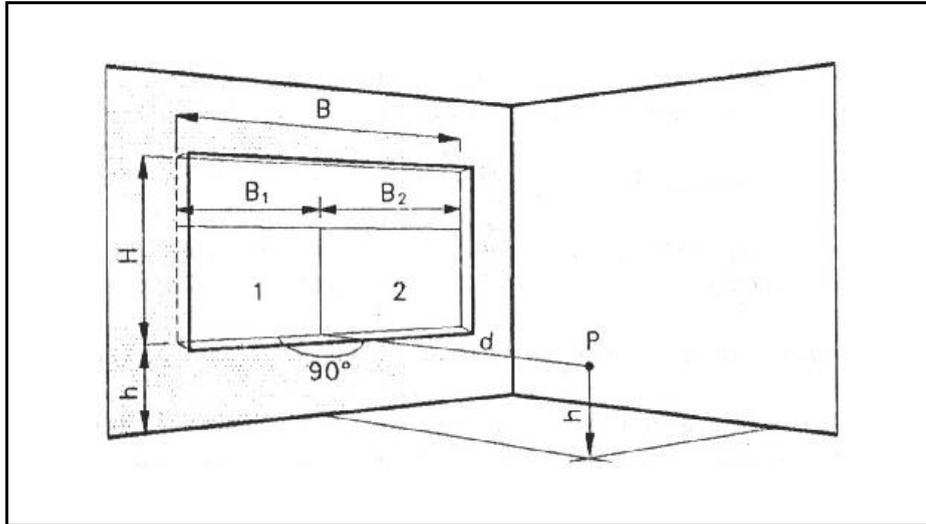


Figura 3.9– Determinazione della componente cielo nel caso di finestra senza ostruzioni esterne.

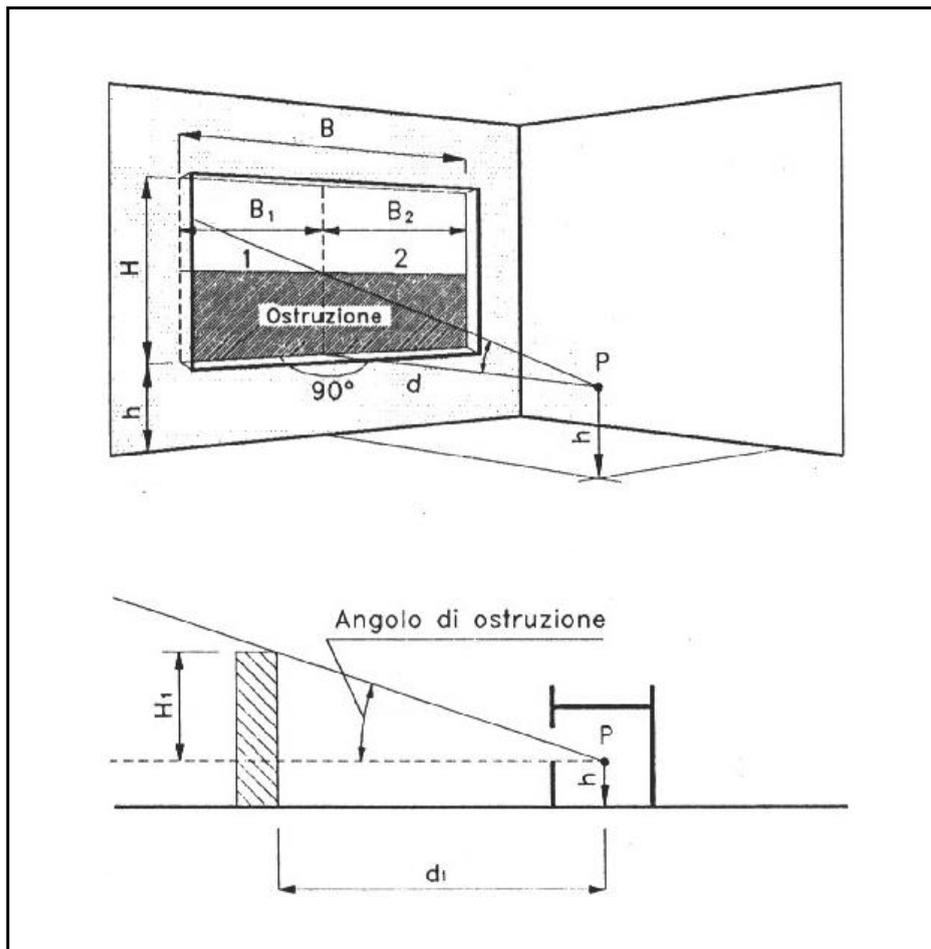


Figura 3.10– Determinazione della componente cielo nel caso di finestra con ostruzione.

Tabella 3.5 - Cielo internazionale. Componente cielo (D_c %)

																	Angolo di ostruzione				
.....	1,3	2,5	3,7	4,9	5,9	6,9	7,7	8,4	9,0	9,6	10,7	11,6	12,2	12,6	13,0	13,7	14,2	14,6	14,9	15,0	90°
5,0	1,2	2,4	3,7	4,8	5,9	6,8	7,6	8,3	8,8	9,4	10,5	11,1	11,7	12,3	12,7	13,3	13,7	14,0	14,1	14,2	79°
4,0	1,2	2,4	3,6	4,7	5,8	6,7	7,4	8,2	8,7	9,2	10,3	10,9	11,4	12,0	12,4	12,9	13,3	13,5	13,6	13,7	76°
3,5	1,2	2,4	3,6	4,6	5,7	6,6	7,3	8,0	8,5	9,0	10,1	10,6	11,1	11,8	12,2	12,6	12,9	13,2	13,2	13,3	74°
3,0	1,2	2,3	3,5	4,5	5,5	6,4	7,1	7,8	8,2	8,7	9,6	10,2	10,7	11,3	11,7	12,0	12,4	12,5	12,6	12,7	72°
2,3	1,1	2,3	3,4	4,5	5,4	6,3	7,0	7,6	8,1	8,6	9,8	10,0	10,5	11,1	11,4	11,7	12,0	12,2	12,3	12,3	70°
2,6	1,1	2,2	3,4	4,4	5,3	6,2	6,8	7,5	7,9	8,4	9,3	9,8	10,2	10,8	11,1	11,4	11,7	11,8	11,9	11,9	69°
2,4	1,1	2,2	3,3	4,3	5,2	6,0	6,6	7,3	7,7	8,1	9,1	9,5	10,0	10,4	10,7	11,0	11,2	11,3	11,4	11,5	67°
2,2	1,1	2,1	3,2	4,1	5,0	5,8	6,4	7,0	7,4	7,9	8,7	9,1	9,6	10,0	10,2	10,5	10,7	10,8	10,9	10,9	66°
2,0	1,0	2,0	3,1	4,0	4,8	5,6	6,2	6,7	7,1	7,5	8,3	8,7	9,1	9,5	9,7	9,9	10,0	10,1	10,2	10,3	63°
1,9	1,0	2,0	3,0	3,9	4,7	5,4	6,0	6,5	6,9	7,3	8,1	8,5	8,8	9,2	9,4	9,6	9,7	9,8	9,9	9,9	62°
1,8	0,97	1,9	2,9	3,8	4,6	5,3	5,8	6,3	6,7	7,1	7,8	8,2	8,5	8,8	9,0	9,2	9,3	9,4	9,5	9,5	61°
1,7	0,94	1,9	2,8	3,6	4,4	5,1	5,6	6,1	6,5	6,8	7,5	7,8	8,2	8,5	8,6	8,8	8,9	9,0	9,1	9,1	60°
1,6	0,90	1,8	2,7	3,5	4,2	4,9	5,4	5,8	6,2	6,5	7,2	7,5	7,8	8,1	8,2	8,4	8,5	8,6	8,6	8,6	58°
1,5	0,86	1,7	2,6	3,3	4,0	4,6	5,1	5,6	5,9	6,2	6,8	7,1	7,4	7,6	7,8	7,9	8,0	8,0	8,1	8,1	56°
1,4	0,82	1,6	2,4	3,2	3,8	4,4	4,8	5,2	5,6	5,9	6,4	6,7	7,0	7,2	7,3	7,4	7,5	7,5	7,6	7,6	54°
1,3	0,77	1,5	2,3	2,9	3,6	4,1	4,5	4,9	5,2	5,5	5,9	6,2	6,4	6,6	6,7	6,8	6,9	6,9	6,9	7,0	52°
1,2	0,71	1,4	2,1	2,7	3,3	3,8	4,2	4,5	4,8	5,0	5,4	5,7	5,9	6,0	6,1	6,2	6,2	6,3	6,3	6,3	50°
1,1	0,65	1,3	1,9	2,5	3,0	3,4	3,8	4,1	4,3	4,6	4,9	5,1	5,3	5,4	5,4	5,5	5,6	5,6	5,7	5,7	48°
1,0	0,57	1,1	1,7	2,2	2,6	3,0	3,3	3,6	3,8	4,0	4,3	4,5	4,6	4,7	4,7	4,8	4,8	4,9	5,0	5,0	45°
0,9	0,50	0,99	1,5	1,9	2,2	2,6	2,8	3,1	3,3	3,4	3,7	3,8	3,9	4,0	4,0	4,0	4,1	4,1	4,2	4,2	42°
0,8	0,42	0,83	1,2	1,6	1,9	2,2	2,4	2,6	2,7	2,9	3,1	3,2	3,3	3,3	3,3	3,3	3,4	3,4	3,4	3,4	39°
0,7	0,33	0,68	0,97	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1	2,2	2,3	2,5	2,5	2,6	2,6	2,6	2,6	2,7	2,7	2,8	2,8	35°
0,6	0,24	0,53	0,74	0,98	1,2	1,3	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	31°
0,5	0,16	0,39	0,52	0,70	0,82	0,97	1,0	1,10	1,2	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	27°
0,4	0,10	0,25	0,34	0,45	0,54	0,62	0,70	0,75	0,82	0,89	0,92	0,95	0,95	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	22°
0,3	0,06	0,14	0,18	0,26	0,30	0,34	0,38	0,42	0,44	0,47	0,49	0,50	0,50	0,51	0,51	0,52	0,52	0,52	0,53	0,53	17°
0,2	0,03	0,06	0,09	0,11	0,12	0,14	0,16	0,20	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	11°
0,1	0,01	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	6°
0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0	4,0	6,0	...	0°

B/d

Tabella 3.6 - Cielo uniforme. Componente cielo (D_c %)

													Angolo di ostruzione		H/d					
1,3	2,6	3,9	5,0	6,1	7,0	7,9	8,8	9,5	10,1	11,2	12,0	12,7	13,2	13,6	14,3	14,7	15,0	15,3	15,8	90°
1,3	2,6	3,8	5,0	6,0	7,0	7,9	8,7	9,4	10,0	11,0	11,7	12,3	12,7	13,1	13,7	14,0	14,3	14,6	15,1	79°
1,2	2,6	3,7	4,9	5,9	6,9	7,8	8,5	9,2	9,8	10,8	11,5	12,1	12,6	12,9	13,5	13,7	14,0	14,2	14,6	76°
1,2	2,6	3,7	4,9	5,8	6,8	7,6	8,4	9,1	9,6	10,7	11,4	12,0	12,4	12,7	13,3	13,5	13,7	14,0	14,2	74°
1,2	2,5	3,6	4,8	5,7	6,7	7,4	8,2	8,9	9,4	10,4	11,1	11,7	12,1	12,4	12,9	13,1	13,3	13,5	13,7	72°
1,2	2,5	3,5	4,7	5,7	6,6	7,3	8,1	8,8	9,3	10,3	11,0	11,5	11,9	12,2	12,7	12,9	13,1	13,2	13,4	70°
1,2	2,4	3,5	4,6	5,6	6,5	7,2	7,9	8,6	9,1	10,1	10,8	11,3	11,6	12,0	12,4	12,6	12,8	12,9	13,1	69°
1,1	2,4	3,4	4,5	5,4	6,3	7,0	7,7	8,4	8,9	9,9	10,5	11,0	11,4	11,7	12,1	12,3	12,4	12,6	12,7	67°
1,1	2,3	3,3	4,4	5,3	6,1	6,8	7,5	8,2	8,6	9,6	10,2	10,6	11,0	11,3	11,7	11,9	12,0	12,1	12,2	66°
1,1	2,3	3,2	4,2	5,1	5,9	6,6	7,2	7,8	8,3	9,2	9,7	10,2	10,5	10,7	11,1	11,3	11,4	11,5	11,6	63°
1,0	2,2	3,1	4,1	5,0	5,7	6,4	7,0	7,6	8,0	9,0	9,4	9,9	10,2	10,4	10,8	11,0	11,1	11,2	11,2	62°
1,0	2,2	3,0	4,0	4,8	5,6	6,2	6,8	7,4	7,8	8,7	9,2	9,6	9,9	10,1	10,4	10,6	10,7	10,8	10,8	61°
0,99	2,1	3,0	3,9	4,7	5,4	6,0	6,6	7,1	7,5	8,4	8,8	9,2	9,5	9,7	10,0	10,2	10,3	10,4	10,4	60°
0,97	2,0	2,9	3,8	4,5	5,2	5,8	6,4	6,9	7,3	7,1	8,5	8,8	9,1	9,3	9,6	9,8	9,9	10,0	10,0	58°
0,94	2,0	2,8	3,6	4,4	5,0	5,6	6,1	6,6	7,0	7,8	8,1	8,5	8,7	8,9	9,2	9,4	9,4	9,5	9,6	56°
0,91	1,9	2,7	3,5	4,2	4,8	5,3	5,9	6,3	6,7	7,4	7,7	8,0	8,3	8,5	8,7	8,8	8,9	9,0	9,1	54°
0,87	1,8	2,5	3,3	4,0	4,6	5,0	5,6	5,9	6,3	7,0	7,3	7,5	7,8	7,9	8,1	8,3	8,4	8,4	8,5	52°
0,82	1,7	2,4	3,1	3,8	4,3	4,8	5,2	5,6	5,9	6,6	6,8	7,0	7,2	7,4	7,6	7,7	7,8	7,8	7,9	50°
0,77	1,6	2,2	2,9	3,5	4,0	4,5	4,9	5,2	5,5	6,0	6,2	6,5	6,7	6,8	6,9	7,0	7,1	7,2	7,2	48°
0,72	1,5	2,1	2,7	3,2	3,7	4,1	4,5	4,8	5,0	5,5	5,7	5,9	6,0	6,2	6,3	6,4	6,4	6,5	6,5	45°
0,65	1,4	1,9	2,4	2,9	3,4	3,7	4,0	4,3	4,5	4,9	5,1	5,2	5,4	5,5	5,6	5,6	5,6	5,7	5,7	42°
0,57	1,2	1,6	2,1	2,6	3,0	3,3	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,7	4,7	4,8	4,8	4,9	4,9	4,9	39°
0,50	1,0	1,4	1,8	2,2	2,5	2,8	3,0	3,2	3,3	3,6	3,7	3,8	3,9	3,9	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	35°
0,40	0,83	1,1	1,5	1,8	2,1	2,3	2,4	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,1	3,1	3,2	3,2	3,2	3,2	31°
0,30	0,63	0,86	1,2	1,4	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,0	2,1	2,2	2,2	2,3	2,3	2,3	2,4	2,4	2,4	27°
0,21	0,43	0,59	0,80	0,94	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4	1,4	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6	1,7	1,7	1,7	22°
0,13	0,25	0,33	0,46	0,54	0,64	0,68	0,73	0,78	0,82	0,84	0,86	0,88	0,90	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	17°
0,05	0,11	0,16	0,22	0,27	0,31	0,34	0,36	0,38	0,40	0,42	0,44	0,45	0,46	0,46	0,47	0,47	0,47	0,48	0,48	11°
0,01	0,02	0,04	0,07	0,09	0,11	0,12	0,12	0,14	0,14	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	6°
0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0	4,0	6,0	...	0°

B/d

...	50	40	35	30	28	26	24	22	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	09	08	07	06	05	04	03	02	01	0
-----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---

H/d

Valutazione della componente di riflessione esterna

Il valore della componente di riflessione esterna D_e si ottiene moltiplicando la componente cielo relativa alla frazione di finestra ostruita dall'ostruzione per la luminanza relativa dell'ostruzione, espressa come rapporto fra la luminanza dell'ostruzione e quella del cielo. Se la luminanza dell'ostruzione non è nota si suole assumere un valore di 0.1 nel caso di cielo uniforme e di 0.2 nel caso di cielo coperto internazionale.

Valutazione della componente di riflessione interna

La componente di riflessione interna D_i viene fornita da una terza tabella (tabella 3.7) in funzione di due parametri: il rapporto dell'area netta della finestra rispetto all'area del pavimento ed i coefficienti di riflessione delle pareti e del pavimento (quello del soffitto viene fissato e posto pari a 0.7).

Un'ulteriore tabella (tabella 3.8) fornisce quindi i valori correttivi per i casi in cui il coefficiente di riflessione del soffitto è compreso fra 0.4 e 0.8.

I valori riportati nelle due tabelle si riferiscono ad un ambiente quadrato di 6 metri di lato e 3 metri di altezza illuminato lateralmente, ma sono anche applicabili ad ambienti rettangolari per i quali il rapporto fra lunghezza ed altezza sia inferiore a due.

Tabella 3.7 – Componente di riflessione interna D_i .

Pavimento Pareti	r											
	10				20				40			
$\frac{A_{\text{vetro}}}{A_{\text{pavimento}}} (\%)$	20	40	60	80	20	40	60	80	20	40	60	80
	D_i											
2	-	-	0.1	0.2	-	0.1	0.1	0.2	-	0.1	0.2	0.2
5	0.1	0.1	0.2	0.4	0.1	0.2	0.3	0.5	0.1	0.2	0.4	0.6
7	0.1	0.2	0.3	0.5	0.1	0.2	0.4	0.6	0.2	0.3	0.6	0.8
10	0.1	0.2	0.4	0.7	0.2	0.3	0.6	0.9	0.3	0.5	0.8	1.2
15	0.2	0.4	0.6	1.0	0.2	0.5	0.8	1.3	0.4	0.7	1.1	1.7
20	0.2	0.5	0.8	1.4	0.3	0.6	1.1	1.7	0.5	0.9	1.5	2.3
25	0.3	0.6	1.0	1.7	0.4	0.8	1.3	2.0	0.6	1.1	1.8	2.8
30	0.3	0.7	1.2	2.0	0.5	0.9	1.5	2.4	0.8	1.3	2.1	3.3
35	0.4	0.8	1.4	2.3	0.5	1.0	1.8	2.8	0.9	1.5	2.4	3.8
40	0.5	0.9	1.6	2.6	0.6	1.2	2.0	3.1	1.0	1.7	2.7	4.2
45	0.5	1.0	1.8	2.9	0.7	1.3	2.2	3.4	1.2	1.9	3.0	4.6
50	0.6	1.1	1.9	3.1	0.8	1.4	2.3	3.7	1.3	2.1	3.2	4.9
Fattore di correzione	x 1.9	x 1.5	x 1.3	x 1.2	x 1.8	x 1.4	x 1.3	x 1.2	x 1.6	x 1.4	x 1.2	x 1.1

Tabella 3.8 – Valori correttivi per D_i per coefficienti di riflessione compresi fra 40 ed 80.

r_{tetto}	fattore di correzione
40	0.7

50	0.8
60	0.9
70	1.0
80	1.1

Se tale rapporto è maggiore, si può fare riferimento ad un'ultima tabella (tabella 3.9) che riporta fattori di correzione per ambienti di dimensioni diverse.

Tabella 3.9 – Fattori di correzione per D_i per ambienti di dimensioni diverse.

Dimensioni (m)	$r_{pareti}(\%)$			
	20	40	60	80
3x3x3	0.6	0.7	0.8	0.9
9x9x3	1.4	1.1	1.0	0.9

Va osservato come, non essendo il valore di D_i in generale costante, soprattutto nel caso di illuminazione laterale (assumendo i valori minimi nelle aree più distanti dalla finestra), e prescrivendo frequentemente le norme i valori da assumere nelle condizioni più sfavorevoli, quelli riportati nelle tabelle sono da considerarsi valori minimi.

Una riga in calce alla tabella riporta comunque alcuni fattori correttivi che consentono di ottenere i corrispondenti valori medi, che possono essere considerati come i valori più prossimi a quelli relativi al centro della stanza: tali fattori risultano particolarmente utili ad esempio nel caso di due finestre situate in pareti opposte.

Quando nell'ambiente sono invece presenti due finestre, si possono distinguere due casi:

- c) finestre collocate su pareti adiacenti;
- d) finestre collocate su pareti opposte.

Nel primo caso il procedimento del calcolo del D_i è identico a quello visto per una sola finestra, salvo che nei calcoli al valore della superficie dell'unica finestra andrà sostituita la somma delle aree delle due finestre.

Nel secondo caso bisogna invece calcolare il coefficiente di riflessione medio delle pareti su cui sono ubicate le finestre, considerando la superficie vetrata di una sola di esse come quota di parete avente coefficiente di riflessione r pari a 0.15.

Si legge quindi il valore minimo del D_i in funzione del coefficiente di riflessione medio pesato delle pareti, di quello del soffitto e del rapporto fra l'area della superficie vetrata delle due finestre e quella del pavimento; dal valore del D_i minimo si passa successivamente al suo valore medio.

Valutate quindi tutte e tre le componenti si può verificare l'efficienza della finestra, ossia verificare che il valore di D superi il 4%.

Un altro metodo di verifica che può essere seguito è quello di considerare un valore dell'illuminamento esterno pari a 5000 lux e di determinare quindi il valore ottimale del fattore di daylight in funzione dell'illuminamento medio che si desidera. Fissato ad esempio tale valore in 200 lux si ha:

$$D = \frac{200\text{lux} \cdot 100}{5000\text{lux}} = 4\% .$$

Tale metodo risulta tuttavia molto approssimato poiché al variare della latitudine, dell'altezza solare, dell'assenza di nubi, ecc., il valore dell'illuminamento esterno può differire anche notevolmente dal valore di 5000 lux (da 5000 a 28000 lux).

Il calcolo delle dimensioni di una finestra atta a garantire un determinato fattore di daylight viene effettuato quindi, in prima approssimazione, prendendo in considerazione solo la componente cielo, visto che è la componente di maggior peso nel calcolo.

Scegliendo come punto di riferimento un punto situato perpendicolarmente alla mezzera della finestra da calcolare, metà della componente cielo, ossia il 2%, sarà data da ognuna delle parti di finestra situata su ciascun lato della normale.

Si procede cercando quindi sulle tabelle il valore 2% ed i corrispondenti valori di H/d e B/d. Tuttavia il valore del 2% è individuato da più coppie di valori H/d e B/d, per cui scegliere l'una o l'altra coppia dipende da altri fattori geometrici della stanza, quale ad esempio l'altezza della finestra.

Per vedere poi se è più vantaggioso aumentare l'altezza o l'ampiezza della finestra si può fare uso delle curve riportate nella figura 3.11: da essa si vede chiaramente come un aumento dell'area di una finestra dovuto all'aumento dell'altezza produca un effetto maggiore di un aumento dell'ampiezza.

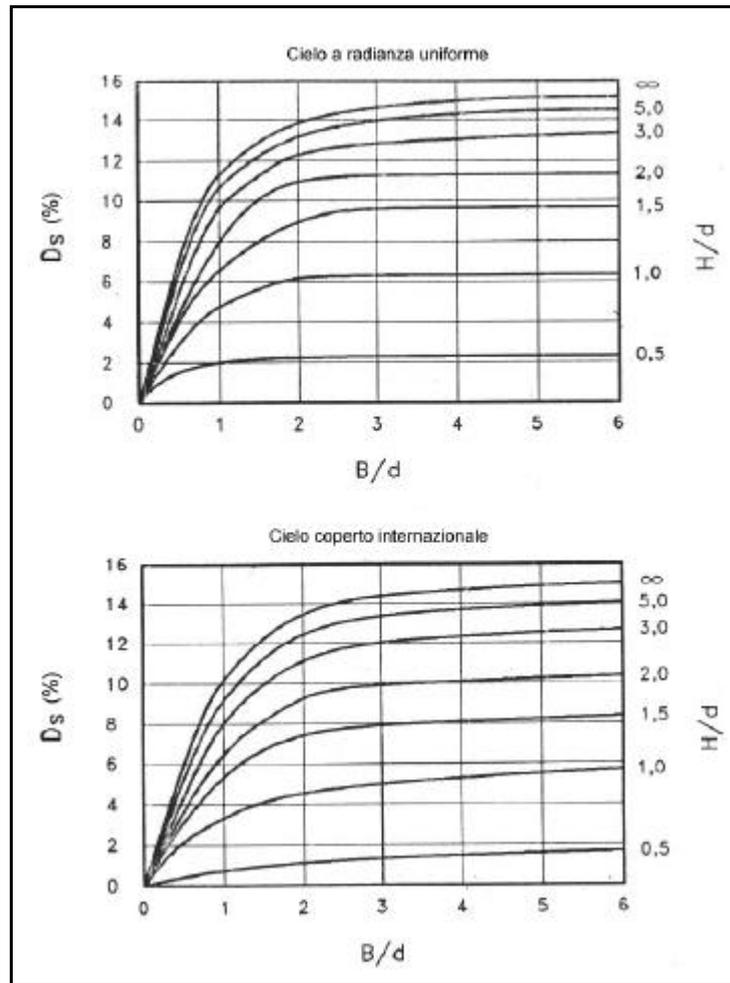


Figura 3.11 – Andamento della componente cielo D_s in funzione delle dimensioni della finestra.

Dalle curve si nota inoltre come il vantaggio ottenuto con l'aumentare dell'altezza della finestra sia maggiore nel caso di cielo coperto internazionale.

In figura 3.12 è riportato inoltre l'andamento dei valori del Daylight Factor D e della sua componente cielo D_c in funzione della distanza d , per diverse altezze di finestra H .

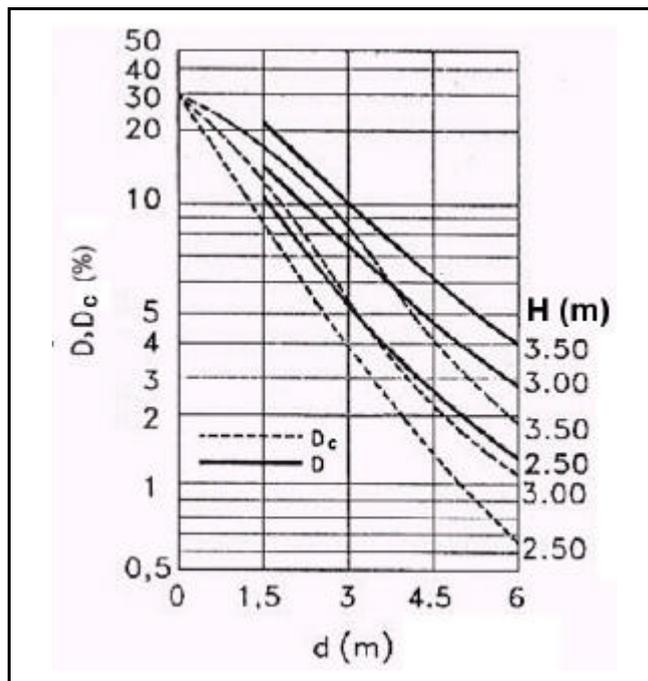


Figura 3.12 – Andamento del fattore di Daylight D e della sua componente cielo D_c in funzione della distanza d per diverse altezze H della finestra.

4. Illuminazione artificiale

4.1 Sorgenti luminose artificiali

Le sorgenti artificiali di luce servono a sopperire alla carenza di illuminamento naturale. Esse sono generalmente costituite da due parti, *l'apparecchio illuminante e la lampada*.

In particolare la lampada è preposta alla conversione di energia elettrica in flusso luminoso, mentre l'apparecchio illuminante ha la funzione di distribuire tale flusso in maniera opportuna.

4.2 Apparecchi illuminanti

Gli apparecchi illuminanti costituiscono un complemento indispensabile a qualsiasi sorgente luminosa, assicurando una triplice funzione: di natura elettrica, meccanica e fotometrica. Costruttivamente essi possono essere considerati composti da due parti:

- a) la *carcassa*, con funzioni elettriche e meccaniche;
- b) il *sistema ottico*, che ha propriamente la funzione di modificare il flusso luminoso uscente da una sorgente ed indirizzarlo in maniera opportuna.

Essi rappresentano pertanto manufatti tecnologici (lampadari, plafoniere, faretto, ecc.) che fungono da involucro per l'alloggiamento, la protezione meccanica, termica ed elettrica della sorgente luminosa. In particolare essi comprendono tutti i componenti necessari al sostegno, al fissaggio ed alla protezione della lampada (con esclusione della stessa) da qualsiasi agente esterno che possa comportare un deterioramento o una diminuzione delle qualità ottiche, includendo anche, quando presenti, i circuiti ed i dispositivi ausiliari (ad esempio i trasformatori) per il collegamento alla linea di alimentazione.

Dal punto di vista illuminotecnico, gli apparecchi assolvono la funzione di distribuire, filtrare e/o trasformare la luce emessa da una o più lampade sfruttando le proprietà di riflessione, rifrazione e diffusione dei materiali che li costituiscono.

Si definisce *rendimento* di un apparecchio il rapporto:

$$\eta = \frac{\Phi_{\text{apparecchio}}}{\Phi_{\text{lampada}}}$$

Generalmente i valori di η sono compresi fra 0.4 e 0.8. La frazione di flusso luminoso emesso dalla sorgente che viene assorbita dall'apparecchio viene quindi dispersa sotto forma di calore.

4.2.1 Tipologie di apparecchi illuminanti

Diffusori

Hanno lo scopo di schermare la visione diretta della lampada e - grazie alla loro geometria simmetrica, di solito rispetto ad un asse - modificarne il solido fotometrico in maniera tale che il flusso luminoso uscente risulti uniforme in tutte le direzioni (figura 4.1).

Essi vengono impiegati principalmente per esterni residenziali e costitutivamente hanno solitamente la forma di globo di materiale traslucido (vetro, plastica, ecc.).

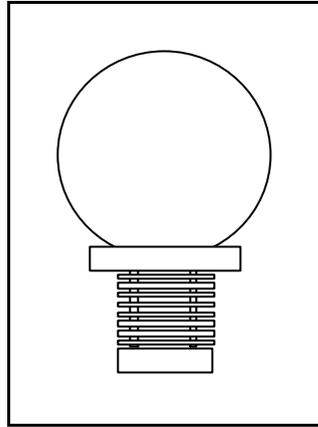


Figura 4.1 - Diffusore.

Riflettori

I riflettori modificano il solido fotometrico della sorgente sfruttando le proprietà di riflessione ed inibiscono la visione della lampada solo in certe direzioni.

Costruttivamente sono costituiti da un involucro di materiale opaco con la faccia interna trattata in modo da avere un elevato coefficiente di riflessione (figura 4.2).

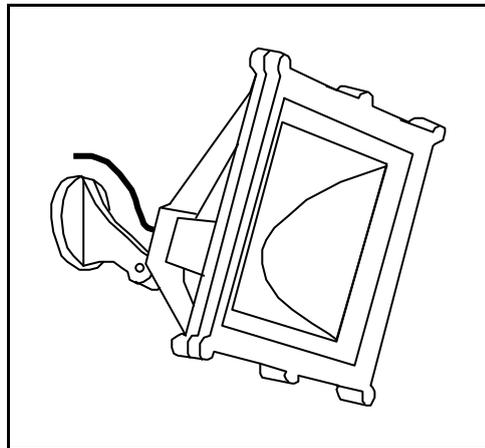


Figura 4.2 - Riflettore.

Rifrattori

Servono a modificare il solido fotometrico di emissione permettendo il controllo direzionale della luce ed evitando pericoli di abbagliamento. La modifica della distribuzione spaziale del flusso emesso dalla sorgente avviene sfruttando soprattutto il fenomeno della rifrazione.

Costruttivamente sono costituiti da un involucro di vetro o plastica che può contenere parzialmente o totalmente la sorgente (figura 4.3).

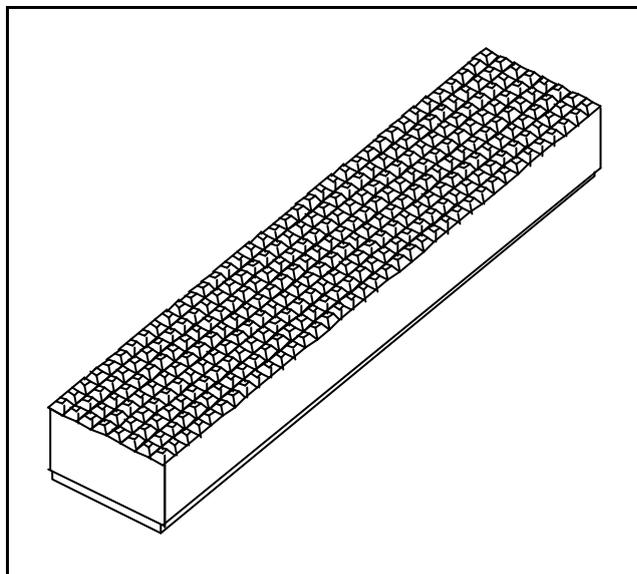


Figura 4.3 - Rifrattore.

Proiettori

Hanno lo scopo di indirizzare in una certa direzione ed entro un angolo solido ristretto il flusso luminoso emesso da una sorgente, per illuminare in maniera particolare alcune zone o oggetti (figura 4.4).

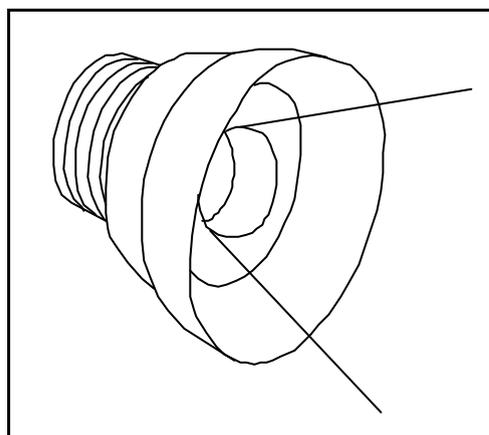


Figura 4.4 - Proiettore.

4.2.2 Classificazione degli apparecchi

Secondo una classificazione CIE (*Commission International de l'Eclairage*) gli apparecchi possono essere suddivisi, in base alla distribuzione spaziale del flusso luminoso emesso al di sopra ed al di sotto del piano orizzontale passante per il loro centro, nelle seguenti tipologie (figura 4.5):

a) apparecchi per illuminazione *diretta*, nei quali il flusso viene emesso prevalentemente (90-100%) verso il basso e per una parte minima (0-10%) verso l'alto. E' il tipo di illuminazione più economico perchè gli apparecchi illuminanti sono semplici, a buon prezzo, e ad elevato rendimento.

Con questo tipo di illuminazione l'assorbimento da parte dei muri e del soffitto è trascurabile, ma le ombre sono marcate e conviene usare più sorgenti luminose per attenuarle. Essa risulta conveniente sia negli esterni, che nei laboratori o negli uffici;

b) apparecchi per illuminazione *semidiretta*, nei quali il flusso viene emesso in gran parte (60-90%) verso il basso e per una parte minore (10-40%) verso l'alto. Adottando questo tipo di illuminazione le ombre sono attenuate. Inoltre la parte di flusso diffusa dal soffitto contribuisce ad elevare il rendimento globale dell'installazione ed evita le zone d'ombra sopra gli apparecchi. Essa viene utilizzata prevalentemente in uffici, abitazioni, mense, ecc.;

c) apparecchi per illuminazione generale *diffusa*, nei quali il flusso viene emesso, con distribuzione diffusa, in parte (40-60%) verso il basso ed in parte (40-60%) verso l'alto. E' il tipo di illuminazione adottata nei grandi magazzini;

d) apparecchi per illuminazione *mista* (o *diretta-indiretta*), nei quali il flusso viene emesso senza diffusione sia verso l'alto (40-60%) che verso il basso (40-60%). Questo tipo di illuminazione può essere usato solo in locali con pareti molto riflettenti per questioni di rendimento luminoso. Poichè il contributo delle pareti risulta fondamentale, occorrerà curare la pulizia sia dei locali che delle plafoniere;

e) apparecchi per illuminazione *semiindiretta*, nei quali il flusso viene emesso in gran parte (60-90%) verso l'alto e per una parte minore (10-40%) verso il basso. Questo tipo di illuminazione comporta un basso rendimento, migliorato un po' dalla componente diretta e dalla geometria del diffusore, aperto verso l'alto; richiede inoltre soffitti molto chiari;

f) apparecchi per illuminazione *indiretta*, nei quali il flusso viene emesso prevalentemente (90-100%) verso l'alto ed in minima parte (0-10%) verso il basso. Questo tipo di illuminazione dà grande uniformità di illuminamento, ma obbliga all'installazione di lampade di grande potenza, avendo generalmente un rendimento basso. Viene usato per ottenere particolari risultati estetici o per porre in rilievo particolari architettonici: pertanto è riservato soprattutto alle sale di spettacolo, alcuni ristoranti, musei, ecc.

In figura 4.6 è riportato un esempio di andamento delle curve fotometriche relative ai diversi tipi di illuminazione. Nella stessa figura è riportata inoltre un'ulteriore organizzazione delle tipologie di apparecchi in venti classi, indicate dalla A alla T (che vanno dalla diretta più concentrata all'indiretta), stabilite dalla CIE per classificare il gran numero di possibili ripartizioni spaziali di flusso luminoso.

La classe di un apparecchio viene definita in base al flusso F_i emesso in 5 diverse porzioni spaziali, ottenute suddividendo lo spazio attorno al centro fotometrico in 5 coni di rivoluzione intorno all'asse dell'apparecchio, aventi angolo solido pari rispettivamente a $\pi/2$, π , $3/2 \pi$, 2π ster (emisferi inferiore e superiore) (figura 4.7). I valori del flusso emesso nelle diverse porzioni spaziali vengono forniti dai costruttori o possono essere determinati a partire dalla conoscenza della curva fotometrica.

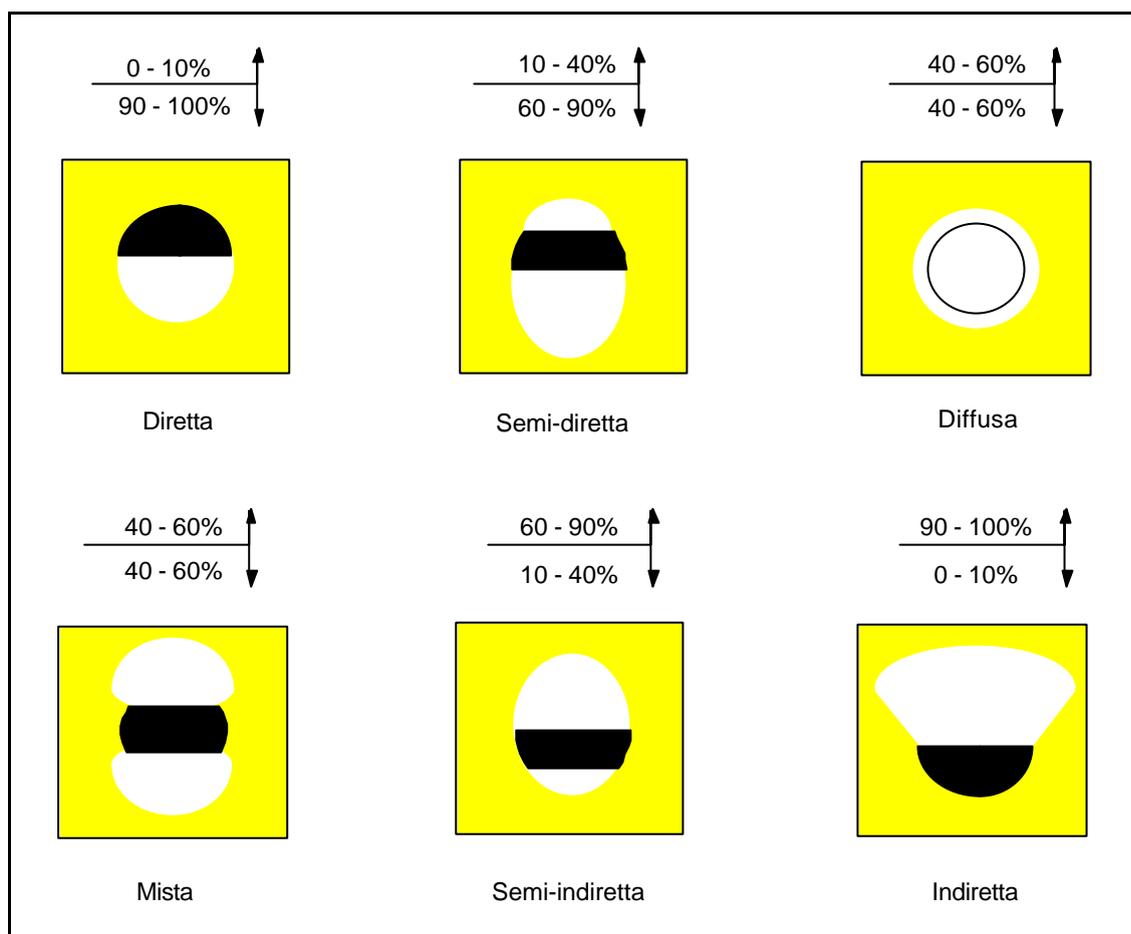


Figura 4.5 - Principali tipi di illuminazione.

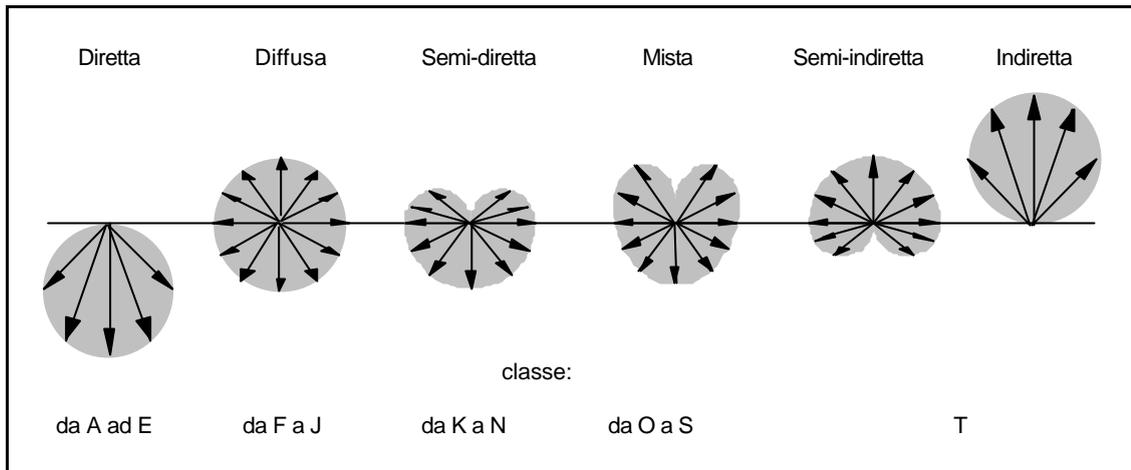


Figura 4.6 - Esempi di andamento di curve fotometriche per i diversi tipi di illuminazione.

Utilizzando i valori degli F_i si può definire un rendimento dell'apparecchio η_i , relativo al flusso emesso della sorgente all'interno e non al di fuori dell'apparecchio stesso, che risulta dato da:

$$\eta_i = \frac{F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5}{F_{tot}}$$

dove F_{tot} rappresenta il flusso totale emesso in tutte le direzioni.

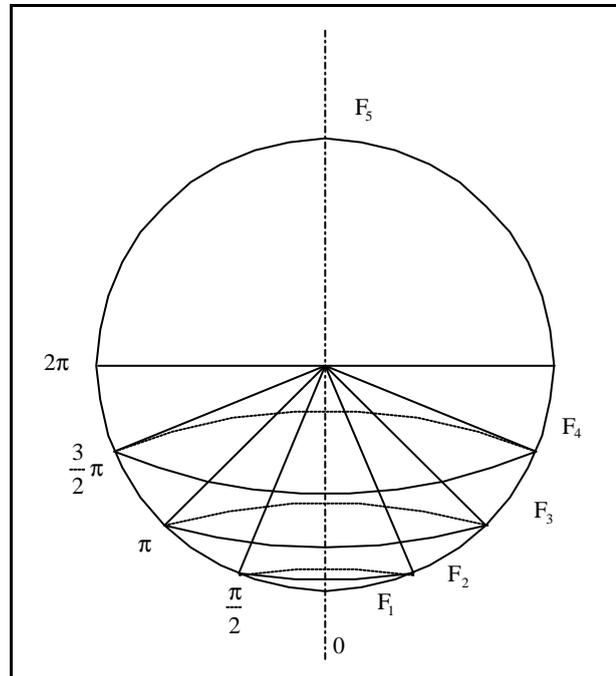


Figura 4.7- Angoli solidi di riferimento per la definizione della classe di un apparecchio.

4.3 Lampade

4.3.1 Parametri caratteristici di una lampada

Per caratterizzare le prestazioni di una lampada vengono definiti alcuni parametri, specificati dal costruttore, che forniscono al progettista gli elementi per il calcolo e le valutazioni economiche:

- a) *flusso luminoso*;
- b) *temperatura di colore*;
- c) *resa cromatica*;
- d) *durata di vita*;
- e) *efficienza luminosa*.

Per le lampade a scarica (vedi par. 4.3.5) è importante inoltre specificare il valore del tempo di accensione e riaccensione.

b) Essendo il colore di una radiazione luminosa emessa da un corpo ad alta temperatura legato alla sua temperatura, una convenzione internazionale CIE ha stabilito di caratterizzare la tonalità di colore della luce emessa da una sorgente luminosa per confronto con quella emessa da un corpo nero riscaldato ad una temperatura compresa fra 2.000 e 10.000 K, tramite una grandezza termica denominata temperatura di colore, definita come "la temperatura di un corpo nero che emette una luce dello stesso colore di quella emessa dalla sorgente considerata".

Le tonalità di colore per temperature crescenti vanno dal rosso (2.000 K) al giallo, al bianco della luce solare (5.000 K) fino all'azzurro (10.000 K): pertanto la luce rossastra ha una bassa temperatura di colore, mentre la luce bluastra alta. In pratica le sorgenti con temperatura di colore compresa fra 2.000 e 4.000 K emettono una luce bianca calda, cioè ricca di radiazioni rosse, mentre quelle con temperatura di colore superiore emettono luce bianca fredda, cioè ricca di radiazioni blu.

L'associazione di una temperatura di colore ad una sorgente è possibile sempre che questa abbia una distribuzione spettrale dell'energia molto simile a quella del corpo nero (luce solare, lampade ad incandescenza, candele, ecc.). Tale parametro si mostra tuttavia ancora idoneo a dare un'indicazione abbastanza significativa del colore per gran parte delle lampade a fluorescenza (vedi par. 4.3.6), mentre non risulta efficace per le sorgenti di luce colorata (come le lampade a vapori di sodio ed in generale tutte le lampade a scarica), che hanno uno spettro che si discosta notevolmente da quello del corpo nero.

Ove possibile ogni sorgente artificiale di luce dovrebbe tendere a raggiungere la temperatura di colore della luce solare diretta, poichè in questo modo la visione che si ottiene fornisce la stessa sensazione gradevole della luce naturale. Tuttavia per valori bassi dell'illuminamento, quali quelli che si riscontrano spesso negli ambienti interni con illuminazione artificiale, può riuscire più gradevole una luce più rossastra, cioè di minore temperatura di colore (quella che si suole indicare in linguaggio corrente come luce più *calda*).

c) La resa cromatica di una sorgente luminosa esprime invece la capacità che essa ha di illuminare le superfici riproducendone fedelmente i colori: uno stesso oggetto, infatti, illuminato da sorgenti diverse, appare illuminato diversamente. L'impressione di colore che noi percepiamo è infatti determinata dalle lunghezze d'onda dello spettro presenti nella luce incidente che poi viene riflessa.

Se si fa riferimento ad un corpo nero di pari temperatura di colore, la distorsione prodotta nella colorazione dell'oggetto stesso da diverse sorgenti può essere valutata in base agli scarti cromatici. In particolare la CIE ha definito un *indice di resa cromatica* R_g da attribuire alla sorgente, variabile da 0 per una luce monocromatica a 100 per un corpo nero, che si ricava da una serie di prove con un set di colori campione, illuminati prima da una sorgente luminosa di riferimento e poi dalla lampada di cui si vuole stimare la resa cromatica: più l'indice si approssima a 100, tanto più fedele risulta l'apprezzamento dei colori.

d) La durata di vita può essere precisata ricorrendo a quattro diverse quantità (Moncada Lo Giudice e de Lieto Vollaro, 1993):

- *la vita media*, che indica il numero di ore di funzionamento dopo il quale il 50% delle lampade di un lotto in certe condizioni di prova, cessa di funzionare;
- *la vita economica*, che indica il numero di ore di funzionamento dopo il quale il livello di illuminamento di una lampada è diminuito del 30%;
- *la curva media di mortalità*, che costituisce la rappresentazione grafica della percentuale di lampade funzionanti in un lotto al variare delle ore di accensione;
- *la curva di decadimento*, che è data dalla rappresentazione grafica dell'andamento del flusso di emissione di una lampada, espresso in percentuale del flusso iniziale, al variare delle ore di funzionamento (figura 4.8).

e) L'efficienza luminosa rappresenta una misura dell'attitudine di una lampada ad emettere luce in rapporto alla potenza elettrica assorbita e viene definita mediante il rapporto tra il flusso luminoso f emesso e la potenza elettrica P assorbita:

$$\eta = \frac{\Phi}{P}.$$

In generale l'efficienza è tanto più elevata quanto minore è la potenza elettrica che all'interno della lampada si trasforma in calore.

Tale parametro è quello più importante ai fini del risparmio energetico.

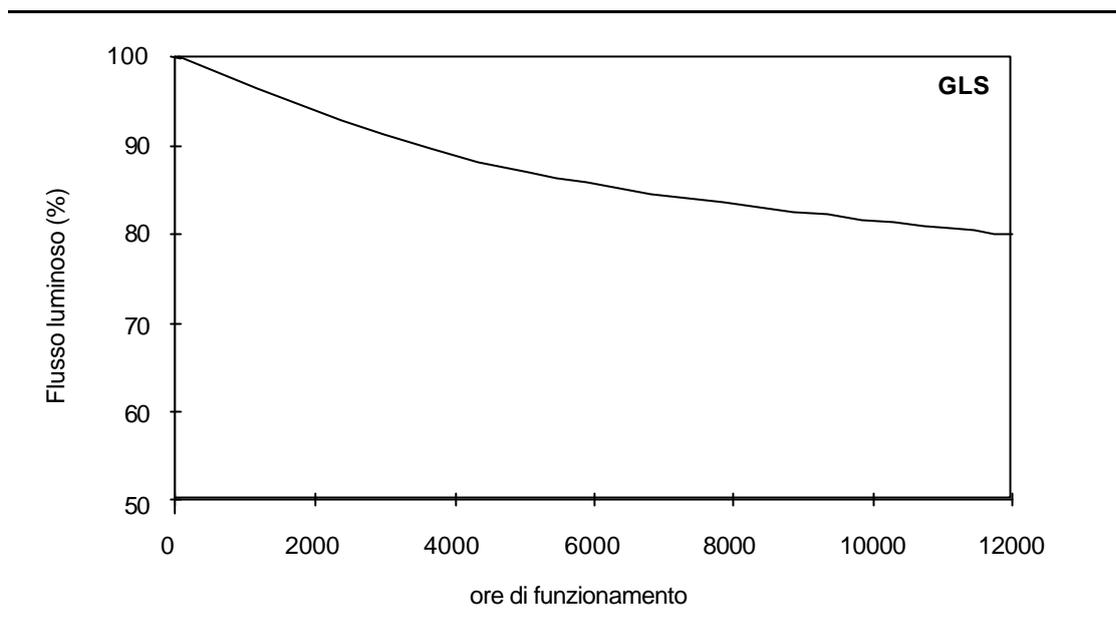


Figura 4.8 - Esempio di curva di decadimento di una lampada.

4.3.2 Classificazione delle lampade

Qualsiasi sorgente luminosa trasforma l'energia elettrica che consuma in una o più delle seguenti forme di energia: chimica, termica ed elettromagnetica. Le radiazioni luminose costituiscono pertanto solo una piccola parte della potenza della sorgente.

Sulla base del diverso principio fisico su cui si basa la produzione di radiazioni luminose le lampade possono essere distinte in tre grandi gruppi (figura 4.9):

- a) ad incandescenza;
- b) a scarica;
- a) fluorescenti.

Tuttavia storicamente le prime sorgenti artificiali di luce ad essere utilizzate furono le lampade a combustione, per cui nel seguito premetteremo qualche breve cenno sul loro funzionamento.

In tabella 4.1 sono presentati sinteticamente valori indicativi delle principali caratteristiche dei diversi tipi di lampade.

E' evidente come le lampade ad incandescenza siano caratterizzate da bassa efficienza luminosa, vita media breve, buona resa cromatica, bassa temperatura di colore, oltre ad avere, in generale, alta luminanza. Di contro le lampade fluorescenti presentano i maggiori valori dell'efficienza luminosa (i più alti sono da attribuire alle lampade al sodio), lunga durata, ma minore luminanza e resa cromatica decisamente peggiore, oltre ad essere in generale (escluso le lampade compatte) più voluminose ed a richiedere un alimentatore per il loro funzionamento.

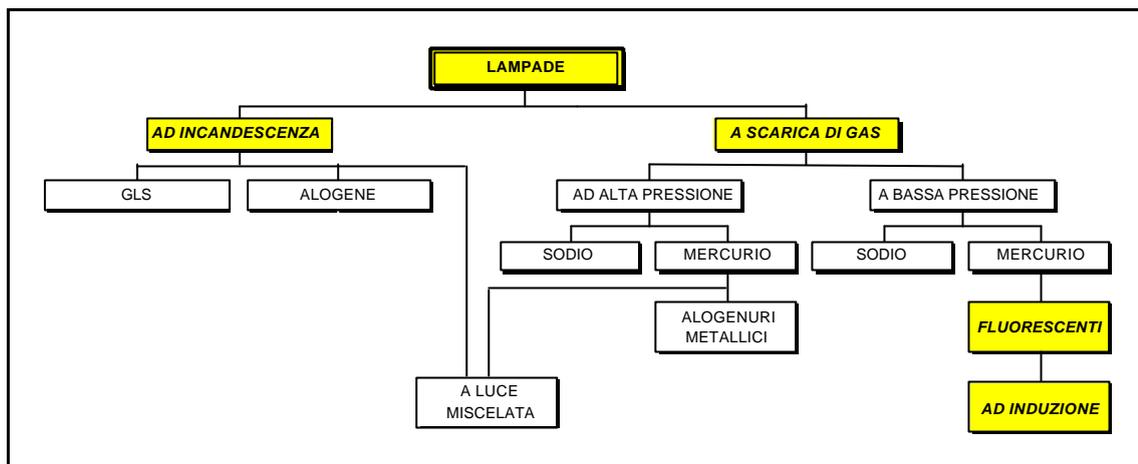


Figura 4.9 - Classificazione dei diversi tipi di lampade.

4.3.3 Lampade a combustione

Sul fenomeno dell'emissione luminosa prodotta dalla combustione si basarono tutte le sorgenti artificiali di luce utilizzate in passato (torce, candele, lucerne ad olio, lampade a gas), finché non entrarono in uso le prime lampade ad incandescenza ad opera di Edison (1879). Attualmente l'interesse per questo tipo di sorgente è limitato ad alcune lampade portatili e a pochi altri casi.

Tabella 4.1 - Valori tipici dei principali parametri caratteristici dei diversi tipi di lampade.

Tipo di lampada	Efficienza luminosa (lm/W)	Temperatura di colore (K)	Resa cromatica	Vita media (h)
Ad incandescenza GLS	10-20	2700-3000	100	1000
Ad incandescenza Alogene	25-30	3200	100	2000
A scarica al sodio a bassa pressione	200	-	0	8.000-10.000
A scarica al sodio ad alta pressione	> 100	2.200-4.200	60	5.000-12.000
A scarica al mercurio ad alta pressione	35-50	2150	60	8.000-9.000
Ad alogenuri metallici e terre rare	95	3000-6000	65-80	6000
Fluorescenti	85-95	3.000-6.500	85	5.000-7.500
A luce miscelata	20-30	3.000-4.000	40-75	5.000-7.500
Ad induzione	65	3.000-4.000	>80	60.000

Tali lampade sfruttano direttamente la luminosità dei gas caldi costituenti la fiamma e, soprattutto, quella delle particelle solide incandescenti presenti in essa, che mostrano un'emissione termica simile a quella di un corpo nero di pari temperatura.

Esse presentano un rendimento luminoso molto basso poiché solo una piccola parte dell'energia spesa si traduce in emissione di energia radiante, mentre una gran parte dell'energia

chimica spesa si perde con l'allontanamento dei fumi caldi e quindi con il riscaldamento convettivo dell'aria, oltre che per un'incompleta combustione. Inoltre non essendo mai elevata la temperatura dei corpi emittenti, la gran parte dell'energia irradiata è costituita da radiazioni non visibili.

Per migliorare la composizione spettrale dell'energia irradiata si può usare la reticella di *Auer*, utilizzata soprattutto nelle lampade a gas, che consiste in una reticella di cotone posta intorno alla fiamma, impregnata di un'adatta miscela di sostanze (ossidi di torio e cerio) a bassa emissività integrale, ma elevata emissività spettrale nel campo del visibile.

4.3.4 Lampade ad incandescenza

Le lampade ad incandescenza sono storicamente le più antiche ed ancora oggi le più diffuse; il loro successo nel tempo è dovuto al buon compromesso che esse realizzano fra vita media, efficienza luminosa e prezzo.

Il modello più comune di lampade ad incandescenza è costituito dalle lampade *GLS* (*General Lighting Service*) (figura 4.10). Il primo brevetto di queste lampade risale ad Edison, nel 1841, ma solo nel 1880 esse furono effettivamente commercializzate.

Esse sono costituite da uno zoccolo e da un bulbo di vetro al cui interno è presente un filamento che, quando la lampada è collegata al circuito di alimentazione, risulta percorso da una corrente elettrica che lo riscalda fino all'incandescenza, facendogli emettere energia radiante comprendente anche le lunghezze d'onda del visibile.

L'emissione del filamento è regolata dalla legge di Planck trattandosi, generalmente, di un materiale assimilabile ad un corpo nero o grigio di elevata emissività (figura 4.11). Esso emette pertanto su tutto lo spettro, per lunghezze d'onda comprese fra 0 ed ∞ , e l'emissione decresce fino ad annullarsi per $\lambda \rightarrow 0$ e $\lambda \rightarrow \infty$.

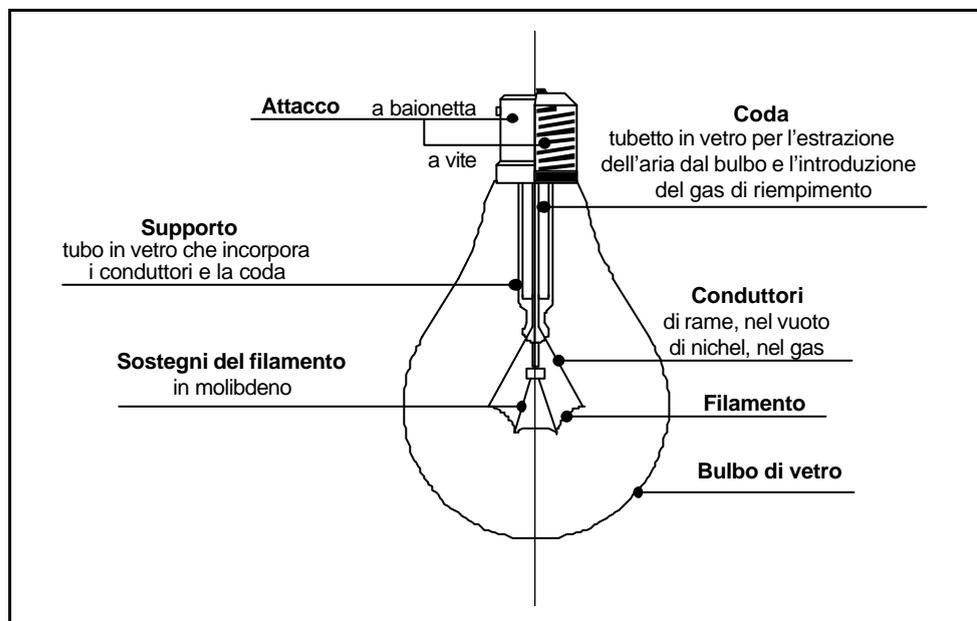


Figura 4.10 - Lampada ad incandescenza GLS.

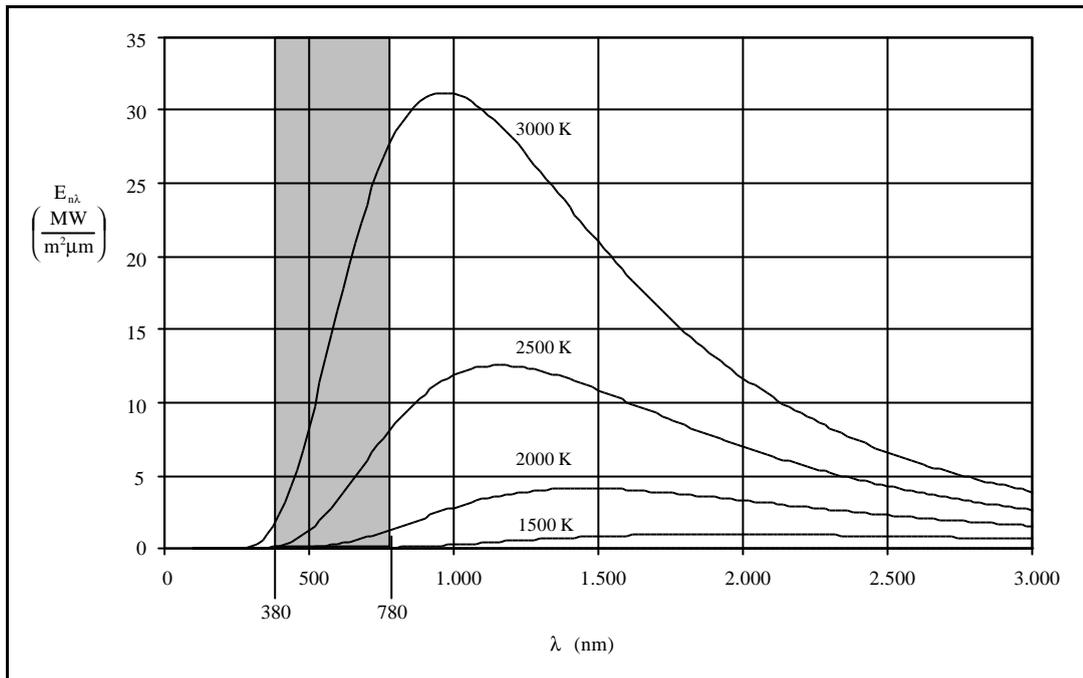


Figura 4.11 – Spettro di emissione del corpo nero.

Il massimo di emissione si ha, per la legge di Wien, per

$$\lambda_{\max} = \frac{2.9 \cdot 10^6}{T} \text{ nm.}$$

Tale massimo si sposta, al crescere della temperatura, dal lontano infrarosso ($T = 1.500 \text{ K}$) sempre più nel campo del visibile ($T = 3.000 \text{ K}$). In particolare, affinché esso venga a cadere a $\lambda = 555 \text{ nm}$, cui corrisponde la massima sensazione di visibilità, è necessario che il filamento raggiunga una temperatura pari a 5.225 K , troppo elevata per qualsiasi materiale: pertanto nella pratica il massimo dell'emissione cade prevalentemente nel campo della radiazione infrarossa.

Nei primi modelli, fino al 1913, il filamento era lineare e costituito da carbone; esso funzionava a $\sim 1800 \text{ }^\circ\text{C}$, non potendosi andare a temperature superiori per evitare la sublimazione del carbonio. Tale fenomeno va in generale evitato per due ragioni: perché produce una troppo rapida distruzione del filamento che, perdendo materia, si indebolisce e si rompe, e per il successivo depositarsi dei vapori emessi sulla superficie interna dell'ampolla di vetro annerendola e diminuendo quindi la trasparenza del vetro e, di conseguenza, il flusso luminoso emesso.

A $1800 \text{ }^\circ\text{C}$ il massimo dell'emissione è situato a $\lambda \cong 1400 \text{ nm}$, mentre solo una piccola parte dell'energia irradiata cade nel campo delle radiazioni visibili. Inoltre le lampade lavoravano con bassissime pressioni nell'ampolla: in essa infatti veniva fatto il vuoto per ritardare l'ossidazione del filamento ed impedirgli di bruciare; tuttavia la bassa pressione aveva, insieme con l'alta temperatura, l'effetto indesiderato di accelerare la sublimazione del carbonio.

Tale problema costituì per lungo tempo, una limitazione all'innalzamento della temperatura, che veniva mantenuta molto al di sotto della temperatura di fusione, finché non si potè adottare il

tungsteno, una volta messe a punto le tecniche necessarie per la sua lavorazione in fili abbastanza sottili di adeguate caratteristiche elettriche e meccaniche.

Tale materiale, per il suo punto di fusione molto elevato (3770 K) consente di raggiungere temperature molto alte (2.700 ÷ 3.000 K, non dovrebbe comunque superare i 2500°C nel vuoto ed i 2800°C nel gas inerte), garantendo quindi emissioni ad elevata energia con lunghezze d'onda che cadono nel visibile.

Esso presenta inoltre notevoli qualità di duttilità e resistenza elettrica e meccanica che consentono nelle lampade attualmente in commercio, a differenza dei primi tipi prodotti, di avvolgerlo a doppia elica per aumentarne la resistenza meccanica e consentire una minima dispersione di calore.

Per potenze superiori a 25 W nell'ampolla vengono in genere introdotti dei gas inerti, più frequentemente miscele di argon ed azoto (ma anche, per applicazioni speciali, kripton o idrogeno) che diminuiscono la sublimazione del filamento, anche se così facendo viene ad attivarsi una certa trasmissione del calore per convezione tra il filamento, il gas ed il vetro, che abbassa la temperatura del filamento e conseguentemente ne riduce l'efficienza. In generale il miglior gas di riempimento è il kripton poichè, oltre ad avere una sufficiente inerzia chimica, presenta un basso valore della conducibilità termica.

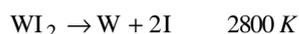
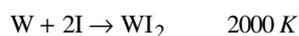
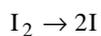
Le lampade ad incandescenza sono tuttavia caratterizzate da un'emissione di calore nettamente prevalente rispetto a quella di radiazioni luminose ed è per tale ragione che la loro efficienza è poco elevata, mediamente variabile dai 10 ai 20 lm/W, con i valori più elevati per le potenze maggiori.

La loro vita media è di ca. 1000 ore, con un flusso luminoso finale pari all'87% di quello iniziale. La temperatura di colore coincide con la temperatura del filamento ed è pertanto variabile da 2.700 K a 3000 K. Per aumentarne il valore si usa colorare di azzurro il vetro dell'ampolla: in questo modo si ottiene una luce meno rossastra e più gradevole per alcune applicazioni. Tuttavia così facendo si riduce sia il flusso luminoso emesso, che in parte viene assorbito dal vetro colorato, che l'efficienza.

Lampade ad alogeni

Un ulteriore sviluppo di questo tipo di sorgente luminosa è rappresentato dalle lampade ad alogeni, nelle quali nel bulbo viene inserita una piccola quantità di gas alogeno (generalmente iodio, bromo o cloro) che contrasta molto efficacemente l'evaporazione del tungsteno.

La presenza di tali sostanze, in aggiunta ai gas inerti, consente l'instaurarsi di un ciclo rigenerativo del tungsteno dato dalle seguenti reazioni:



Nella zona della lampada a più bassa temperatura i vapori di tungsteno che si liberano dal filamento si combinano chimicamente con lo iodio presente, formando ioduro di tungsteno gassoso (WI_2) o altri composti analoghi. Tale composto, migrando verso la zona del filamento caldo, si scompone quindi nei suoi elementi dando luogo alla formazione di tungsteno metallico che si deposita nuovamente sul filamento. In tal modo si rideposita la gran parte del tungsteno sublimato,

rallentando notevolmente sia il processo di erosione del filamento che quello di deposizione sull'interno dell'ampolla.

In tali condizioni inoltre il filamento può essere attraversato da una corrente più intensa, consentendo di raggiungere temperature (~3200 K) e conseguentemente flussi più elevati (ciò necessita tuttavia che il bulbo venga realizzato con vetro al quarzo, per la sua capacità di sopportare le alte temperature necessarie); si accresce quindi sia l'efficienza luminosa, che mediamente è di 25 lm/W, ma può arrivare fino a 30 lm/W, che la temperatura di colore (luce più bianca).

L'indice di resa cromatica è pari a 100, la vita media è di 2000 ore ed il flusso luminoso finale pari al 94% di quello iniziale.

Per le loro particolari caratteristiche queste lampade trovano applicazione sia nell'illuminazione di interni che in quella esterna di grossi complessi, per riprese fotografiche, nei fari degli autoveicoli, ecc.

4.3.5 Lampade a scarica di gas

Nelle lampade a scarica la produzione di luce è dovuta all'emissione di radiazioni luminose da parte di un gas preventivamente eccitato (l'eccitazione consiste nell'allontanamento dall'orbita stabile degli elettroni ad opera di altri elettroni accelerati dal campo elettrico): quando un elettrone ritorna nella sua orbita stabile viene emesso un quanto di energia luminosa pari alla differenza di energia fra i due stati.

Essendo le orbite elettroniche definite, i salti energetici sono anch'essi definiti e caratteristici del gas che riempie l'ampolla; ad una fissata energia corrisponde pertanto una ben definita lunghezza d'onda e quindi un preciso colore (figura 4.12). Conseguentemente queste sorgenti emettono una luce composta da radiazioni caratteristiche del gas e lo spettro è discontinuo (a righe).

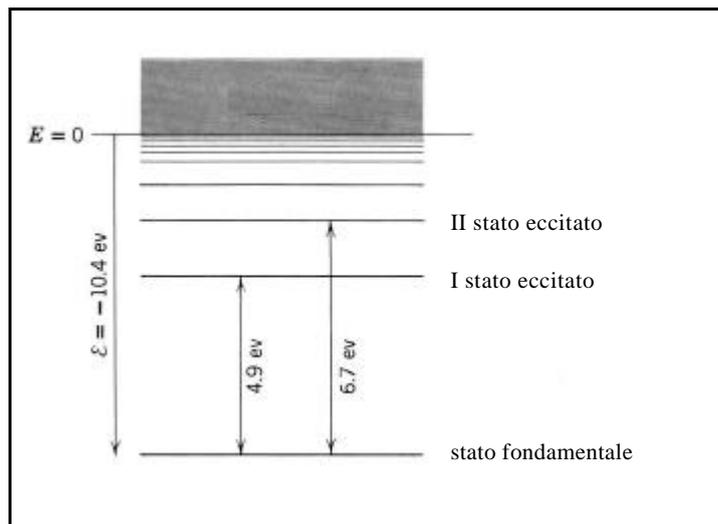


Figura 4.12– Schema esemplificativo dei livelli energetici nell'atomo di mercurio.

A differenza delle lampade ad incandescenza, nelle quali la luce emessa può essere considerata come un sottoprodotto della trasformazione dell'energia elettrica in energia termica, in quelle a scarica la luce viene ottenuta per trasformazione diretta dell'energia elettrica in energia luminosa. È per questo che esse sono caratterizzate da un'efficienza luminosa notevolmente maggiore rispetto a quelle a filamento, variabile da 35 a 200 lm/W .

Anche la vita media è superiore a quella delle lampade ad incandescenza e varia da 5000 a 12000 ore a seconda del tipo di lampada. Per contro, generalmente queste lampade non rispondono altrettanto bene ai requisiti di resa cromatica.

Esse sono essenzialmente costituite da un contenitore, generalmente di vetro o quarzo, nel quale si trova un aeriforme adatto (vapori metallici, in particolare di sodio o di mercurio, poichè le radiazioni da essi emesse si trovano nello spettro visibile, xenon o gas rari) ad un'opportuna pressione e sono inoltre contenuti due elettrodi (figura 4.13).

In particolare il sodio, essendo solido alla temperatura ordinaria, deve passare allo stato aeriforme per poter emettere: pertanto esso viene immerso in un'atmosfera di neon che permette l'innescarsi della scarica e l'innalzamento di temperatura necessario.

A seconda del valore della pressione del tubo di scarica, questo tipo di lampada può, a sua volta, dividersi in due sottogruppi: ad alta ed a bassa pressione.

Nelle lampade a vapori di sodio a bassa pressione (0.5 Pa) la scarica avviene in un lungo tubo ad U di vetro, protetto da un'ampolla tubolare esterna di vetro a doppia parete, la cui superficie interna è ricoperta di ossidi di indio per assicurare un buon isolamento termico, dato che la lampada funziona meglio ad alta temperatura (270°C) (figura 4.14).

A bassa pressione il sodio emette luce gialla praticamente monocromatica (un doppietto di righe spettrali sul giallo arancio, vicinissime alla massima sensibilità dell'occhio, a 589 e 589.6 nm), inutilizzabile per l'illuminazione di interni e per tutte le applicazioni nelle quali è importante la distinzione dei colori: per tale ragione il loro uso è riservato ai casi in cui la resa del colore non è importante; in particolare in Italia tale lampada è usata soprattutto per l'illuminazione stradale.

L'efficienza luminosa nelle lampade a bassa pressione arriva a 200 lm/W , mentre la vita media varia fra le 8.000 e le 10.000 ore. La resa cromatica è ovviamente del tutto insufficiente ($R_a = 0$): in particolare quelle al sodio a bassa pressione sono le lampade più sfavorite sotto questo aspetto.

Nelle lampade al sodio ad alta pressione (40 kPa) la scarica avviene ancora ad alta temperatura, con emissione su uno spettro a bande o continuo nel visibile, per cui la colorazione non è più gialla monocromatica, ma bianco-oro, ($R_a = 60$) con temperatura di colore variabile da 2.200 a 4.200 K (figura 4.15).

L'efficienza luminosa è leggermente inferiore a quella ottenuta a bassa pressione, ma comunque supera i 100 lm/W . La durata di vita va da 5.000 a 12.000 ore, ed il flusso al termine della vita utile si riduce mediamente al 90% di quello iniziale.

Il mercurio invece ha solitamente, a bassa pressione, uno spettro di emissione costituito da un paio di righe situate nell'ultravioletto (254 e 185 nm), mentre ad alta pressione si manifestano altre righe nel campo del visibile (blu, verde); con l'ulteriore aumento della pressione le righe si vanno allargando in bande e lo spettro di emissione diviene del tipo continuo, seppur mancante delle lunghezze d'onda corrispondenti al rosso. Pertanto le lampade a bassa pressione non vengono usate per illuminazione, ma per particolari operazioni tecnologiche che richiedono l'uso della

radiazione UV. Il loro utilizzo diffuso è possibile infatti solo correggendo la qualità della luce emessa, come avviene nelle lampade *fluorescenti* (vedi par. 4.3.6)

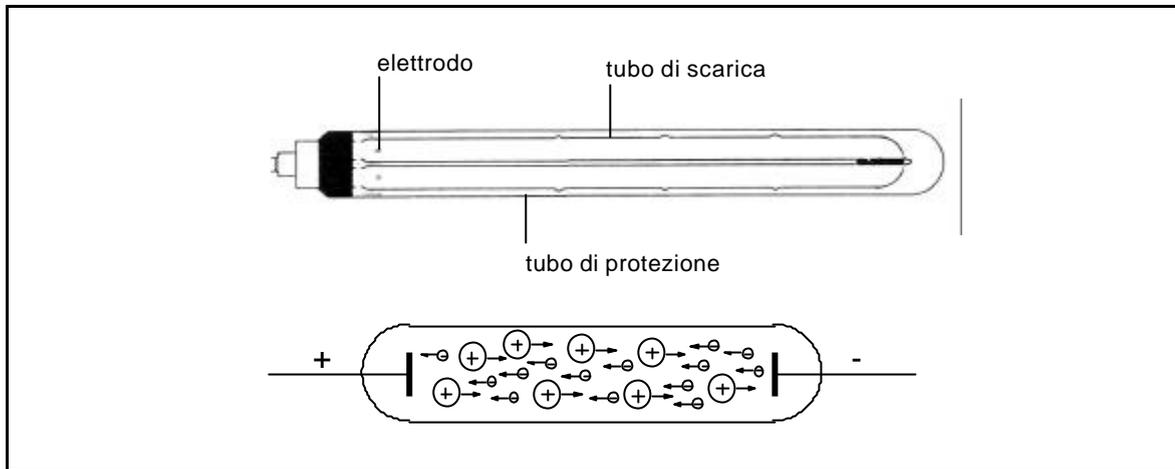


Figura 4.13 - Tubo di scarica ad U riempito di un gas a bassa pressione.

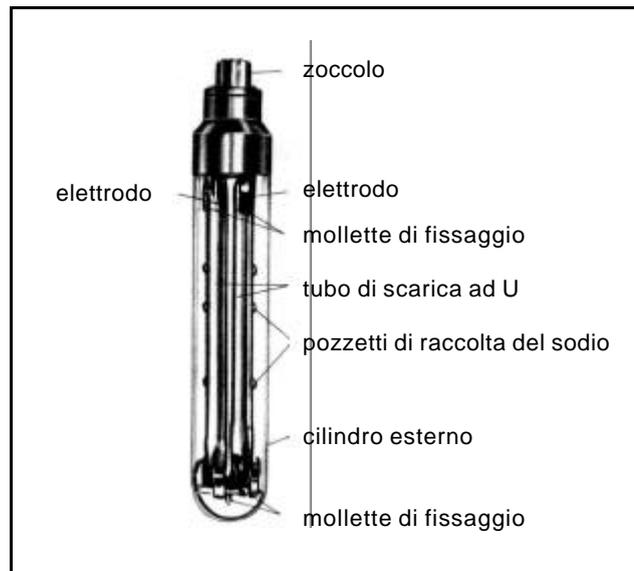


Figura 4.14 - Lampada al sodio a bassa pressione.

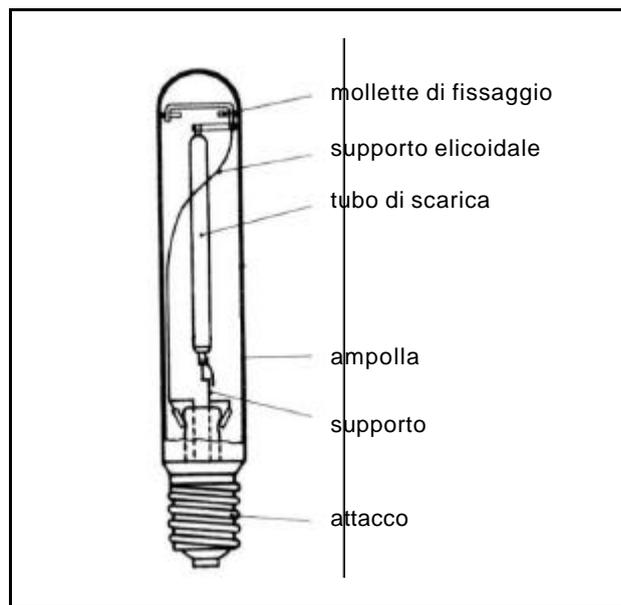


Figura 4.15 – Lampada al sodio ad alta pressione.

L'efficienza nelle lampade ad alta pressione è relativamente bassa e va da un minimo di 35 lm/W ad un massimo di 50 lm/W. Anche l'indice di resa cromatica ($R_a = 60$) e la temperatura di colore (2150 K) sono relativamente bassi e ciò spiega l'attuale scarso impiego di queste lampade (nel caso dell'illuminazione stradale esse sono state quasi totalmente sostituite da quelle a vapori di sodio).

In alcuni tipi di lampade vengono aggiunti alogenuri (ioduri) di sodio, tallio ed indio per correggere le caratteristiche dello spettro di emissione e migliorare l'efficienza luminosa, che può arrivare fino a 95 lm/W. Queste lampade sono in grado di coprire lo stesso campo di utilizzazione sia delle lampade alogene che delle fluorescenti, con il vantaggio rispetto alle prime di una maggiore efficienza e rispetto alle seconde della disponibilità di flussi più elevati.

Recentemente sono state prodotte inoltre piccole lampade ad alogenuri con aggiunta di terre rare (come olmio, diprosio, ecc.) per migliorare la resa cromatica ($R_a = 65-80$), paragonabili a lampade ad alogeni, con il vantaggio di un risparmio energetico di $2/3$ circa. Si tratta in pratica di lampade a scarica miniaturizzate con luminanza di 15 Mcd/m^2 , le cui temperature di colore vanno da 3.000 a 6.000 K, mentre la cui vita media può superare le 6.000 ore.

Altre lampade a scarica utilizzano infine un'atmosfera di xenon, che consente di ottenere spettri di emissione che riproducono, con buona approssimazione, nel campo del visibile, quello della radiazione solare. Ne consegue una resa dei colori fedele, cosicché tali lampade sono ben impiegabili per l'illuminazione sia di ambienti interni che esterni.

Un accenno va effettuato in ultimo anche alle lampade a vapori di mercurio ad altissima pressione (3.5-10 MPa), che hanno luminanze elevatissime (100.000 stilb) e vengono utilizzate soprattutto in laboratori scientifici (figura 4.16).

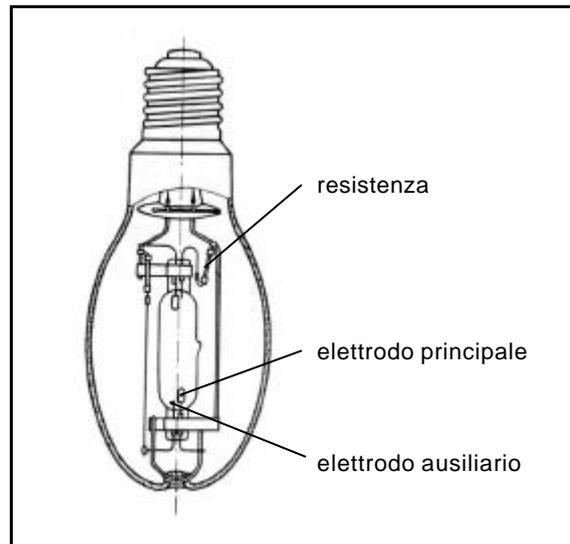


Figura 4.16 - Lampada a vapori di mercurio ad altissima pressione.

Scarica di un gas

Il fenomeno della scarica di un gas può essere descritto come segue.

In una massa di gas rarefatto esistono sempre degli elettroni liberi dovuti ad effetti fotoelettrici o ad irraggiamento cosmico.

Alle temperature ordinarie l'energia posseduta dalle molecole ($3kT/2$) è dello stesso ordine di grandezza degli scambi di energia tra molecole o tra elettroni e molecole causati dalle collisioni tra di essi.

Se però si innalza la temperatura o si accelerano le particelle con un adatto campo elettrico, si creano le condizioni per la ionizzazione del gas ed i conseguenti fenomeni che sono alla base del funzionamento di una lampada a scarica.

In particolare se i due elettrodi vengono collegati ad una sorgente di tensione continua e si diagramma la curva caratteristica $V(I)$ si trova quanto segue (figura 4.17): per valori molto bassi il gas, che ordinariamente ha una bassissima conducibilità termica, si comporta come un perfetto isolante; in queste condizioni si manifesta solo un debole passaggio di corrente dovuto agli elettroni liberi presenti ed in corrispondenza nel primo tratto della curva si osserva un andamento di i crescente con V .

Per valori più alti di tensione gli elettroni acquisteranno energia cinetica (pari ad eV) in virtù del campo elettrico esistente fra gli elettrodi, muovendosi verso l'anodo ed urtando, nel loro percorso, atomi del gas. Se l'urto avviene a basse velocità, la collisione è elastica e provoca la deviazione dell'elettrone d'urto, che cede una piccola parte della sua energia cinetica all'atomo di gas che si riscalda.

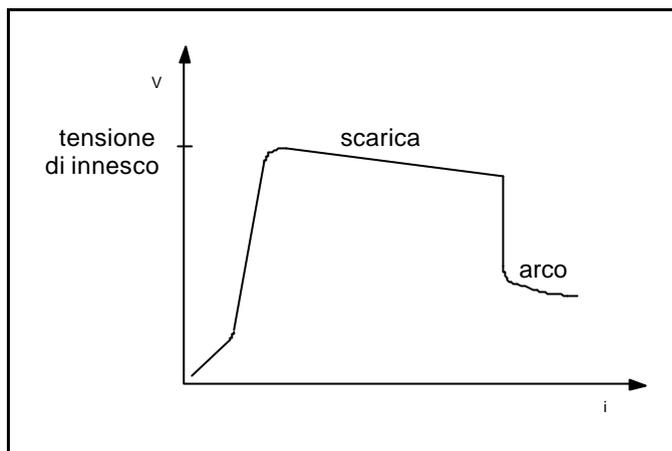


Figura 4.17 – Curva caratteristica tensione-corrente in un tubo a scarica.

Al crescere della velocità aumenta invece l'entità degli scambi energetici causati dalle collisioni tra le particelle e conseguentemente la probabilità di determinare la ionizzazione di una molecola.

Se invece l'urto avviene ad elevate velocità, provoca il salto d'orbita di uno degli elettroni esterni ad un livello energetico superiore, eccitando l'atomo. Dopo un tempo molto breve, variabile da 10^{-8} a 10^{-9} secondi, l'elettrone ritorna al suo livello iniziale e nel passare da uno stato energetico superiore E_2 ad uno inferiore E_1 l'atomo emette un quanto di luce (fotone) pari alla differenza:

$$E_2 - E_1 = h\nu \quad (\text{joule}) \quad (4.1)$$

con h costante di Planck ($6.63 \cdot 10^{-34}$ js) e ν frequenza della radiazione emessa (in s^{-1}).

Poichè l'energia ceduta per urto dall'elettrone è pari ad eV, la lunghezza d'onda del fotone emesso sarà data da:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{ch}{eV} \quad (4.2).$$

Quando infine l'urto avviene ad altissima velocità, la velocità dell'elettrone d'urto è così elevata che un elettrone periferico viene strappato dal sistema atomico: l'atomo diviene caricato positivamente e pertanto si ionizza. L'elettrone liberato si comporta esattamente come un elettrone d'urto, mentre lo ione può ricombinarsi con un altro elettrone producendo luce, o dare calore per urto contro le pareti.

Se si applica un'appropriata tensione continua al tubo di scarica si avrà una formazione continua di ioni che si sposteranno verso il catodo ed una produzione di altri elettroni che si sposteranno molto velocemente verso l'anodo. Nella curva caratteristica del tubo questo fenomeno si traduce in un rapido aumento della corrente all'aumentare della tensione.

Sotto il bombardamento degli ioni il catodo si riscalda ed emette a sua volta elettroni per effetto termoionico: pertanto la ionizzazione aumenta e si produce un numero di elettroni sufficiente a far sì che la scarica divenga indipendente dagli elettroni liberi originari (si dice in tal caso che

essa è autosostenuta). Il gas è così diventato un conduttore, la caduta di tensione sulla lampada decresce e la corrente aumenta. La tensione minima capace di innescare tale processo, che corrisponde alla tensione alla quale avviene l'accensione della lampada, è detta appunto *tensione d'innescò*.

Nella curva caratteristica si ha quindi un tratto a resistenza negativa - corrispondente al funzionamento delle lampade a scarica - in cui la caduta di potenziale tra gli elettrodi decresce all'aumentare della corrente. La tensione ai morsetti sufficiente a mantenere la scarica è più bassa della tensione di innesco.

Da ultimo segue un altro tratto corrispondente alla scarica disruptiva o *arco* che viene sfruttato solo per le lampade *ad arco*, utilizzate in applicazioni speciali.

L'andamento della curva (tensione d'innescò, tensione d'arco, ecc.) dipende dalla forma del tubo e dalla natura del gas. In particolare la tensione d'innescò dipende dal prodotto della pressione per la distanza tra gli elettrodi (legge sperimentale di *Paschen*), per cui risulta tanto maggiore quanto maggiori sono i loro valori: ciò si spiega effettuando le considerazioni che seguono.

A pressioni elevate il *tempo libero medio* (tempo che intercorre tra due urti successivi) è piuttosto breve, per cui esse non riescono ad acquistare energia cinetica sufficiente per produrre la ionizzazione di atomi nelle collisioni. Solo elevando la ddp ai morsetti si riesce ad accelerare adeguatamente le particelle in maniera tale che nelle collisioni avvenga la ionizzazione di altri atomi: ciò si traduce quindi in un aumento del valore della tensione d'innescò.

A pressioni basse, quando il gas è molto rarefatto, il tempo libero medio è invece molto grande per cui la probabilità che avvenga una collisione prima che la particella accelerata arrivi sull'elettrodo di segno opposto è piuttosto bassa. Anche in questo caso solo aumentando la tensione si riesce a ridurre il tempo libero medio producendo una maggiore agitazione delle particelle e ciò, ancora una volta, si traduce in un aumento della tensione d'innescò.

Inoltre per un dato gas e per una data pressione la tensione di innesco aumenta al diminuire del diametro del tubo. Ciò si spiega osservando che un piccolo diametro facilita la possibilità di ricombinazione di ioni ed elettroni sulle superfici laterali prima di poter provocare altre ionizzazioni.

Il valore della tensione d'innescò può tuttavia essere ridotto utilizzando sia gas rari, che presentano una tensione d'eccitazione molto vicina alla loro tensione di ionizzazione, il che facilita lo stabilirsi della scarica attraverso il gas (inoltre tali gas, così come tutti i vapori metallici, hanno molecola monoatomica, e ciò permette di non disperdere energia negli urti con gli elettroni per eccitare oscillazioni e rotazioni degli atomi della molecola), che elettrodi appropriati (si può ad esempio ricoprire il catodo, che in genere è costituito di tungsteno, con strati di ossidi alcalino-terrosi, quali BaO, SrO e CaO, a basso potenziale di uscita, che facilitano i fenomeni di ionizzazione, o di terre rare) o ancora elettrodi ausiliari. Un'ulteriore possibilità è fornita infine dal riscaldamento degli elettrodi.

Affinchè il fenomeno della scarica non si esaurisca è necessario che il gas rimanga ionizzato, con spostamenti verso il catodo di ioni positivi e di elettroni verso l'anodo. In tal modo si determina tuttavia una corrente progressivamente più elevata, che occorre stabilizzare impiegando dei limitatori di corrente, detti *reattori*, resistenze zavorra di tipo induttivo che servono a limitare le perdite di potenza.

4.3.6 Lampade fluorescenti

Per sfruttare l'emissione di radiazioni nell'ultravioletto da parte di alcuni gas e vapori (prevalentemente mercurio) utilizzati nei tubi di scarica (che, salvo per applicazioni specifiche, risulta inutilizzabile) in questo tipo di lampade si sfrutta il fenomeno della *fluorescenza*, proprietà che hanno alcune sostanze di assorbire le radiazioni elettromagnetiche di piccola lunghezza d'onda e di riemettere l'energia relativa sotto forma di radiazioni di lunghezza d'onda maggiore.

Tale fenomeno consente il recupero dell'energia emessa fuori del visibile, permettendo anche la correzione del colore della luce emessa, con una resa cromatica molto elevata. Esso è basato sulla proprietà che hanno alcune sostanze, dette *fosfori*, di eccitarsi quando vengono investite da una radiazione, emettendo a loro volta radiazioni di energia inferiore a quella di eccitazione, e quindi di lunghezza d'onda maggiore. L'emissione cessa entro un tempo molto breve (10^8 s) dalla cessazione della radiazione eccitatrice.

Con tali sostanze, che sono costituite da ossisolfuri, alluminati, tungstati fosfati e silicati di Ca, Mg, Zn, associati a metalli pesanti quali il rame o l'antimonio, si tratta quindi la superficie interna dell'involucro di vetro (figura 4.18). Inoltre spesso nei sali fluorescenti vengono disperse in tracce particolari sostanze dette *attivatori*.

Un fenomeno simile e spesso coesistente con la fluorescenza è inoltre quello della *luminescenza* o *fosforescenza*, che invece si prolunga per più tempo.

Il colore della luce risultante varia con la natura dei fosfori ed anche secondo la natura degli attivatori, e va dal bianco caldo (≈ 3000 K), che si avvicina maggiormente al colore della luce emessa dalle lampade ad incandescenza, fino al bianco-azzurro della luce diurna (temperatura di colore ≈ 6500 K).

Le lampade fluorescenti tubolari sono invece generalmente riempite di argon, con l'aggiunta di una piccola quantità di mercurio, allo scopo di facilitare l'innesco della scarica. Caratteristica comune di tale tipo di lampada è la bassa luminanza della superficie emittente ($4000\div 7000$ cd/m²): tale proprietà rende talvolta possibile l'uso di queste sorgenti senza schermatura alla vista diretta per evitare l'abbagliamento, come invece è necessario con le lampade di altro tipo.



Figura 4.18 – Lampada fluorescente a bulbo a vapori di mercurio.

Per la capacità di tali lampade di recuperare energia l'efficienza luminosa risulta generalmente molto elevata (85-95 lm/W). La vita media è di ca. 10000 ore, mentre il flusso luminoso finale risulta pari all'85% di quello iniziale. L'indice di resa cromatica è compreso fra 85 e 95.

Negli ultimi anni sono state prodotte inoltre lampade fluorescenti di piccole dimensioni, che si collocano sullo stesso mercato delle lampade ad incandescenza, delle quali offrono sostanzialmente la stessa qualità cromatica della luce ($R_a = 85$), consentendo però notevoli risparmi energetici (figura 4.19).

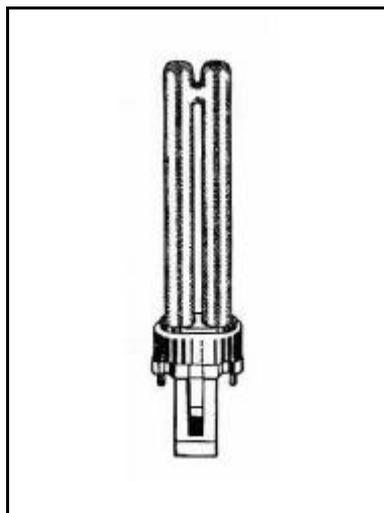


Figura 4.19 - Lampada fluorescente compatta.

Il loro costo, ancora elevato rispetto alle lampade ad incandescenza, viene infatti compensato da una maggiore efficienza (da 50 ad 80 lm/W) ed una vita media più lunga (6.000 h).

4.3.7 Lampade a luce miscelata

Sono lampade fluorescenti a bulbo a vapori di mercurio nelle quali all'interno del bulbo viene aggiunto un filamento di tungsteno collegato in serie al tubo a scarica (figura 4.20). Il filamento, emettendo per incandescenza con il suo spettro continuo ricco di radiazioni di grande lunghezza d'onda, dà un utile contributo alla produzione di flusso luminoso e migliora la resa dei colori. Un ulteriore vantaggio è dato dal fatto che tali lampade non richiedono il reattore.

I valori dell'efficienza luminosa risultano intermedi tra quelli delle lampade ad incandescenza e quelli delle lampade fluorescenti (20-30 lm/W), la temperatura di colore si aggira sui 3000-4000 K, l'indice di resa cromatica va da 40 a 75 e la vita media da 5000 a 7500 ore.

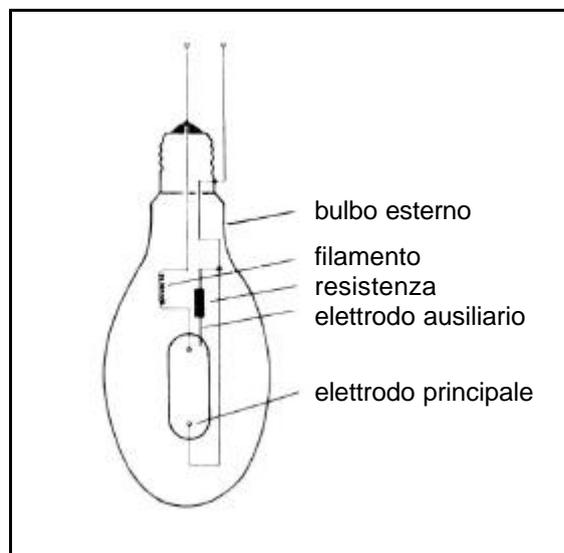


Figura 4.20 – Lampada a luce miscelata.

4.3.8 Lampade ad induzione

Si tratta di lampade di nuovissima generazione, il cui funzionamento si basa su quello delle lampade fluorescenti, ma nelle quali vengono eliminati gli elettrodi, che costituiscono il punto debole ai fini della durata.

La potenza richiesta viene in tal caso fornita da un generatore elettronico di frequenze molto elevate (2.65 Mhz) che, accoppiato con un cavo coassiale ad un'antenna, crea un campo magnetico alternato che a sua volta induce un campo elettrico secondario (figura 4.21). Si genera quindi una corrente indotta che circola nella miscela di vapore di mercurio e di gas raro contenuta nel bulbo, innescando la fase di ionizzazione descritta in precedenza.

L'efficienza si aggira sui 65 lm/W, la temperatura di colore sui 3000-4000 K, l'indice di resa cromatica è maggiore di 80 e la vita media stimata è di 60000 ore.

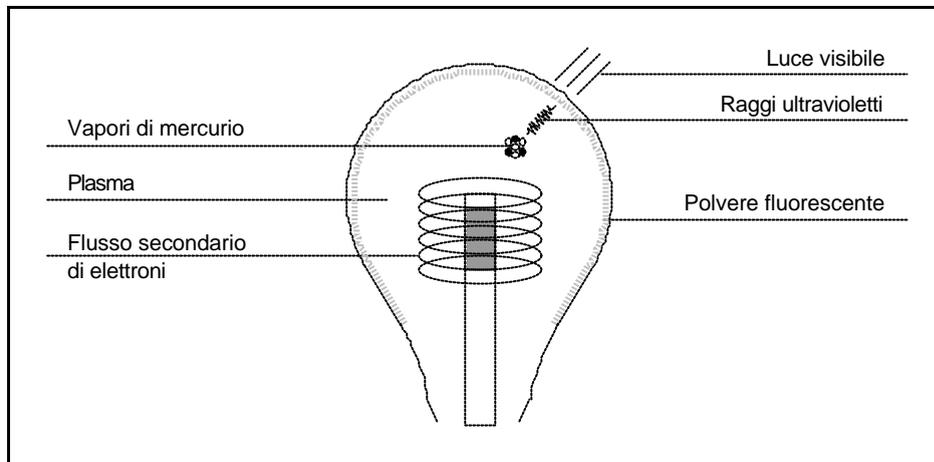


Figura 4.21 – Schema di funzionamento di una lampada ad induzione.

5. Progetto di un impianto di illuminazione artificiale interna

La progettazione di un impianto di illuminazione ha come obiettivo l'identificazione del tipo, del numero, della potenza e della distribuzione dei corpi illuminanti necessari per ottenere sul piano di lavoro un livello di illuminamento stabilito e realizzare condizioni di comfort visuale in relazione alle attività che devono svolgersi nell'area da illuminare. In particolare un buon progetto di illuminazione deve:

- assicurare un livello di illuminamento adatto alle attività svolte nell'ambiente;
- assicurare una buona resa dei colori;
- evitare forti contrasti nelle zone del campo visivo;
- evitare abbagliamento diretto o riflesso.

La progettazione viene quindi effettuata partendo dal risultato che si vuole ottenere (livello di illuminamento) e risalendo al valore del flusso luminoso totale che le sorgenti devono emettere, definendone le caratteristiche ed il posizionamento.

E' necessario porre quindi attenzione alla scelta delle sorgenti per ottenere una buona resa dei colori, che è il risultato di una corretta scelta dei valori dell'illuminamento e della qualità della luce, caratterizzata dalla temperatura di colore delle sorgenti e dalla composizione spettrale della luce emessa.

I livelli di illuminamento influenzano a loro volta la qualità della percezione visiva. Esiste infatti una correlazione fra temperatura di colore delle sorgenti e livelli di illuminamento: quando i valori dell'illuminamento sono bassi, i colori tendono ad apparire freddi, quando invece sono alti i colori appaiono innaturali.

Per ottenere un'illuminazione gradevole, una tonalità "calda" di colore della luce (bassa temperatura di colore) dovrà pertanto essere compensata da un elevato livello di illuminamento; al contrario una luce più "fredda" consente di adottare bassi livelli di illuminamento pur evitando alterazione dei colori.

La capacità dell'occhio di distinguere gli oggetti è invece legata al contrasto di luminanza fra gli oggetti da osservare e lo sfondo (vedi paragrafo 5.4).

L'abbagliamento, infine, è uno degli aspetti del progetto illuminotecnico cui bisogna fare maggiore attenzione, poichè il suo insorgere può penalizzare un progetto impostato correttamente (vedi paragrafo 5.5).

La progettazione esecutiva degli impianti di illuminazione si esegue in genere con metodi computerizzati, anche se per casi poco complessi una stima affidabile si può effettuare anche con metodi manuali abbastanza semplici.

Generalmente per la realizzazione di un progetto illuminotecnico vengono utilizzati due metodi:

- a) il metodo puntuale;
- b) il metodo del flusso totale o del *coefficiente di utilizzazione*.

Il primo metodo utilizza le formule per il calcolo relative a sorgenti puntiformi, lineari o estese e, assegnata una certa distribuzione dei valori di illuminamento, consente di risalire al valore dell'intensità della sorgente nella direzione prescelta e di scegliere quindi il complesso lampada-apparecchio che ha la curva fotometrica che meglio si adatta al caso. Partendo quindi dalla distribuzione delle intensità è possibile risalire al flusso luminoso totale che la sorgente deve emettere.

Tale metodo assume particolare importanza per illuminamento di esterni, mentre nel caso di interni viene utilizzato in genere anche manualmente, a integrazione del metodo del flusso totale, per lo più per calcoli di verifica dei valori dell'illuminamento in uno o più punti.

Il secondo è invece un metodo semplificato, utilizzato per sorgenti di piccole dimensioni (puntiformi) e locali parallelepipedi, allorché non sia richiesta un'elevata precisione di calcolo, che permette di calcolare rapidamente il flusso totale necessario perché sul piano di lavoro venga garantito un certo livello di illuminamento con apparecchi illuminanti disposti in modo uniforme.

Il metodo si propone di mettere in relazione il flusso utile ϕ_{utile} che viene ad incidere, direttamente o dopo riflessioni, sul piano di lavoro con il flusso luminoso emesso dalle sorgenti ϕ_t . Tale metodo tuttavia non fornisce indicazioni sulla distribuzione degli illuminamenti sull'area in esame, partendo piuttosto dall'ipotesi di tale uniformità.

Entrambi i metodi possono essere utilizzati sia per determinare l'illuminamento sul piano di lavoro dovuto ad un certo numero di lampade che, viceversa, per determinare il numero di lampade necessarie per ottenere l'illuminamento richiesto.

5.1 Metodo del flusso totale o del coefficiente di utilizzazione

E' un metodo semplificato, che può essere adeguatamente utilizzato solo per:

- locali a forma di parallelepipedo;
- disposizione dei centri luminosi regolare ed uniforme;
- altezza di montaggio costante per tutti gli apparecchi;
- centri luminosi che emettono lo stesso flusso, con solido fotometrico simmetrico rispetto agli assi principali,

basato sul concetto che solo una parte del flusso emesso dalle lampade raggiunge il piano di lavoro (flusso utile). Tale flusso utile è costituito per una parte da flusso diretto e per un'altra da flusso diffuso, che raggiunge il piano di lavoro dopo una serie di riflessioni sulle pareti e sul soffitto, ossia è rappresentato sia dal flusso emesso dalle sorgenti primarie che da quello riflesso dalle sorgenti secondarie, costituite da tutte le altre superfici presenti nell'ambiente, compreso il piano di lavoro stesso.

In particolare, se E è il livello di illuminamento richiesto sul piano di lavoro di area S, il flusso utile che deve raggiungere la sua superficie è dato da:

$$\phi_{\text{utile}} = ES \quad (5.1)$$

Il rapporto tra il flusso che raggiunge il piano di lavoro ed il flusso totale emesso dalle sorgenti prende il nome di *fattore di utilizzazione* U (che a sua volta può esprimersi come prodotto di un coefficiente di utilizzazione u per il rendimento h dell'apparecchio):

$$U = \frac{\Phi_{\text{utile}}}{\Phi_t} \quad (5.2)$$

La differenza $f_t - f_{\text{utile}}$ rappresenta quindi il flusso assorbito dagli apparecchi illuminanti, dalle pareti e dal soffitto.

Il fattore di utilizzazione dipende dai seguenti parametri:

- la forma del solido fotometrico dell'apparecchio, che caratterizza la distribuzione del flusso sul piano utile, sui muri e sul soffitto (indicata dalla classe dell'apparecchio). I solidi fotometrici orientati prevalentemente verso il piano di lavoro conducono ad un elevato valore del coefficiente di utilizzazione;
- i coefficienti di riflessione delle pareti e del soffitto: alti valori di tali coefficienti contribuiscono a riflettere verso il piano utile una maggiore quantità di flusso, altrimenti disperso;
- l'*indice del locale* K , riferito all'illuminazione artificiale, parametro che tiene conto delle caratteristiche geometriche dell'ambiente e della posizione degli apparecchi rispetto al piano di utilizzo all'interno del locale, dato dall'espressione:

$$K = \frac{ab}{h(a+b)} \quad (5.3)$$

con a e b rispettivamente lunghezza e larghezza del locale, ed h *altezza utile*, cioè distanza fra apparecchio illuminante e piano di lavoro.

In particolare per distribuzione diretta, semidiretta e mista della luce per altezza utile si deve intendere l'altezza delle sorgenti luminose sul piano di lavoro, mentre per distribuzione indiretta della luce, allorchè il flusso viene inviato prevalentemente verso l'alto per essere riflesso verso il basso dal soffitto, la distanza fra il soffitto ed il piano di lavoro.

Il valore del fattore di utilizzazione varia molto poco per valori dell'indice del locale superiori a 5.

Il valore del fattore di utilizzazione è uguale per tutti i casi geometricamente e fotometricamente simili. Pertanto sono disponibili tabelle che riportano il valore di U (o u) per un numero adeguato di combinazioni dei parametri da cui dipende.

Noto quindi il valore del fattore di utilizzazione si può calcolare il valore del flusso luminoso che deve essere emesso dalle sorgenti da installare per mezzo dell'espressione:

$$\Phi_t = \frac{\Phi_{\text{utile}}}{U} = \frac{ES}{U}$$

Dal momento dell'installazione dell'impianto si verifica tuttavia una riduzione del flusso rispetto al valore iniziale, causata principalmente dall'invecchiamento delle lampade che nel tempo vanno

riducendo il flusso emesso, e dal degrado delle componenti ottiche (trasparenza e riflettanza) degli apparecchi, oltre che dalla polvere che si va depositando sui corpi trasparenti e sulle superfici riflettenti degli apparecchi. Inoltre, in relazione alla luce riflessa, l'impolveramento delle pareti ed il degrado naturale della vernice con l'andar del tempo ne fanno diminuire l'albedo.

Tale riduzione di flusso è stimabile per mezzo di un *coefficiente di conservazione* espresso dalla seguente relazione:

$$M = \frac{E_{new}}{E_{old}}, \quad (5.4)$$

dove E_{new} ed E_{old} indicano rispettivamente i livelli di illuminamento medio sul piano di lavoro ad impianto nuovo e dopo un determinato periodo di utilizzo.

Per tenere conto di ciò il flusso luminoso che le lampade devono emettere si calcola incrementando il valore di φ_t .

Il fattore destinato a compensare questo invecchiamento, denominato *fattore di invecchiamento* o di *deprezzamento* d , è dato dall'inverso del coefficiente di conservazione ed esprime quel valore per il quale bisogna moltiplicare l'illuminamento di esercizio al fine di considerare l'invecchiamento dell'impianto e la sporcizia del locale.

Il valore del flusso luminoso totale emesso sarà dato quindi dalla seguente espressione:

$$\varphi_t = \frac{\varphi_{utile}}{U} = \frac{ES\delta}{U}. \quad (5.5)$$

5.2 Procedura per la realizzazione di un progetto di impianto di illuminazione interna con il metodo del coefficiente di utilizzazione.

Utilizzando tale metodo è utile organizzare i dati ed i criteri da seguire per la realizzazione del progetto riferendosi alla seguente procedura:

1) Scelta del livello di illuminamento orizzontale generale sul piano di lavoro

Il livello di illuminamento è essenzialmente funzione del tipo e della destinazione del locale, della natura dei lavori da compiere, della luminosità dell'ambiente, dalla durata di utilizzo giornaliero.

A titolo indicativo per i livelli di illuminamento relativi a diversi locali si può fare riferimento alla tabella 5.1. Per disporre di valori più dettagliati si può fare riferimento invece alla tabella 5.2.

Alcuni enti normatori (IES, DIN) indicano anche, oltre al valore dell'illuminamento consigliato (da intendersi come valore minimo), il valore dell'illuminamento ottimo, tenendo conto dell'inopportunità che l'illuminamento sia troppo grande: valori elevati infatti da un lato migliorano la visibilità degli oggetti e la produttività del lavoro, ma dall'altro possono causare una certa stanchezza visiva e mentale.

L'altezza del piano di lavoro non è fissata, ma può porsi mediamente a 0.85÷1.00 m d'altezza dal pavimento.

Tabella 5.1 - Esempi di livelli di illuminamento riferiti a locali a

diversa destinazione d'uso (Vandeplanque, 1991).

<i>Locale</i>	<i>Illuminamento (lux)</i>
Magazzini, depositi	100
Sale da pranzo	200
Aule scolastiche, laboratori	300-500
Supermercati	750
Lavori di grande precisione	>1000

Tabella 5.2 – Livelli di illuminamento in funzione della destinazione d'uso del locale.

<i>Tipo di attività</i>	<i>Illuminamento (lux)</i>	
	<i>Generale</i>	<i>Localizzato</i>
<i>Abitazioni</i>		
Soggiorno	80-150	
Camere da letto	50-100	100-300
Stanze da bagno	50-100	200-400
Corridoi, scale	20-80	
Cucina	50-150	200-400
<i>Alberghi</i>		
Cucine	125-250	200-300
Camere	30-125	
Hall, ristoranti, saloni	50-250	
Sala di lettura	150-250	250-300
<i>Autorimesse</i>		
Officine riparazioni e lavaggi	50-100	250-500
<i>Biblioteche</i>		
Illuminazione generale	100-200	
Sale di lettura	150-250	
Tavoli di lettura		250-500
<i>Chiese</i>		
Altare		250-1.000
Navata e coro	100-200	
Sacrestie	50-60	
<i>Cinema</i>		
Atrio	100-250	
Sala	50-150	
<i>Gallerie d'arte</i>		
Illuminazione generale	150-300	
Sui quadri		500-1.000
<i>Industrie alimentari</i>		
Celle frigorifere	20-50	
Cucine, forni		200-400
Confezioni, inscatolamento		250-500
Imballaggio e spedizioni	80-100	
<i>Industrie chimiche</i>		

Illuminazione generale	50-100	
Laboratori di analisi	200	250-500
Forni, caldaie		150-300
<i>Industrie grafiche</i>		
Stampa, composizione	125-250	500-1.000

Tipo di attività	Illuminamento (lux)	
	Generale	Localizzato
<i>Industrie metallurgiche</i>		
Fonderie	100-200	150-300
Officine meccaniche	150-300	250-2.000
Magazzini	50-100	200-1.000
<i>Industrie tessili</i>		
Filatura, tintoria, tessitura	125-250	200-800
Confezione	125-250	250-500
<i>Industrie del legno</i>		
Segatura, piallatura, incollatura, lucidatura	100-200	
Fabbrica di mobili	125-250	250-500
<i>Negozi e grandi magazzini</i>		
Illuminazione generale	200-500	
<i>Ospedali e cliniche</i>		
Illuminazione generale	125-250	
Sale di degenza	50-100	200-1.000
Laboratori di analisi	200-500	250-1.000
Sale operatorie	250-500	15.000-30.000
Ambulatori	125-250	
Sale d'attesa	80-150	
<i>Ristoranti e caffè</i>		
Sale da pranzo	50-250	
Salette tea-rooms	70-150	200-300
Sale da biliardo	125-250	250-500
Banconi dei bar		150-250
Cucine	125-250	200-300
<i>Scuole</i>		
Aule	100-200	300-500
Aule da disegno	300-500	500-700
Palestre	150-300	250-800
Servizi, scale e corridoi	150-300	
<i>Teatri</i>		
Illuminazione generale	150-250	

Foyer	100-250	
Orchestra		250
<i>Uffici</i>		
Illuminazione generale	150-300	
Archivi	150-250	250-500
Sale di riunione	150-250	
Servizi	70-100	
Uffici tecnici	150-300	1.000-2.000

2) Scelta del tipo di lampada

Si tratta di selezionare tra i diversi tipi di lampada quello più conveniente in base ai suoi elementi caratteristici in funzione di parametri economici (costo, durata) e tecnici (qualità della luce). Come riportato in precedenza, la scelta di una lampada a particolare tonalità di luce può comportare la variazione del livello di illuminazione prefissato.

3) Scelta del tipo di illuminazione e del tipo di apparecchio

Il tipo di illuminazione da prescegliere dipende dalla natura del locale, considerate le possibili riflessioni delle pareti, e si accompagna alla scelta del tipo di apparecchio illuminante: ad esempio, illuminazioni di tipo misto o semiindiretto non devono essere usate in presenza di lucernai a soffitto o ancora per locali di grande altezza può essere utilizzata un'illuminazione diretta concentrata, che è più economica di un'illuminazione diretta diffusa (anche se quest'ultima assicura però ambienti luminosi e gradevoli).

4) Scelta dell'altezza di sospensione

Se h è l'altezza della sorgente sopra il piano utile e h' la sua distanza dal soffitto (figura 5.1), si può definire un rapporto di sospensione J dato da:

$$J = \frac{h'}{h + h'} \quad \text{con } h \geq 2h', \text{ cioè } 0 \leq J \leq \frac{1}{3}. \quad (5.6)$$

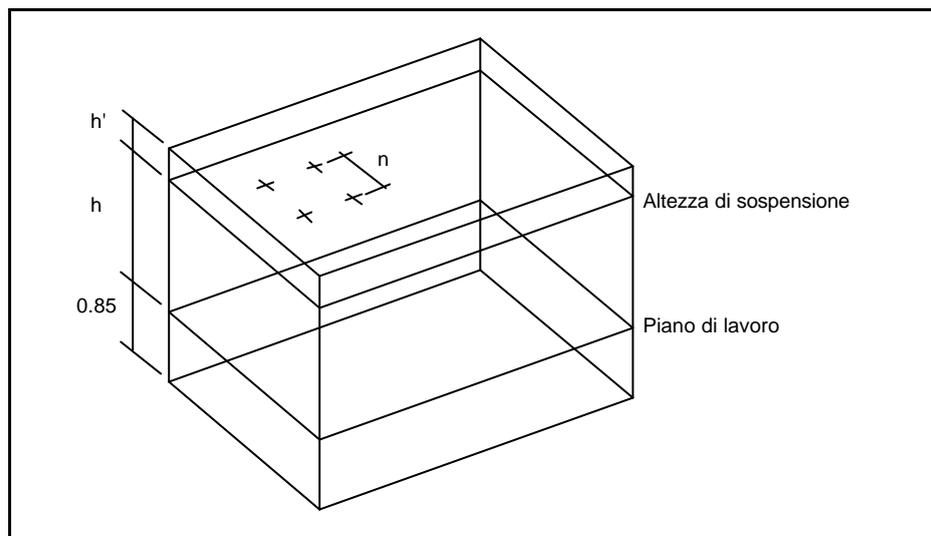


Figura 5.1 - Altezza di sospensione.

Spesso è conveniente adottare il valore massimo di h poiché, essendo i centri luminosi più lontani dal campo di visione orizzontale, diminuiscono i rischi di abbagliamento ed è possibile distanziarli maggiormente, riducendone così il numero.

5) Ripartizione dei centri luminosi

L'illuminamento prodotto da un apparecchio illuminante sul piano di lavoro, a meno che non si tratti di illuminazione indiretta, non è mai uniforme; la disuniformità decresce tuttavia con l'aumentare della distanza fra il piano di lavoro e l'apparecchio e con l'aumentare del numero di apparecchi. È importante allora effettuare una valutazione del numero e della distribuzione degli apparecchi da installare per assicurare un illuminamento uniforme sul piano di lavoro. Avendo assunto che essi siano uniformemente distribuiti rispetto a tutta la pianta del locale, si può identificare un rapporto ottimale fra l'interdistanza n fra gli apparecchi e l'altezza utile h .

Un possibile modo di procedere prevede la determinazione dei valori massimi dei rapporti n/h in base alla classe dell'apparecchio (tabella 5.3) e, una volta fissato h , la determinazione della massima distanza n_{max} (Vandeplanque, 1991).

Alternativamente si può assumere n pari a $1 \div 1.5 h$ per illuminazione diretta o mista o pari a $1.5-2 h$ per gli altri tipi di illuminazione.

Per le distanze dai muri degli apparecchi più vicini ad essi, indicate con q , generalmente si deve verificare che:

$$\frac{\pi}{3} \leq q \leq \frac{n}{2},$$

salvo quando esistono postazioni di lavoro lungo i muri.

Nel caso di apparecchi lineari infine, come quelli che utilizzano le lampade fluorescenti tubolari, la spaziatura minima fra due estremi contigui di lampade adiacenti dovrebbe essere almeno pari alla metà della lunghezza dell'apparecchio illuminante.

Tabella 5.3 - Valori dei rapporti fra la distanza n fra due apparecchi e la loro altezza h sul piano di lavoro in funzione della classe di un apparecchio.

Classe	A	B	C	D	EFGH	IJ	da K a S	T
n/h Max	0.5	0.8	1	1.2	1.5	1.7	1.5	$n/h' \leq 6$

6) *Determinazione delle caratteristiche geometriche degli ambienti e dell'indice del locale*

Si valutano la lunghezza, la larghezza e l'altezza dell'ambiente da illuminare al fine di determinare l'indice del locale.

7) *Determinazione dei coefficienti di riflessione delle superfici dell'ambiente*

Si determinano i valori dei coefficienti di riflessione (albedo) dei soffitti, delle pareti e dei pavimenti. A tal fine in tabella 5.4 sono riportati i valori consigliati per i coefficienti di riflessione delle diverse superfici interne. Inoltre nelle tabelle 5.5-5.6 sono riportati rispettivamente i valori relativi a diversi colori di pittura e ad alcuni materiali da costruzione e da arredamento.

Tabella 5.4 – Valori consigliati per il coefficiente di riflessione delle diverse superfici.

Superficie	$r(\%)$
Soffitti	80-85
Muri	60-70
Mobili	25-50
Arredi	15-40

Tabella 5.5 – Valori del coefficiente di riflessione di alcuni colori di pittura.

Colore pittura	$r(\%)$
beige	45-65
bianco	70-80
blu	20-60
giallo	50-70
grigio	35-65
marrone	25-50
nero	0
rosa	50-60
rosso	20-35
verde	30-60

Tabella 5.6 – Valori del coefficiente di riflessione di alcuni materiali da costruzione e da arredamento.

Materiale	$r(\%)$
cemento chiaro	40
gesso	85
legno di acero	40
legno di mogano	10
legno di noce	20

legno di quercia	15
marmo bianco	80
mattoni	20
pietra da taglio	50

8) Determinazione del fattore di invecchiamento

In generale in prima approssimazione si possono assumere per il fattore di deprezzamento (che è almeno pari ad 1.3, ma può arrivare anche ad 1.7 secondo le attività che si svolgono nell'ambiente, le caratteristiche degli apparecchi illuminanti e delle pareti ed il livello di manutenzione dell'impianto) i valori riportati in tabella 5.7 per diversi tipi di illuminazione.

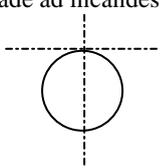
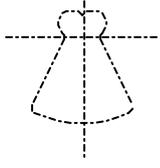
Tabella 5.7 – Valori del fattore di invecchiamento per diversi tipi di illuminazione.

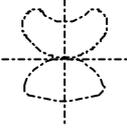
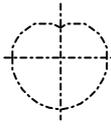
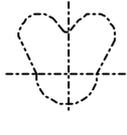
Tipo di illuminazione	Fattore di invecchiamento
Illuminazione diretta	1.3
Illuminazione uniforme	1.5
Illuminazione indiretta	1.7

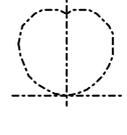
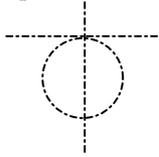
9) Determinazione del fattore di utilizzazione

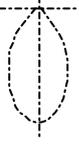
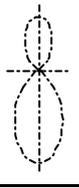
Nei cataloghi delle principali case costruttrici vengono spesso riportate, per ciascun apparecchio, le tabelle del fattore o del coefficiente di utilizzazione in funzione dell'indice del locale, per alcune combinazioni dei coefficienti di riflessione delle pareti e del soffitto e, talvolta, anche del pavimento (tabella 5.8).

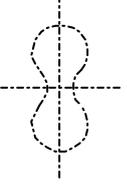
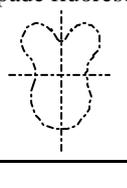
Tabella 5.8 – Valori del fattore di utilizzazione per alcuni tipi di illuminazione e di lampade.

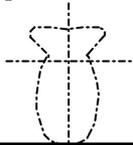
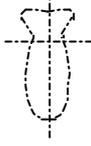
Tipo di illuminazione Tipo di lampada Curva fotometrica	$r_{soffitto}$ (%)	70			50			30		
	r_{pareti} (%)	50	30	10	50	30	10	50	30	10
	K	Fattore di utilizzazione u								
Illuminazione diretta Lampade ad incandescenza 	1	0.20	0.17	0.15	0.20	0.17	0.15	0.20	0.17	0.14
	1.2	0.24	0.20	0.17	0.23	0.20	0.17	0.23	0.20	0.17
	1.5	0.28	0.24	0.21	0.27	0.24	0.21	0.27	0.24	0.21
	2	0.33	0.30	0.27	0.33	0.30	0.27	0.32	0.29	0.27
	2.5	0.37	0.34	0.31	0.37	0.33	0.31	0.36	0.33	0.31
	3	0.40	0.37	0.35	0.40	0.37	0.35	0.39	0.37	0.35
	4	0.45	0.42	0.40	0.44	0.42	0.40	0.44	0.42	0.40
	5	0.48	0.46	0.44	0.47	0.45	0.44	0.47	0.45	0.44
	6	0.50	0.48	0.46	0.49	0.48	0.46	0.49	0.48	0.46
	8	0.53	0.51	0.50	0.52	0.51	0.50	0.52	0.51	0.50
10	0.55	0.54	0.53	0.55	0.54	0.53	0.54	0.54	0.53	
Illuminazione semidiretta Lampade ad incandescenza 	1	0.18	0.15	0.13	0.17	0.14	0.13	0.17	0.14	0.12
	1.2	0.21	0.18	0.16	0.20	0.17	0.15	0.19	0.16	0.14
	1.5	0.25	0.22	0.19	0.24	0.21	0.18	0.22	0.20	0.17
	2	0.30	0.27	0.24	0.28	0.26	0.23	0.27	0.25	0.22
	2.5	0.34	0.31	0.28	0.32	0.29	0.27	0.30	0.28	0.26
	3	0.37	0.34	0.31	0.35	0.32	0.30	0.32	0.30	0.29
	4	0.40	0.38	0.36	0.39	0.37	0.35	0.37	0.35	0.33
	5	0.43	0.41	0.39	0.41	0.39	0.38	0.39	0.38	0.36
	6	0.45	0.44	0.42	0.43	0.41	0.40	0.41	0.39	0.39
	8	0.48	0.47	0.45	0.46	0.45	0.44	0.43	0.42	0.41
10	0.50	0.49	0.48	0.48	0.47	0.46	0.45	0.45	0.44	
	1	0.17	0.15	0.13	0.16	0.13	0.11	0.14	0.12	0.10

Illuminazione mista Lampade ad incandescenza 	1	0.17	0.15	0.13	0.16	0.13	0.11	0.14	0.12	0.10
	1.5	0.25	0.28	0.18	0.28	0.18	0.17	0.18	0.17	0.18
	2	0.30	0.27	0.24	0.26	0.24	0.22	0.23	0.21	0.19
	2.5	0.33	0.30	0.28	0.29	0.27	0.25	0.25	0.24	0.23
	3	0.35	0.33	0.31	0.32	0.30	0.28	0.27	0.26	0.25
	4	0.40	0.38	0.36	0.35	0.33	0.32	0.31	0.30	0.28
	5	0.42	0.41	0.39	0.38	0.36	0.35	0.33	0.32	0.31
	6	0.44	0.43	0.41	0.39	0.38	0.37	0.34	0.33	0.33
	8	0.46	0.46	0.45	0.41	0.40	0.40	0.36	0.36	0.35
	10	0.48	0.47	0.46	0.43	0.42	0.41	0.37	0.37	0.37
Illuminazione diffusa Lampade ad incandescenza 	1	0.13	0.10	0.081	0.12	0.09	0.072	0.062	0.058	0.055
	1.2	0.15	0.12	0.10	0.13	0.11	0.091	0.076	0.072	0.069
	1.5	0.19	0.15	0.13	0.16	0.13	0.12	0.10	0.093	0.090
	2	0.23	0.19	0.17	0.19	0.17	0.14	0.12	0.12	0.12
	2.5	0.25	0.22	0.19	0.21	0.19	0.17	0.14	0.14	0.13
	3	0.27	0.24	0.22	0.24	0.21	0.19	0.16	0.16	0.15
	4	0.31	0.28	0.25	0.26	0.25	0.22	0.19	0.19	0.18
	5	0.33	0.30	0.28	0.29	0.26	0.25	0.21	0.21	0.21
	6	0.35	0.32	0.30	0.30	0.28	0.26	0.23	0.23	0.22
	8	0.37	0.35	0.33	0.33	0.31	0.29	0.25	0.25	0.25
10	0.39	0.37	0.35	0.34	0.33	0.31	0.27	0.27	0.27	
Illuminazione semiindiretta Lampade ad incandescenza 	1	0.12	0.095	0.078	0.096	0.077	0.062	0.045	0.044	0.043
	1.2	0.14	0.12	0.096	0.11	0.093	0.076	0.056	0.055	0.054
	1.5	0.17	0.15	0.12	0.14	0.12	0.096	0.072	0.070	0.068
	2	0.20	0.18	0.16	0.16	0.14	0.13	0.093	0.092	0.090
	2.5	0.23	0.20	0.19	0.19	0.17	0.15	0.11	0.11	0.10
	3	0.25	0.22	0.20	0.20	0.18	0.17	0.12	0.12	0.12
	4	0.28	0.26	0.24	0.22	0.20	0.19	0.14	0.14	0.14
	5	0.30	0.28	0.26	0.24	0.22	0.21	0.16	0.16	0.16
	6	0.31	0.29	0.28	0.25	0.24	0.22	0.17	0.17	0.17
	8	0.34	0.32	0.31	0.27	0.26	0.24	0.19	0.19	0.19
10	0.35	0.33	0.32	0.28	0.27	0.26	0.20	0.19	0.19	

Tipo di illuminazione Tipo di lampada Curva fotometrica	$r_{soffitto}$ (%)	70			50			30		
	r_{pareti} (%)	50	30	10	50	30	10	50	30	10
	K	Fattore di utilizzazione u								
Illuminazione indiretta Lampade ad incandescenza 	1	0.11	0.095	0.079	0.081	0.067	0.056	0.050	0.040	0.034
	1.2	0.13	0.11	0.10	0.097	0.082	0.070	0.057	0.047	0.041
	1.5	0.16	0.14	0.12	0.11	0.10	0.088	0.067	0.058	0.051
	2.0	0.19	0.17	0.16	0.14	0.12	0.11	0.082	0.074	0.067
	2.5	0.22	0.20	0.18	0.15	0.14	0.13	0.092	0.084	0.078
	3	0.24	0.22	0.20	0.17	0.15	0.14	0.10	0.094	0.088
	4	0.26	0.25	0.23	0.19	0.18	0.17	0.11	0.10	0.10
	5	0.28	0.27	0.26	0.20	0.19	0.18	0.12	0.11	0.11
	6	0.29	0.28	0.27	0.21	0.20	0.19	0.12	0.12	0.11
	8	0.31	0.30	0.29	0.22	0.21	0.21	0.13	0.13	0.12
10	0.32	0.31	0.30	0.23	0.22	0.22	0.13	0.13	0.13	
Illuminazione diretta Lampade fluorescenti 	1	0.18	0.15	0.12	0.18	0.15	0.12	0.17	0.15	0.12
	1.2	0.21	0.18	0.15	0.21	0.18	0.15	0.20	0.18	0.15
	1.5	0.25	0.22	0.19	0.25	0.22	0.19	0.24	0.21	0.19
	2.0	0.30	0.27	0.24	0.30	0.27	0.24	0.29	0.26	0.24
	2.5	0.34	0.30	0.28	0.33	0.30	0.28	0.33	0.30	0.28
	3	0.36	0.33	0.31	0.36	0.33	0.31	0.35	0.33	0.31
	4	0.41	0.38	0.36	0.40	0.38	0.36	0.40	0.38	0.36
	5	0.43	0.41	0.39	0.43	0.41	0.39	0.42	0.41	0.39
	6	0.45	0.43	0.42	0.45	0.43	0.42	0.44	0.43	0.41
	8	0.48	0.47	0.46	0.48	0.47	0.46	0.48	0.46	0.45
10	0.50	0.49	0.48	0.50	0.49	0.48	0.50	0.49	0.48	
	1	0.15	0.13	0.11	0.15	0.13	0.11	0.14	0.13	0.11
	1.2	0.17	0.15	0.13	0.17	0.15	0.13	0.16	0.15	0.13

Apparecchi con griglie schermo Lampade fluorescenti 	1.5	0.19	0.17	0.16	0.19	0.17	0.16	0.19	0.17	0.16
	2.0	0.23	0.21	0.19	0.23	0.21	0.19	0.22	0.21	0.19
	2.5	0.25	0.24	0.22	0.25	0.24	0.22	0.25	0.24	0.22
	3	0.27	0.26	0.24	0.27	0.25	0.24	0.27	0.25	0.24
	4	0.30	0.29	0.28	0.30	0.29	0.27	0.30	0.28	0.27
	5	0.32	0.31	0.30	0.32	0.31	0.30	0.31	0.30	0.30
	6	0.33	0.32	0.31	0.33	0.32	0.31	0.33	0.32	0.31
	8	0.35	0.34	0.34	0.35	0.34	0.34	0.35	0.34	0.34
	10	0.36	0.36	0.35	0.36	0.36	0.35	0.36	0.35	0.35
	Illuminazione semidiretta Lampade fluorescenti 	1	0.15	0.13	0.11	0.14	0.12	0.10	0.13	0.11
1.2		0.18	0.15	0.13	0.16	0.14	0.12	0.15	0.13	0.11
1.5		0.21	0.19	0.16	0.19	0.17	0.15	0.18	0.16	0.14
2.0		0.26	0.23	0.21	0.24	0.21	0.20	0.22	0.20	0.18
2.5		0.29	0.26	0.24	0.27	0.25	0.23	0.24	0.23	0.21
3		0.31	0.29	0.27	0.29	0.27	0.25	0.26	0.25	0.23
4		0.35	0.33	0.31	0.32	0.31	0.29	0.30	0.28	0.27
5		0.37	0.35	0.34	0.34	0.33	0.31	0.31	0.30	0.30
6		0.38	0.37	0.35	0.35	0.34	0.33	0.33	0.32	0.31
8		0.41	0.40	0.39	0.38	0.37	0.36	0.35	0.35	0.34
10	0.43	0.42	0.41	0.40	0.39	0.38	0.37	0.36	0.36	
Illuminazione semidiretta Apparecchi con griglie schermo Lampade fluorescenti 	1	0.13	0.11	0.10	0.12	0.10	0.093	0.11	0.097	0.086
	1.2	0.15	0.13	0.12	0.14	0.12	0.11	0.12	0.11	0.10
	1.5	0.18	0.16	0.14	0.16	0.14	0.13	0.14	0.13	0.12
	2.0	0.21	0.19	0.17	0.19	0.17	0.16	0.17	0.16	0.15
	2.5	0.23	0.22	0.20	0.21	0.20	0.19	0.19	0.18	0.17
	3	0.25	0.24	0.22	0.23	0.22	0.21	0.21	0.20	0.19
	4	0.28	0.27	0.25	0.25	0.24	0.23	0.23	0.22	0.21
	5	0.30	0.28	0.27	0.27	0.26	0.25	0.24	0.24	0.23
	6	0.31	0.30	0.29	0.28	0.27	0.27	0.25	0.25	0.24
	8	0.32	0.32	0.31	0.30	0.29	0.29	0.27	0.26	0.26
10	0.34	0.33	0.33	0.31	0.30	0.30	0.28	0.28	0.27	

Tipo di illuminazione Tipo di lampada Curva fotometrica	$r_{soffitto}$ (%)	70			50			30		
	r_{muri} (%)	50	30	10	50	30	10	50	30	10
Illuminazione mista Lampade fluorescenti 	K	Fattore di utilizzazione u								
	1	0.16	0.13	0.11	0.14	0.12	0.10	0.12	0.10	0.090
	1.2	0.19	0.16	0.14	0.16	0.15	0.13	0.14	0.12	0.11
	1.5	0.22	0.19	0.17	0.19	0.17	0.15	0.17	0.15	0.13
	2.0	0.27	0.24	0.21	0.24	0.21	0.19	0.20	0.18	0.17
	2.5	0.30	0.27	0.25	0.26	0.24	0.23	0.23	0.21	0.19
	3	0.32	0.30	0.28	0.29	0.27	0.25	0.25	0.23	0.21
	4	0.36	0.34	0.32	0.32	0.30	0.29	0.28	0.26	0.25
	5	0.38	0.37	0.35	0.34	0.33	0.31	0.29	0.28	0.27
	6	0.40	0.38	0.37	0.35	0.34	0.33	0.31	0.30	0.29
8	0.42	0.41	0.40	0.37	0.36	0.35	0.33	0.32	0.31	
10	0.44	0.43	0.42	0.39	0.38	0.37	0.34	0.33	0.33	
Illuminazione mista Apparecchi sospesi in vetro opalino Lampade fluorescenti 	1	0.18	0.15	0.13	0.16	0.13	0.11	0.13	0.11	0.096
	1.2	0.21	0.18	0.15	0.18	0.16	0.14	0.15	0.13	0.12
	1.5	0.25	0.22	0.19	0.22	0.19	0.17	0.18	0.16	0.14
	2.0	0.30	0.27	0.24	0.26	0.23	0.21	0.22	0.20	0.18
	2.5	0.34	0.31	0.28	0.29	0.26	0.24	0.24	0.22	0.21
	3	0.37	0.34	0.31	0.31	0.29	0.27	0.26	0.24	0.23
	4	0.41	0.38	0.36	0.35	0.33	0.31	0.29	0.28	0.26
	5	0.43	0.41	0.39	0.37	0.36	0.34	0.31	0.30	0.29
	6	0.45	0.43	0.41	0.39	0.37	0.36	0.33	0.32	0.30
	8	0.47	0.46	0.44	0.41	0.40	0.39	0.35	0.34	0.33
10	0.49	0.48	0.47	0.42	0.41	0.41	0.36	0.36	0.35	
1	0.15	0.13	0.11	0.13	0.12	0.10	0.12	0.10	0.088	

Illuminazione mista Apparecchi con griglie schermo Montaggio a soffitto Lampade fluorescenti 	1	0.15	0.13	0.11	0.13	0.12	0.10	0.12	0.10	0.088
	1.5	0.20	0.18	0.17	0.18	0.16	0.13	0.16	0.12	0.13
	2.0	0.24	0.22	0.20	0.21	0.19	0.18	0.18	0.17	0.16
	2.5	0.27	0.25	0.23	0.24	0.22	0.20	0.20	0.19	0.18
	3	0.29	0.27	0.25	0.26	0.24	0.23	0.22	0.21	0.20
	4	0.32	0.31	0.29	0.28	0.27	0.26	0.24	0.23	0.23
	5	0.34	0.33	0.32	0.30	0.29	0.28	0.26	0.25	0.24
	6	0.35	0.34	0.33	0.31	0.30	0.30	0.27	0.26	0.26
	8	0.37	0.36	0.35	0.33	0.32	0.32	0.29	0.28	0.28
	10	0.38	0.38	0.37	0.34	0.34	0.33	0.30	0.29	0.29
Illuminazione mista Apparecchi sospesi con griglie schermo Lampade fluorescenti 	1	0.16	0.13	0.12	0.14	0.12	0.10	0.12	0.10	0.091
	1.2	0.18	0.16	0.14	0.16	0.14	0.13	0.14	0.12	0.11
	1.5	0.21	0.18	0.17	0.18	0.17	0.15	0.16	0.15	0.13
	2.0	0.25	0.23	0.21	0.22	0.20	0.18	0.19	0.18	0.16
	2.5	0.28	0.26	0.24	0.24	0.22	0.21	0.21	0.19	0.18
	3	0.30	0.28	0.27	0.26	0.25	0.23	0.23	0.21	0.20
	4	0.34	0.32	0.30	0.29	0.28	0.27	0.25	0.24	0.23
	5	0.35	0.34	0.33	0.31	0.30	0.29	0.27	0.26	0.25
	6	0.37	0.35	0.35	0.32	0.31	0.31	0.28	0.27	0.26
	8	0.39	0.38	0.37	0.34	0.33	0.33	0.29	0.29	0.28
10	0.40	0.39	0.39	0.35	0.35	0.34	0.30	0.30	0.30	
	1	0.14	0.12	0.10	0.12	0.10	0.091	0.10	0.088	0.077
	1.2	0.16	0.14	0.12	0.14	0.12	0.11	0.12	0.10	0.094
	1.5	0.19	0.17	0.15	0.16	0.15	0.13	0.14	0.12	0.11
	2.0	0.23	0.21	0.19	0.19	0.18	0.16	0.16	0.15	0.14
	2.5	0.26	0.24	0.22	0.22	0.21	0.19	0.18	0.17	0.16
	3	0.28	0.26	0.24	0.24	0.22	0.21	0.19	0.18	0.17
	4	0.31	0.29	0.28	0.26	0.25	0.24	0.21	0.20	0.20
	5	0.33	0.31	0.30	0.28	0.27	0.26	0.23	0.22	0.21
	6	0.34	0.33	0.32	0.29	0.28	0.27	0.24	0.23	0.22
	8	0.36	0.35	0.34	0.30	0.30	0.29	0.25	0.25	0.24
10	0.37	0.36	0.36	0.32	0.31	0.30	0.26	0.26	0.25	

10) Determinazione del flusso luminoso totale

Il flusso totale j_t emesso dall'insieme delle lampade è dato da:

$$\varphi_t = \frac{\varphi_{\text{utile}}}{U} = \frac{ES\delta}{U} = \frac{ES\delta}{\eta_u}$$

Ciascuna lampada emetterà quindi un flusso dato da tale valore diviso il numero di lampade installate:

$$\varphi_i = \frac{\varphi_t}{n^{\circ}\text{lampade}}$$

11) Determinazione della potenza delle lampade

La potenza P di ciascuna lampada è data dal rapporto fra il valore del flusso da essa emesso e la sua efficienza ϵ :

$$P = \frac{\varphi_i}{\epsilon}$$

5.3 Un'applicazione.

Progettare l'impianto di illuminazione per un capannone industriale adibito alla tessitura, avente le seguenti caratteristiche:

- a) lunghezza 30 m, larghezza 15 m ed altezza 4.5 m;*
- b) colore del soffitto grigio chiaro, pareti in cemento non intonacato.*

Si richiede illuminazione diretta (concentrata) realizzata con apparecchi illuminanti di classe C dotati di griglie schermo, contenenti lampade fluorescenti con efficienza di 65 lm/W e sospesi a 50 cm dal soffitto.

1) scelta del livello di illuminamento orizzontale generale sul piano di lavoro:

dalla tabella 5.2: illuminamento generale di 250 lux (tale valore potrà, se necessario, essere integrato fino agli 800 lux con lampade individuali);

2) scelta del tipo di lampada:

viene scelta una lampada fluorescente;

3) scelta del tipo di illuminazione e del tipo di apparecchio:

viene prescelto un tipo di illuminazione diretta, realizzata con un apparecchio illuminante di classe C;

4) scelta dell'altezza di sospensione:

l'altezza della sorgente sopra il piano utile, fissato a 0.85 metri, è dato dall'altezza del locale diminuita del valore delle altezze di sospensione e del piano utile, ossia

$$4.5\text{m} - 0.5\text{m} - 0.85\text{m} = 3.15\text{m} ;$$

5) ripartizione dei centri luminosi:

si determina il rapporto fra la distanza fra due apparecchi e la loro altezza sul piano di lavoro (n/h) in funzione della classe dell'apparecchio, che per illuminazione diretta risulta compresa fra la A e la E. Dalla tabella 5.3 si ricava $n/h = 1$, da cui $n = 3.15\text{ m}$.

Poichè il capannone è largo 15 m, il numero di lampade da installare nel senso della larghezza è dato da

$$\frac{15\text{m}}{3.15\text{m}} \cong 5 \text{ lampade}$$

e nel senso della lunghezza da

$$\frac{30\text{m}}{3.15\text{m}} \cong 10 \text{ lampade .}$$

In totale occorrono quindi 50 lampade.

Dalla parete si deve lasciare una distanza q variabile fra $\pi/3$ ed $n/2$. Si sceglie $q = 1.5 \text{ m}$.

6) determinazione delle caratteristiche geometriche degli ambienti:

In base alle dimensioni dell'ambiente, l'indice del locale K risulta pari a

$$K = \frac{ab}{h(a+b)} = \frac{(15 \times 30) \text{m}^2}{3.15\text{m}(15+30)\text{m}} = 3.17 .$$

7) determinazione dei coefficienti di riflessione delle superfici dell'ambiente:

Dalla tabella 5.5 si trova che il coefficiente di riflessione del soffitto è pari a 0.65, mentre quello delle pareti è pari a 0.4.

8) *determinazione del fattore di utilizzazione:*

è necessario determinare il coefficiente o il fattore di utilizzazione. Si sceglie di determinare il secondo. A tal fine è necessario preventivamente conoscere:

- a) il tipo di apparecchio illuminante;
- b) il coefficiente di riflessione diffusa delle pareti e del soffitto;
- c) l'indice del locale.

In corrispondenza ai dati relativi, dalla tabella 5.7 relativa al fattore di utilizzazione si trova, dopo aver effettuato alcune interpolazioni, $U = .269$.

9) *determinazione del fattore di invecchiamento:*

si utilizza il valore del coefficiente tipico per illuminazione diretta (1.3) tratto dalla tabella 5.8.

10) *determinazione del flusso luminoso totale:*

il flusso totale emesso dalle lampade varrà allora:

$$\varphi_t = \frac{ES\delta}{\eta U} = \frac{(250 \text{lux}) \times (450 \text{m}^2) \times 1.3}{0.269} = 543.680 \text{ lm}$$

ed il flusso emesso da ogni lampada sarà dato da tale valore diviso il numero di lampade (50):

$$\varphi_i = \frac{\varphi_t}{50} \cong \frac{543.680 \text{ lm}}{50} = 10874 \text{ lm} .$$

11) *determinazione della potenza delle lampade:*

Per ottenere quindi la potenza di ogni lampada bisogna dividere il flusso emesso da ciascuna di esse per l'efficienza (50 lm/W). Si ottiene

$$P = \frac{\varphi_i}{\varepsilon} = \frac{10874 \text{ lm}}{65 \text{ lm/W}} \cong 167 \text{ W} .$$

Si potranno quindi prescegliere 50 lampade da 200 W.

5.4 *Contrasto*

Il *contrasto* C fra un oggetto illuminato e lo sfondo può essere definito come:

$$C = \frac{L_2 - L_1}{L_1} \tag{5.7}$$

dove con L_1 ed L_2 si indicano rispettivamente la luminanza dello sfondo e dell'oggetto.

Poiché le luminanze delle varie superfici, che si comportano da sorgenti secondarie, dipendono sia dagli illuminamenti che dai loro coefficienti di riflessione (2.8) (2.12), se l'oggetto osservato e lo sfondo sono entrambi diffondenti e sottoposti allo stesso illuminamento, le loro luminanze saranno proporzionali ai rispettivi coefficienti di riflessione.

Ad esempio elevato contrasto si avrà nella lettura di caratteri stampati in nero ($r = 0$) su carta bianca ($r = 1$), mentre un contrasto minore si avrà se il colore dei caratteri è simile a quello dello sfondo ($r_1 \cong r_2$). In particolare se l'oggetto è nero $L_2 = 0$ e $C = 1$; se l'oggetto e lo sfondo hanno lo stesso colore $L_2 = L_1$ e $C = 0$. Il più piccolo contrasto osservabile è $C = 0.01$.

A parità di altre condizioni, quando il contrasto fra gli oggetti osservati e lo sfondo è piccolo dev'essere maggiore il valore dell'illuminamento necessario per ottenere una sufficiente visibilità. I valori di illuminamento minimi per diverse combinazioni di dimensione degli oggetti e di contrasto di luminanza vengono proposti dagli appositi organismi normatori e talvolta adottati dagli stati come norme ufficiali.

5.5 *L'abbagliamento*

E' una situazione di disturbo che comporta una diminuzione della capacità visiva dell'occhio, che può arrivare fino ad una perdita temporanea della visibilità, dovuta alla presenza nel campo visivo di zone a luminanza molto elevata, sia in valore assoluto che rispetto al resto del campo.

La causa del fenomeno può essere la presenza di una o più sorgenti luminose direttamente visibili dalle più comuni direzioni di osservazione: si parla in tal caso di abbagliamento diretto.

L'occhio umano è infatti particolarmente sensibile alla luce proveniente da sorgenti situate entro un cono la cui generatrice forma un angolo di 30° con l'asse visuale. Si deve avere cura pertanto di installare i corpi illuminanti a luce diretta o prevalentemente diretta a grande altezza o defilati

dalla vista o di schermare adeguatamente le lampade affinché la luce raggiunga l'operatore dopo riflessione o per diffusione.

Il problema si pone soprattutto con le lampade ad incandescenza, il cui filamento ha un'elevata luminanza, mentre è meno grave con le lampade fluorescenti, che hanno bassa luminanza.

Una verifica dell'esistenza di rischio di abbagliamento da parte di un apparecchio installato in una particolare posizione comporta in generale l'esame della posizione dell'apparecchio nel campo visivo dell'osservatore, considerato seduto e con gli occhi a 1.2 m da terra, con riferimento all'angolo γ (o a $\text{tg } \gamma = A/h_s$) (zona visiva critica, figura 5.2) sotto cui l'osservatore vede la sorgente, e la successiva valutazione della luminanza dell'apparecchio per i diversi valori di γ compatibili con il locale.

La verifica va effettuata con riferimento alla tipologia di impegno visivo (tabella 5.8), che va dal lavoro di precisione (uffici, aule, ecc.) a quello ordinario (magazzinaggio, ecc.) ed al valore del livello di illuminamento del locale, importante soprattutto per livelli elevati.

In Italia ed in genere nei paesi della Comunità Europea sono essenzialmente i due metodi CIE che vengono impiegati e precisamente:

Tabella 5.8 - Classi di qualità degli impianti di illuminazione in funzione del tipo di compito o attività svolti.

<i>Classe di qualità</i>	<i>Tipo di compito o attività</i>
A	compiti visivi molto difficoltosi
B	compiti visivi che richiedono prestazioni visive elevate
C	compiti visivi che richiedono prestazioni visive normali
D	compiti visivi che richiedono prestazioni visive modeste
E	compiti che richiedono prestazioni visive modeste in interni in cui le persone non sono ubicate in una posizione di lavoro precisa ma si spostano

- a) il metodo delle curve di luminanza;
- b) il metodo dell'indice di luminanza (CGI).

Un terzo metodo, usato negli Stati Uniti e nel Canada, individuato con la sigla VCP (*Visual Comfort Probability System*), fornisce una classificazione dell'abbagliamento in termini di percentuale della popolazione che, per un dato tipo di impianto di illuminazione, giudica il limite fra il comfort visivo ed il fastidio. Nel seguito verrà descritto il metodo a).

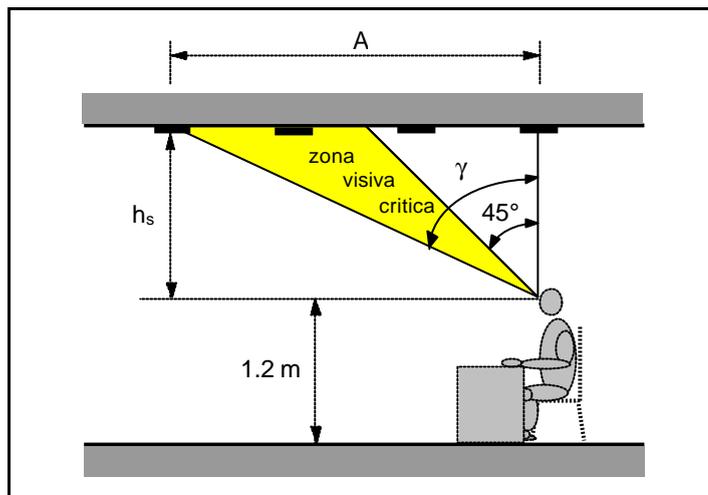


Figura 5.2 – Posizioni critiche di un apparecchio illuminante nel campo visivo di un osservatore.

5.6 Metodo delle curve di luminanza

Il metodo delle curve di luminanza è basato sull'uso di due diagrammi, che pongono in relazione la luminanza massima tollerabile degli apparecchi illuminanti con gli angoli di schermatura degli stessi (figura 5.3, Moncada Lo Giudice e de Lieto Vollaro, 1993). In generale le norme CEI prescrivono una luminanza massima degli oggetti che cadono nel campo visuale compresa fra 2000 e 3000 cd/m^2 , a seconda del tipo di illuminazione.

In particolare i diagrammi forniscono, al variare dell'illuminamento medio di esercizio su un piano di lavoro orizzontale, gli angoli di schermatura minima che consentono di non avere problemi di abbagliamento, per 5 classi di qualità degli impianti che tengono conto del grado di impegno visivo del compito svolto dall'osservatore.

Essi sono distinti per tipo e disposizione degli apparecchi di illuminazione: in particolare uno riporta le curve limite di luminanza A , valide per tutti gli apparecchi a emissione laterale nulla (ossia apparecchi senza bordi laterali luminosi o incassati nel soffitto) o debole (flusso laterale inferiore al 20% del flusso totale emesso) (apparecchi con bordi laterali luminosi di altezza inferiore ai 30 mm). Tali curve valgono inoltre per apparecchi di illuminazione lineari (per i quali la lunghezza dell'area luminosa è pari almeno al doppio della sua larghezza) con emissione laterale parallela alla direzione di osservazione (apparecchi con bordi laterali luminosi disposti parallelamente a tale direzione).

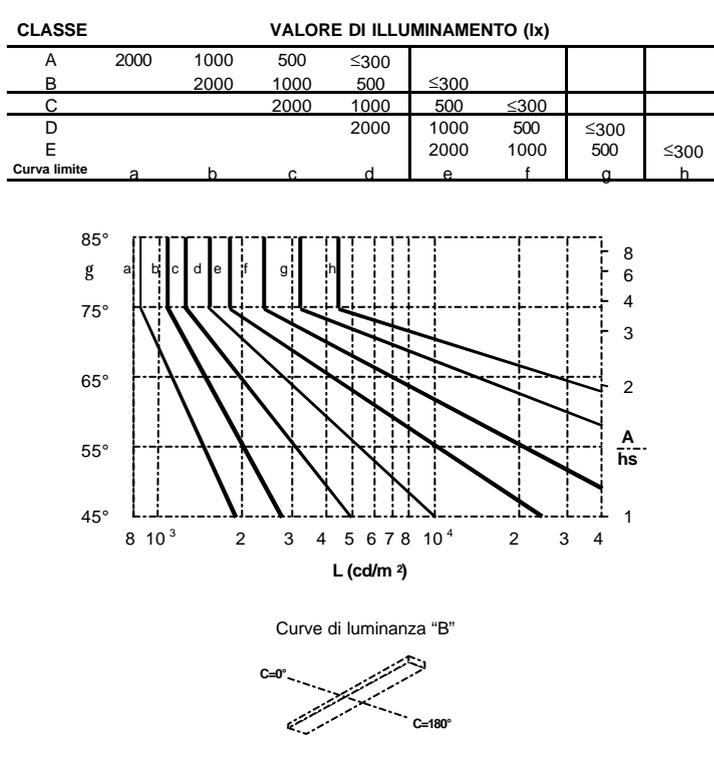
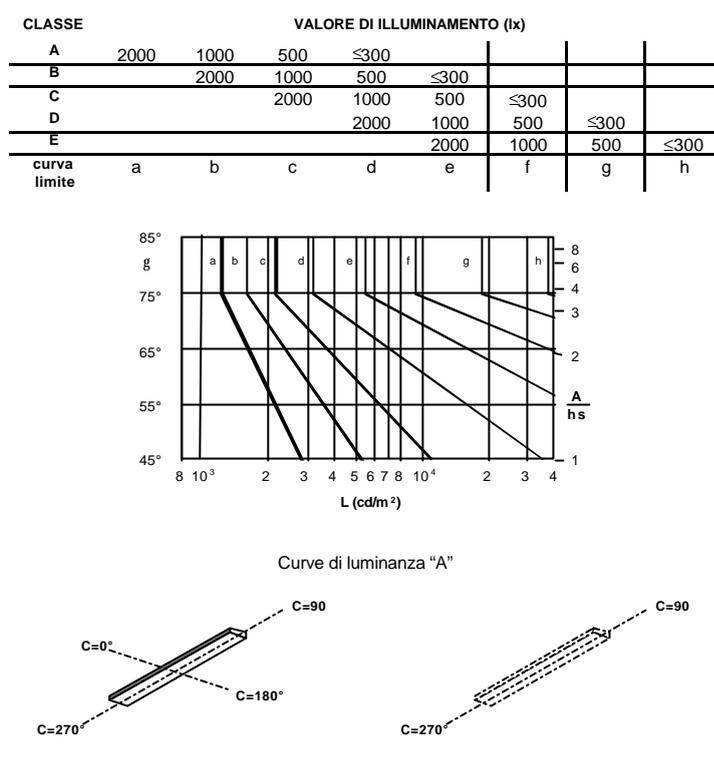


Figura 5.3 - Curve limite di luminanza.

In entrambi i casi la superficie apparente è quindi sostanzialmente quella della faccia inferiore dell'apparecchio.

Le curve limite di luminanza **B**, riportate in un secondo diagramma, sono valide per tutti gli apparecchi di illuminazione con emissione laterale, ossia con bordi laterali luminosi, ad eccezione di quelli disposti parallelamente alla direzione di osservazione.

In ordinata nei due diagrammi sono riportati gli angoli di irraggiamento γ compresi fra 45° e 85° , che rappresentano le direzioni critiche convenzionali, espressi come rapporto tra le distanze A ed h_s , in funzione dei quali è necessario riportare sugli stessi diagrammi le curve di luminanza dell'apparecchio in esame.

Generalmente il costruttore fornisce due distinte curve di luminanza, valide rispettivamente per installazione dell'apparecchio longitudinale o trasversale (con linea tratteggiata per la direzione di osservazione longitudinale e con linea continua per la direzione di osservazione trasversale). Se invece non si possiede la curva di luminanza di un apparecchio la si può calcolare partendo dalle intensità indicate dalle curve fotometriche e dalle corrispondenti superfici apparenti dell'apparecchio.

Una volta riportate le curve di luminanza sul diagramma e selezionata la relativa curva limite bisogna verificare se parte della lampada ricade nella zona visiva critica, nel qual caso occorre provvedere ad opportune schermature. Schematicamente tale verifica, una volta scelto il tipo di apparecchio e la sua disposizione, si può effettuare seguendo la seguente procedura:

si determina la classe di qualità dell'apparecchio in funzione del tipo di compito ed attività in esame per mezzo della tabella 5.8;

1. sulla base di tale classe e del valore di illuminamento medio stabilito si individuano nei diagrammi A o B le corrispondenti curve limite a, b, \dots, h (se la scelta della disposizione non fosse definitiva converrà prudenzialmente impiegare le curve di luminanza B);
2. si verifica che le luminanze dell'apparecchio illuminante prescelto nelle direzioni critiche $45^\circ < \gamma < 85^\circ$ rispettino i valori di luminanza consentiti dalle curve suddette, ossia che la curva tracciata per il caso particolare lasci sulla destra la curva limite pertinente al caso;
3. se parte dell'apparecchio illuminante ricade nella zona visiva critica, occorre verificare che l'angolo di schermatura rientri nei valori riportati nella tabella 5.9.

Tabella 5.9 - Angoli di schermatura minima in funzione delle classi di qualità e dei valori di luminanza per diversi tipi di lampade (Moncada Lo Giudice e De Lieto Vollaro, 1993).

Fasce di luminanza media delle lampade (cd/m^2)	Angoli di schermatura minima		Tipo di lampada
	A,B,C	D,E	
$L < 20 \times 10^3$	20°	10° ^(*)	Fluorescente.
$20 \times 10^3 \leq L \leq 500 \times 10^3$	30°	20°	A scarica ad alta pressione con bulbo fluorescente o diffondente.
$> 500 \times 10^3$	30°	30°	Ad incandescenza e a scarica con bulbo trasparente.

(*) Per lampade lineari viste in direzione 0° .

5.7 Un'applicazione

Un apparecchio luminoso avente dimensioni 1.20 m x 0.24 m, contenente una lampada che emette un flusso luminoso di 5600 lm, è installato in un ambiente nel quale si svolgono compiti visivi di classe A, per i quali è richiesto un flusso di 1000 lux.

Determinare gli angoli sotto i quali non si verifica abbagliamento sapendo che l'apparecchio non ha bordi laterali luminosi.

E' necessario calcolare le curve di luminanza nei piani longitudinale e trasversale e riportarle nel diagramma che contiene le curve limite di luminanza "A", verificando le direzioni consentite.

A tal fine si legge sulla curva fotometrica (figura 5.4) il valore dell'intensità luminosa I_{α} in funzione degli angoli α compresi fra le direzioni critiche, che vanno da 45° a 85°, e si determinano le aree proiettate A_{α} per mezzo dell'espressione:

$$A_{\alpha} = A \cos \alpha$$

dove l'area A della lampada risulta pari a:

$$A = (1.2 \text{ m}) \times (0.24 \text{ m}) = 0.288 \text{ m}^2 .$$

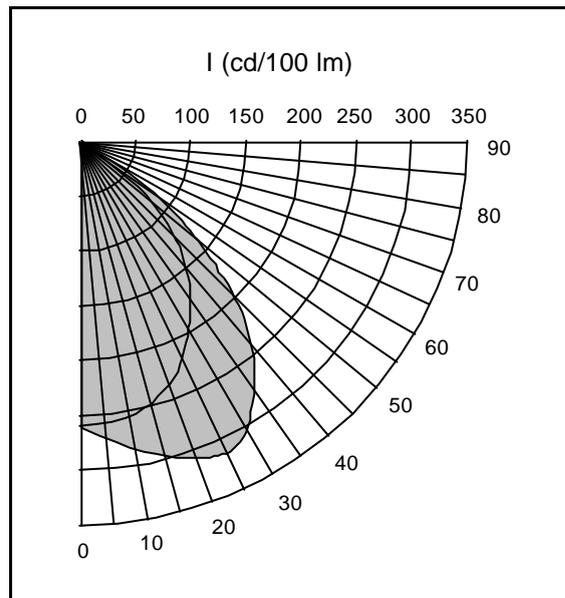


Figura 5.4 - Curva fotometrica dell'apparecchio.

I valori di intensità luminosa, poiché la curva fotometrica è riferita ad una sorgente che emette un flusso di 1000 lm, si ottengono moltiplicando i valori letti sulla curva per 5.6 (per flusso emesso pari a 5600 lm).

Noti i valori delle aree e delle intensità nelle diverse direzioni è possibile quindi determinare i corrispondenti valori delle luminanze nelle direzioni longitudinali e trasversali per mezzo dell'espressione:

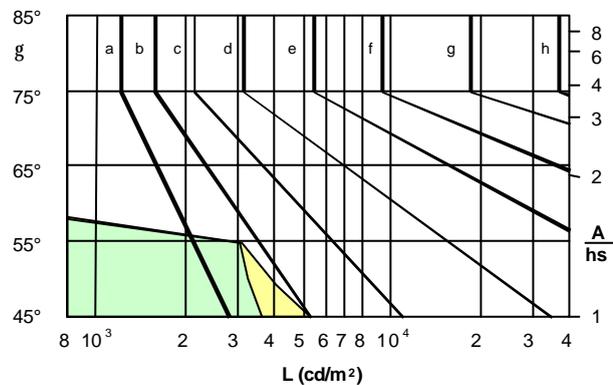
$$L_{\alpha} = \frac{I_{\alpha}}{A_{\alpha}}$$

(tabella 5.10) e costruirne le relative curve sui diagrammi che riportano le curve limite "A" (figura 5.5).

Tabella 5.10 - Calcolo delle luminanze dell'apparecchio per angoli compresi fra le direzioni critiche.

a	cosa	A cosa	Piano longitudinale		Piano trasversale	
			I _a (cd)	L _a (cd/m ²)	I _a (cd)	L _a (cd/m ²)
40	0.766	0.221	250	6335		4181
45	0.707	0.204	190	5216		3843
50	0.643	0.185	130	3935		3330
55	0.574	0.165	90	3054		3054
60	0.500	0.144	10	389		389
65	0.423	0.122	7	321		321
70	0.342	0.098	5	286		286
75	0.259	0.075	3	224		224
80	0.174	0.050	1	112		112
85	0.087	0.025	-	-		-

CLASSE	VALORE DI ILLUMINAMENTO (lx)							
A	2000	1000	500	≤300				
B		2000	1000	500	≤300			
C			2000	1000	500	≤300		
D				2000	1000	500	≤300	
E					2000	1000	500	≤300
curva limite	a	b	c	d	e	f	g	h



Curve di luminanza "A"

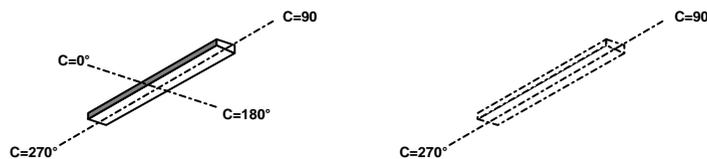


Figura 5.5 - Curve di luminanza dell'apparecchio nelle direzioni trasversale e longitudinale.

In base alla classe di qualità dell'impianto di illuminazione dedotta dalla tabella 5.8 (classe A) e del livello di illuminamento stabilito (1000 lux) si individua quindi il tipo di curva limite (b), verificando che la curva di luminanza costruita la lasci tutta alla sua destra.

In base alla curva tracciata si trova che per nessuna delle direzioni critiche esiste rischio di abbagliamento.

6. Bibliografia

- AA. VV., (1998), *La qualità ambientale degli edifici*, a cura di D. Faconti e S. Piardi, Maggioli.
- I.E.S., (1972), *Daytime Lighting in Building*, Londra (edizione rivista dal CIBSE, 1983).
- Moncada Lo Giudice G. e de Lieto Vollaro A., (1993), *Illuminotecnica*, Masson, Editoriale ESA.
- Sacchi A., Cagliaris G., (1990), *Fisica Tecnica*, UTET.
- Vandeplanque P., (1991), *L'illuminotecnica*, Tecniche nuove.