

## CAPITOLO 8

# APPLICAZIONI DI ILLUMINOTECNICA

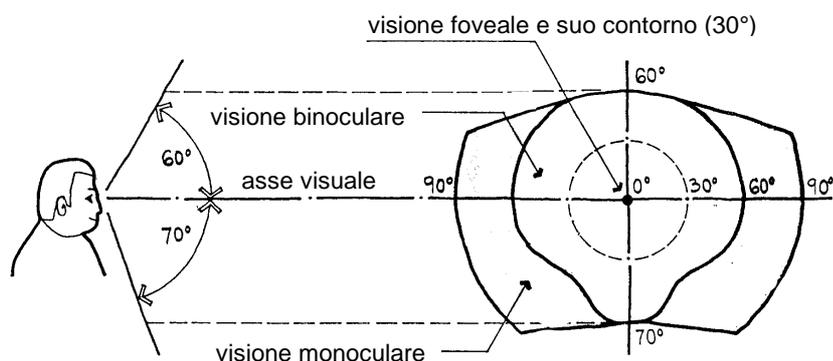
### 8.1 Ulteriori caratteristiche della visione

In generale un oggetto risulta visibile se si staglia rispetto allo sfondo e cioè se l'occhio percepisce corrispondenti differenze di luminanza.

L'entità di flusso luminoso in ingresso all'occhio è regolata dalla pupilla in modo simile al diaframma di una telecamera; in particolare l'apertura della pupilla varia in funzione dell'intensità della luce in ingresso, da un diametro di circa 2 mm, a circa 7.5 mm. Il muscolo ciliare, collegato al cristallino ne governa la forma agendo sul bordo circolare dello stesso, per modificare la curvatura della faccia esterna ed interna. Grazie a quest'intervento (l'effetto è equiparabile a quello di una lente biconvessa a struttura variabile) l'occhio può mettere a fuoco sulla retina le immagini degli oggetti osservati, dai più vicini ai più lontani.

#### 8.1.1 Campo visuale

Il **campo visuale binoculare** (cioè la visione con entrambi gli occhi) si estende verticalmente per  $130^\circ$  ed orizzontalmente per più di  $120^\circ$  quando entrambi gli occhi sono focalizzati su un oggetto fisso. La visione con un solo occhio è detta **visione monoculare**. Il disegno seguente mostra l'estensione dei campi visuali binoculare e monoculare.



### 8.1.2 Fattore di contrasto

Se nel campo visivo sono presenti superfici con luminanze differenti, la visione si adatta alla luminanza media che caratterizza il campo visivo di fondo, ad esempio, valore medio  $L_1$ . In queste condizioni, in assenza di significative differenze cromatiche, l'occhio può distinguere un oggetto solo se tra la luminanza  $L_2$  di questo e quella del fondo  $L_1$  vi è una sufficiente differenza.

Si definisce **fattore di contrasto C** il rapporto:

$$C = \frac{|L_2 - L_1|}{L_1}$$

ove:

$L_2$  = luminanza dell'oggetto;

$L_1$  = luminanza del fondo.

Si definisce **contrasto relativo di soglia  $c_s$** , la più piccola differenza di luminanza ( $L_2$ ) di un'area osservata necessaria perché questa risulti visibile rispetto alla luminanza del fondo ( $L_1$ ):

$$c_s = \frac{|L_2 - L_1|_{\min}}{L_1}$$

L'esperienza dimostra che  $c_s$  **decrece in modo significativo all'aumentare della luminanza  $L_1$** . Tramite il fattore di contrasto  $C$  può anche definirsi il **grado di percettibilità del contrasto  $n$** , indicativo della visibilità di un oggetto rispetto al fondo. Tale fattore è definito come:

$$n = \frac{C}{c_s}$$

Se  $n$  è piccolo la percezione diviene difficoltosa e ciò si verifica, ad esempio quando  $L_2 \rightarrow L_1$ . All'opposto un valore  $n$  elevato indica un'adeguata percezione del particolare osservato. Si può osservare che se le superfici presentassero un comportamento lambertiano il fattore di contrasto dipenderebbe, a rigori, solo dai **fattori di riflessione  $\rho_1$  e  $\rho_2$** . Infatti, per superfici lambertiane sottoposte ad un illuminamento  $E$ , risulta :

$$L_1 = \frac{\rho_1 \cdot E}{\pi} \quad \text{e} \quad L_2 = \frac{\rho_2 \cdot E}{\pi}$$

e, quindi:

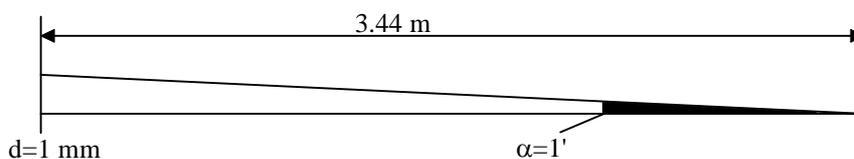
$$C = \frac{|L_2 - L_1|}{L_1} = \frac{\frac{\rho_2 E}{\pi} - \frac{\rho_1 E}{\pi}}{\frac{\rho_1 E}{\pi}} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1}$$

Poiché in genere le superfici reali non sono **lambertiane** la bontà della visione (e cioè **C**) dipenderà anche dalla direzione della luce incidente. Ad esempio, quando la direzione di osservazione viene interessata da contributi di riflessione speculare, sia **L<sub>1</sub>** che **L<sub>2</sub>** aumentano significativamente e **C** diminuisce notevolmente. La figura mostra questo fenomeno su una pagina su cui si riflette un'intensa componente riflessa specularmente verso l'osservatore: si osservi come il contrasto tra i caratteri di stampa e lo sfondo chiaro è ridotto.



### 8.1.3 Acuità visuale

Con il termine **acuità visuale** s'intende la capacità dell'occhio di percepire e distinguere i dettagli degli oggetti. Si usa assegnare valore unitario all'acuità visuale, quando l'occhio è in grado di distinguere due punti distanti tra loro 1 [mm+ a 3.44 [m] dall'occhio. In riferimento alla figura seguente, risulta  $\alpha = 1'$ , pari cioè a 1/60 di grado sessagesimale (l'angolo giro corrisponde, come noto, a 360° sessagesimali).

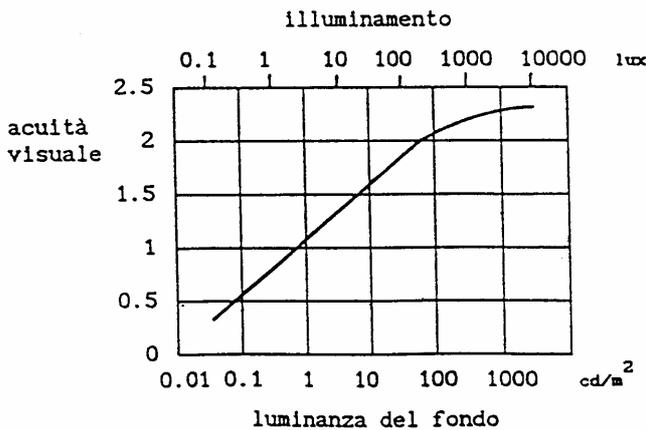


L'acuità visuale è definita da:

$$A = 1/\alpha$$

e risulta, quindi, unitaria in corrispondenza ad  $\alpha = 1'$ . Se l'occhio riesce a distinguere i due punti citati solo se posti ad esempio alla distanza di 2 mm, risulta all'incirca  $\alpha = 2'$ , e quindi  $A = 0.5$ .

L'acuità visuale, e quindi la capacità di svolgere un lavoro di precisione, dipende



dalla luminanza degli oggetti osservati e dalla luminanza dello fondo. Ad esempio, il diagramma a lato riporta l'andamento dell'acuità visuale in funzione della luminanza, e quindi anche dell'illuminamento del fondo, per oggetti disegnati in nero.

#### 8.1.4 Abbagliamento

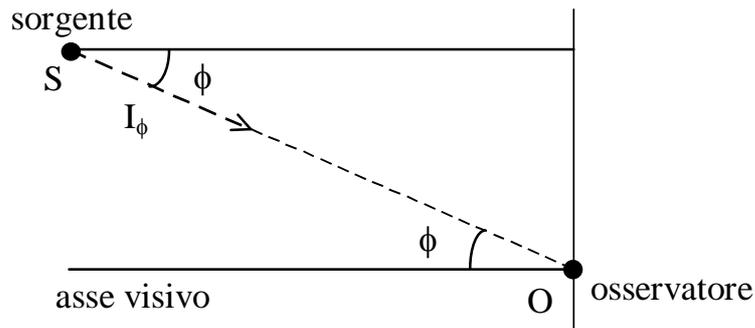
Si parla di fenomeno d'**abbagliamento** allorché la prestazione visiva viene ad essere ridotta o compromessa da una cattiva distribuzione, nel campo visivo, delle luminanze che caratterizzano le varie superfici. L'abbagliamento produce affaticamento dell'occhio e comporta una variazione sfavorevole dei parametri precedentemente citati (acuità visiva, fattore di contrasto, ecc.). Al crescere della luminanza della superficie abbagliante, si distingue, in una prima fase, un **abbagliamento relativo** (parziale riduzione della prestazione visiva) e, quindi, un **abbagliamento assoluto**, quando l'occhio non è in grado di vedere nient'altro che l'oggetto abbagliante.

L'abbagliamento può essere stimato mediante numerose metodologie. Una delle più semplici è quella di fare riferimento al fattore di contrasto **C** prima definito. In prima approssimazione **valori ottimali** di questo parametro si aggirano attorno a valori di circa **2-2.5**, in un campo sufficientemente ampio di valori della luminanza media. Si ha **abbagliamento relativo** in corrispondenza a valori del fattore di contrasto **3-4** volte superiori ai valori citati. La possibilità d'abbagliamento sussiste ad esempio nella presenza di sorgenti luminose caratterizzate da elevata luminanza. Si può osservare che

nel caso semplice di una sorgente puntiforme, rappresentata nella seguente figura, l'illuminamento  $E$  sull'occhio di un osservatore (da cui dipende l'abbagliamento) risulta:

$$E = I_{\phi} \cos \phi / R^2$$

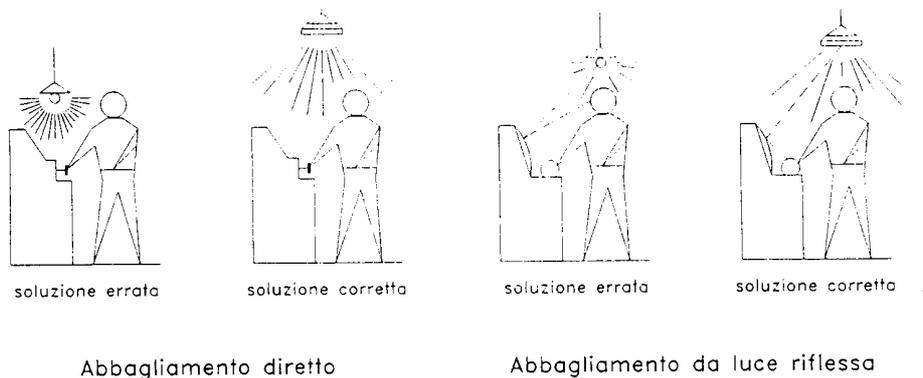
e, cioè, l'abbagliamento sarà funzione dell'angolo  $\phi$  formato dalla congiungente occhio-sorgente e l'asse visivo, della distanza di osservazione  $R$  e dell'intensità luminosa  $I_{\phi}$ .



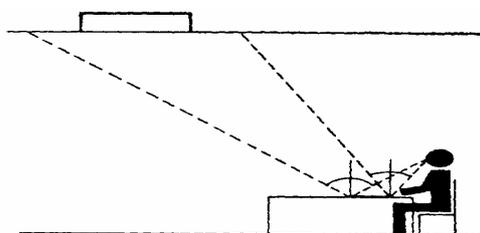
Come già accennato, l'abbagliamento relativo e assoluto comporta una più o meno grave riduzione della capacità di visione. Ma ancor prima di giungere a questi limiti, può manifestarsi una sensazione di fastidio che è necessario eliminare, o quanto meno controllare, se non altro perché rende più faticosa la visione. È possibile distinguere tra **abbagliamento diretto**, che si ha quando le sorgenti luminose di elevata luminanza rientrano nel campo visivo, e **abbagliamento riflesso**, presente quando la luce viene riflessa da una superficie nella direzione di osservazione.

Senza entrare in particolari, si può ricordare che per la valutazione dell'**abbagliamento diretto** provocato da singole sorgenti sono stati proposti diversi indici di valutazione: in generale l'abbagliamento cresce all'aumentare della luminanza della sorgente ed al diminuire dell'angolo tra l'asse visivo e la direzione che individua la sorgente stessa come precedentemente accennato.

L'**abbagliamento riflesso** è particolarmente fastidioso se proviene dal piano di lavoro: ciò si verifica in particolare se il materiale usato per il piano è troppo lucido e le sorgenti disposte in modo errato. Si può ridurre questo disturbo adottando un opportuno orientamento della sorgente rispetto al piano di lavoro e usando per quest'ultimo materiali opachi che rinviano la luce diffusamente.



Al fine di evitare questa forma d'abbagliamento indiretto, sarà opportuno evitare di collocare apparecchi d'elevata luminanza entro la zona d'offesa come rappresentato nella seguente figura.



Allo scopo di realizzare un'illuminazione di buona qualità, è anche opportuno procedere ad un controllo della distribuzione delle luminanze presenti nel campo visivo. Di particolare importanza risulta il controllo delle luminanze del soffitto e delle pareti e la distribuzione delle luminanze nell'area del compito visivo. La luminanza preferita per le pareti è indicativamente compresa tra 50 e 200 [cd/m<sup>2</sup>], mentre quella del soffitto è opportuno sia compresa tra 200 e 500 [cd/m<sup>2</sup>]. Ovviamente, questi ultimi valori non possono essere ottenuti se il sistema d'illuminazione prevede apparecchi incassati nel soffitto. Per quanto riguarda, infine, il controllo della luminanza nella zona circostante il compito visivo, essa dovrebbe essere inferiore a quella del compito visivo, ma non inferiore a un terzo di essa.

Un'altra importante caratteristica da tener presente ai fini del comfort visivo è costituita dal **rilievo**: un'illuminazione uniforme diffusa, a causa della mancanza d'ombre, appiattisce gli oggetti e riduce la tridimensionalità della visione. Per compiti visivi in cui sia necessaria la visione di piccoli dettagli in rilievo è quindi opportuno l'uso di luce con spiccate caratteristiche direzionali. Per compiti, invece, in cui il rilievo non è importante (per esempio lettura), è preferibile una giusta ripartizione tra luce diretta e luce diffusa.

## 8.2 Cenni sull'illuminazione di esterni

Nell'affrontare il tema dell'illuminazione di esterni si può ricordare che in questi casi la visione risulta più scotopica che fotopica (si fa uso più dei bastoncelli che dei coni) per cui si ha conseguentemente una ridotta percezione dei colori con accentuazione dei colori freddi blu-verdi rispetto ai colori più caldi (rossi-gialli). L'occhio del visitatore è, inoltre, adattato a luminanze basse per cui risulta più sensibile ai fenomeni di abbagliamento. In generale, l'illuminazione di esterni (edifici monumentali, spazi verdi, vie di transito etc.) richiede sulle superfici da illuminare illuminamenti atti a consentire una corretta visione **in relazione** alla **situazione ambientale circostante**. I livelli di illuminamento da realizzare non sono, quindi, **assoluti** ma dovranno far sì che la luminanza assunta dalle superfici illuminate risulti adeguata allo sfondo circostante. Poiché in questi casi la luce proviene direttamente dalle sorgenti luminose impiegate senza significativi contributi di luce riflessa il calcolo risulta, in linea di principio, facilmente risolvibile sulla base di semplici relazioni analitiche. Sono, ovviamente, da considerare aspetti legati alla fruizione normale o occasionale degli spazi, individuazione degli elementi a valenza estetica cui dare opportuno risalto visivo anche perché nell'illuminazione di spazi esterni estesi non si procede quasi mai ad un'illuminazione generalizzata "a giorno" ma ad un'illuminazione prevalentemente localizzata su scorci suggestivi.

### 8.2.1 Scelta e valutazione illuminamento necessario

Come già accennato una buona percezione di un soggetto richiede un bilanciamento tra la sua luminanza  $L_2$  con la luminanza  $L_1$  dello sfondo circostante. Ad esempio, per ottenere valori ottimali del fattore di contrasto  $C$  (valori cioè compresi tra 2-2.5) sarà necessario raggiungere una luminanza  $L_2$  del soggetto tanto più alta quanto più elevata sia luminanza media dello sfondo  $L_1$  in accordo con la definizione di  $C$ :

$$C = \frac{|L_2 - L_1|}{L_1}$$

Una volta determinata la luminanza  $L_2$  del soggetto il livello di illuminamento necessario  $E_2$  (lux) sul soggetto dipenderà dal fattore medio di riflessione della luce  $\rho_2$  della sua superficie. In particolare risulterà, (nell'ipotesi di riflessione lambertiana!):

$$E_2 = \frac{\pi \cdot L_2}{\rho_2}$$

Pertanto, tanto più alta la luminanza  $L_2$  del soggetto tanto più elevato dovrà risultare l'illuminamento  $E_2$  sul soggetto. Nella seguente tabella si riportano valori indicativi della luminanza media di sfondo :

| <b>SITUAZIONE TIPICA</b>                  | <b>Luminanza media sfondo</b><br>[cd/m <sup>2</sup> ] |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| <b>Zone buie</b>                          | <b>1</b>                                              |
| <b>Zone rurali poco illuminate</b>        | <b>2</b>                                              |
| <b>Zone urbane scarsamente illuminate</b> | <b>4</b>                                              |
| <b>Zone urbane mediamente illuminate</b>  | <b>6</b>                                              |
| <b>Zone urbane ben illuminate</b>         | <b>12</b>                                             |

Nella seguente tabella si riportano valori orientativi del fattore di riflessione medio di alcuni materiali da costruzione.

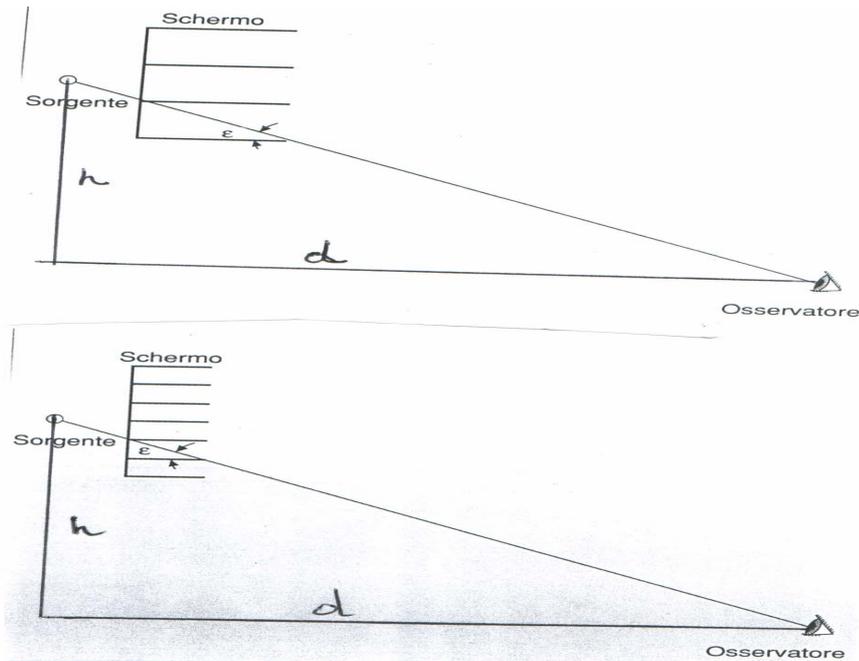
| <b>MATERIALE</b>                    | <b>Fattore medio riflessione <math>\rho</math></b> |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------|
| <b>Mattoni rossi nuovi (puliti)</b> | <b>0.25</b>                                        |
| <b>Mattoni rossi sporchi</b>        | <b>0.05-0.10</b>                                   |
| <b>Marmo chiaro</b>                 | <b>0.60-0.65</b>                                   |
| <b>Granito chiaro</b>               | <b>0.10-0.15</b>                                   |
| <b>Intonaco chiaro</b>              | <b>0.40-0.50</b>                                   |
| <b>Intonaco scuro</b>               | <b>0.25</b>                                        |
| <b>Intonaco sporco</b>              | <b>0.10</b>                                        |
| <b>Calcestruzzo/ pietra chiara</b>  | <b>0.40-0.50</b>                                   |
| <b>Calcestruzzo/ pietra scura</b>   | <b>0.05-0.10</b>                                   |

### **8.2.2 Controllo dell'abbagliamento**

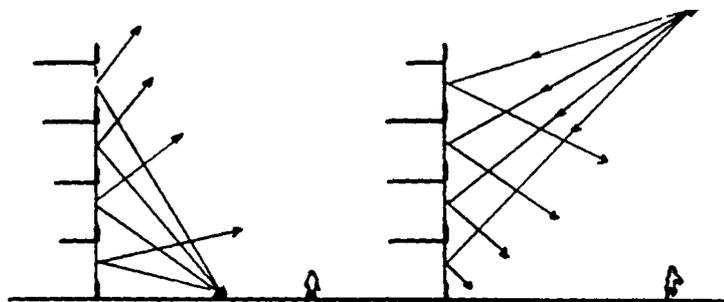
Le sorgenti luminose devono essere schermate al fine di limitare l'intensità luminosa  $I$  emessa nella direzione dell'osservatore. A questo scopo, si utilizzano griglie a lamelle orizzontali o verticali (se richiesto) opportunamente dimensionate. Nel caso di punti di osservazione che impongano la necessità di una doppia schermatura (verticale + orizzontale) si utilizza una griglia rettangolare con lamelle verticali e orizzontali. A titolo di esempio consideri la semplice situazione rappresentata nelle seguenti figure ove

l'angolo  $\varepsilon$  di schermatura orizzontale necessario può essere realizzato con due sistemi di lamelle orizzontali diverse. Come si può osservare nelle figure, è necessario che il rapporto tra la distanza tra le lamelle e la loro lunghezza sia pari a  $\tan \varepsilon$ . Risulta :

$$\varepsilon = \arctan \frac{h}{d}$$



L'impiego di schermi modifica le curve fotometriche e inoltre riduce il rendimento luminoso degli apparecchi per cui è opportuno prevederne l'uso solo in caso di effettiva necessità. In presenza di superfici lucide riflettenti verticali o di superfici d'acqua riflettenti è opportuno disporre gli apparecchi illuminanti in posizione tale da evitare abbagliamenti riflessi dovuti a fastidiose riflessioni (vedi figura).



### **8.2.3 Cenni su aspetti cromatici**

Il progettista può contare attualmente sulla disponibilità di molte tipologie di sorgenti le quali anche in combinazione con opportuni filtri colorati consentono di giocare con suggestivi effetti cromatici, ad esempio, dosando opportunamente i singoli contributi. Nel caso desideri realizzare miscele di luci con diverse caratteristiche cromatiche è opportuno che la distanza tra le sorgenti e il soggetto non sia troppo ridotta al fine di realizzare una miscelazione sufficientemente omogenea dei flussi luminosi di diverso colore. E anche necessario celare completamente gli apparecchi luminosi rispetto alle direzioni usuali di osservazione.

### **8.2.4 Metodologia di calcolo e cenni sulle applicazioni più comuni**

Come già osservato, nota l'intensità luminosa  $I$  [cd] emessa dalla sorgente nella direzione individuata dalla congiungente la sorgente col punto  $P$  sulla superficie, si può valutare l'illuminamento in  $P$  con la relazione :

$$E = \frac{I}{R^2} \cdot \cos \vartheta = \frac{I}{h} \cos^3 \vartheta$$

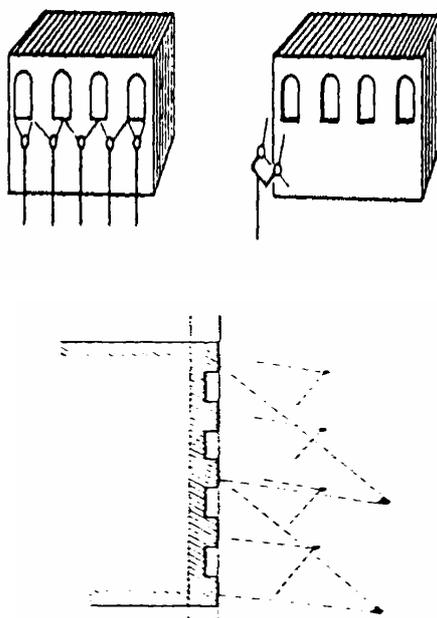
Pertanto, ripetendo i calcoli su una griglia di punti significativi della superficie da illuminare, si può giungere ad una descrizione anche assai puntuale e dettagliata della distribuzione dell'illuminamento su di essa. Informazioni relative all'intensità luminosa emessa per ogni apparecchio sono date dal produttore sotto forma di curve fotometriche o tabelle numeriche. Questo metodo di calcolo consente di verificare oltre ai valori medi di illuminamento anche se sulla superficie si sia realizzata anche una sufficiente uniformità di illuminamento, ad esempio  $E_{\min}/E_{\max} >$  valore imposto.

#### **➤ Facciate di edifici**

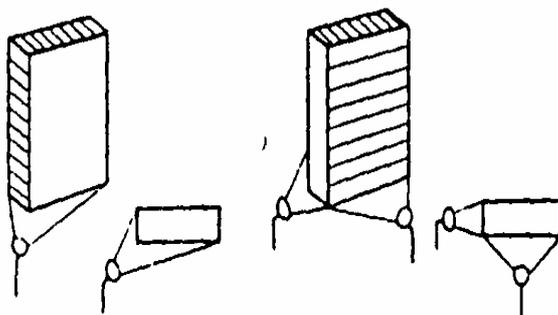
In questi casi è sempre possibile suddividerle in aree singole su cui realizzare gli illuminamenti di progetto desiderati nel rispetto degli equilibri di luminanza, prima ricordati. Le facciate possono essere illuminate mediante proiettori installati a distanza opportuna (ad esempio, su costruzioni adiacenti etc.) oppure con apparecchi collocati sulla stesso edificio magari sfruttando opportunamente la presenza di cornicioni, aggetti etc.). Da evitare la formazione di macchie di luce a seguito dell'installazione di proiettori posti troppo vicino alla parete ad esempio su staffe a sbalzo. Buoni risultati si

ottengono con apparecchi montati direttamente sulle pareti e dotati di sistemi ottici per distribuire luce radente su di queste.

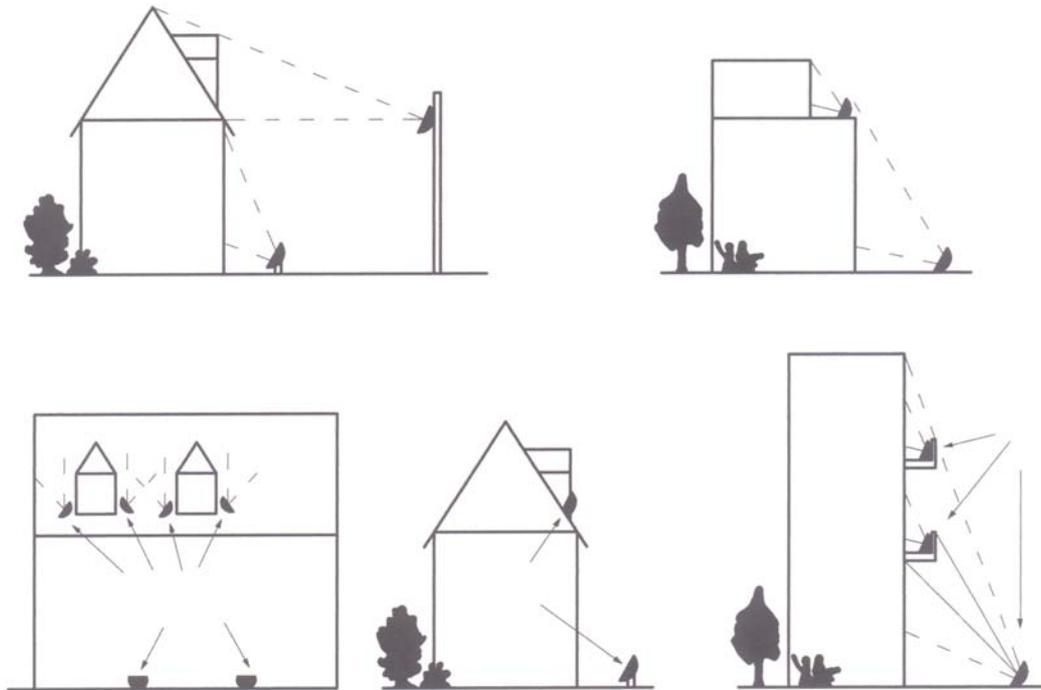
Le facciate possono anche essere illuminate dal basso installando gli apparecchi su paline (0.3-3 [m] di altezza) posizionate a pochi metri dalle facciate stesse. Si può osservare che una superficie illuminata appare appiattita e senza rilievi se la luminanza ottenuta è troppo uniforme per cui per evidenziare particolari architettonici si può far ricorso a voluti contrasti di luminanza (zone d'ombra realizzate con sorgenti luminose non simmetriche, sorgenti poste a diversa distanza etc.), come indicativamente rappresentato nelle figure seguenti.



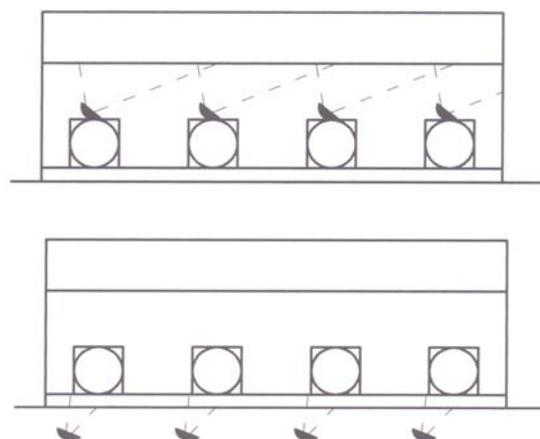
La forma di un edificio viene ad essere esaltata, realizzando luminanze diverse tra le facce con uno spigolo comune.



Nelle figure seguenti si schematizzano alcune tipiche disposizioni degli apparecchi luminosi per ottenere, non solo l'evidenziazione notturna delle facciate di edifici anche una buona evidenziazione delle loro coperture al fine di rendere compiuta la percezione della volumetria di un edificio.

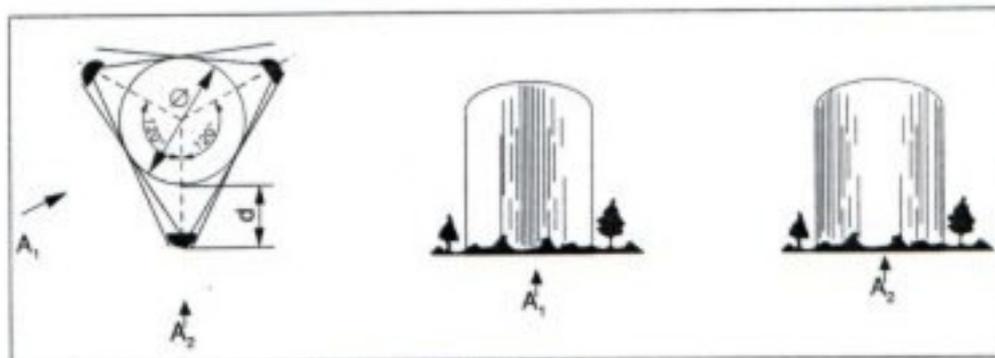
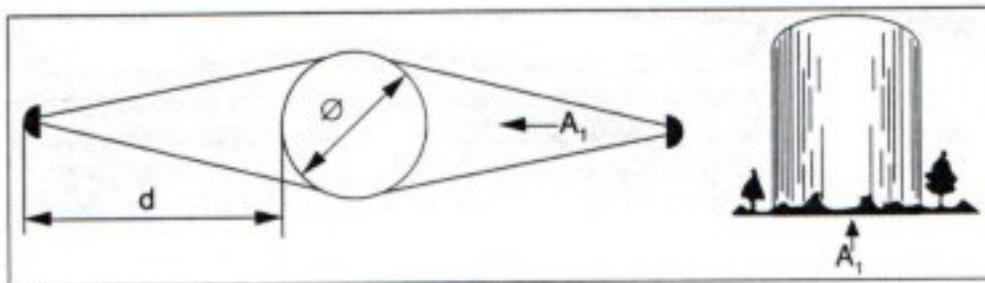


Le figure seguenti illustrano due modi diversi di evidenziare un particolare architettonico (un colonnato). Nel primo modo le colonne risaltano “in negativo” su uno sfondo illuminato mentre nel secondo caso sono illuminate per risaltare “in positivo” su uno sfondo scuro.



Nel caso di torri cilindriche per rendere percettibile la forma circolare è necessario che la luminanza delle superfici vari in modo continuo senza brusche variazioni. La luminanza deve inoltre risultare pressoché costante lungo ogni generatrice verticale.

Si può osservare che una torre, appare più slanciata se la parte centrale presenta maggiore luminanza rispetto alle parti laterali; effetto opposto si ottiene invertendo le luminanze. Nelle figure seguenti si riportano due diverse modalità di illuminazione con proiettori di torri cilindriche. Nel primo caso il rapporto tra la distanza dei proiettori e dimensioni della torre è grande (lungo la direzione di osservazione  $A_1$  si percepisce il lato più illuminato), mentre nel secondo tale rapporto risulta sensibilmente minore (lungo la direzione di osservazione  $A_1$  si percepisce il lato meno illuminato; lungo la direzione di osservazione  $A_2$  si percepisce il lato più illuminato).



### 8.3 Cenni sull'illuminazione di interni

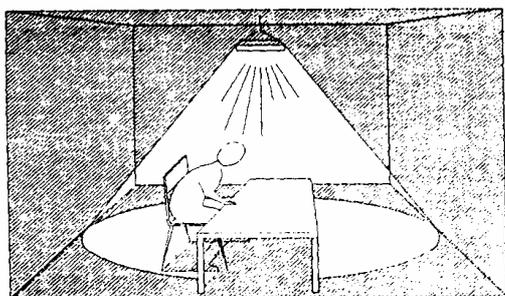
In linea di massima le principali esigenze da soddisfare per realizzare una corretta illuminazione artificiale di ambienti sono:

- assicurare sul piano di lavoro (superficie orizzontale posta a 0.8 [m] dal pavimento, oppure a 0.2 [m] dal pavimento per le zone di transito) un illuminamento adeguato alle attività previste e sufficientemente uniforme, contenendo contemporaneamente i consumi di energia elettrica;
- assicurare condizioni di comfort visivo, evitando nel campo visivo eccessive differenze di luminanza (affaticamento della visione e/o abbagliamento);
- adeguata tonalità cromatica delle sorgenti luminose per non alterare la percezione dei colori.

I livelli d'illuminamento di progetto sono facilmente reperibili in letteratura. In generale, tanto più è delicata la prestazione visiva richiesta, tanto più elevato dovrà essere il livello di illuminamento. In assenza di precise indicazioni si possono adottare i livelli d'illuminamento previsti dalla CIE.

| VALORI DI ILLUMINAMENTO CONSIGLIATI [LX] | TIPO DI DESTINAZIONE (ATTIVITÀ)                                                                           |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 20 - 30 - 50                             | aree esterne industriali                                                                                  |
| 50 - 100 - 150                           | zone di passaggio e di sosta temporanea                                                                   |
| 100 - 150 - 200                          | ambienti di lavoro occupati saltuariamente                                                                |
| 200 - 300 - 500                          | prestazione visiva semplice<br>(es. lavorazioni grossolane a macchina)                                    |
| 300 - 500 - 750                          | prestazione visiva media<br>(es. lavorazioni su macchine utensili)                                        |
| 500 - 750 - 1000                         | prestazione visiva elevata<br>(es. disegno cucitura)                                                      |
| 750 - 1000 - 1500                        | prestazione visiva elevata per compiti difficili<br>(es. esame dei colori, meccanica fine)                |
| 1000 - 1500 - 2000                       | prestazione visiva elevata per compiti difficili<br>(es. incisioni a mano)                                |
| 2000                                     | prestazione visiva elevata con compiti di particolare qualità<br>(es. interventi chirurgici o dentistici) |

È opportuno precisare subito che col termine **illuminazione generale** s'intende il caso in cui gli apparecchi luminosi sono distribuiti in modo regolare nell'ambiente, per uniformare l'illuminamento sul piano di lavoro, mentre con il termine **illuminazione localizzata** si considera il caso in cui gli apparecchi illuminanti sono sistemati in corrispondenza di singoli postazioni.



In genere un'illuminazione esclusivamente localizzata non è soddisfacente (troppe disuniformità e contrasti di luminanza; si veda ad esempio la figura seguente), per cui la soluzione frequentemente adottata è di tipo misto, e cioè un'illuminazione

generale di tutto l'ambiente più un'illuminazione supplementare localizzata, ove necessario. Gli illuminamenti non devono però, ovviamente, differire tra loro in modo eccessivo.

Per contenere i consumi di energia elettrica è opportuno far sì che le superfici delimitanti l'ambiente siano chiare (elevati fattori di riflessione). Ad esempio, in un ambiente con pareti e soffitto di colore bianco e arredi con tinte chiare, si ottiene un'utilizzazione del flusso luminoso migliore di quanto si verifichi nello stesso ambiente con colori più scuri. Sempre a questo fine è anche opportuno che venga assicurata nel tempo un'adeguata pulizia delle superfici degli apparecchi illuminanti il cui flusso luminoso tenderebbe altrimenti a ridursi progressivamente (polvere, ecc.).

Oltre a ciò, il progettista deve prestare particolare cura per evitare la presenza nel campo visivo di superfici di eccessiva luminanza (abbagliamento).

Per quanto riguarda gli aspetti cromatici, oltre ad evitare sorgenti luminose che alterino la percezione dei colori è anche opportuno ricordare che una non corretta scelta delle sorgenti luminose può comportare effetti psicologici. Ad esempio un'illuminazione diurna di un ambiente, ottenuta con sorgenti di colore giallo, può indurre reazioni di claustrofobia, mentre un'illuminazione con luce bianca molto fredda (sfumatura di blu) può dare di notte sensazioni inquietanti.

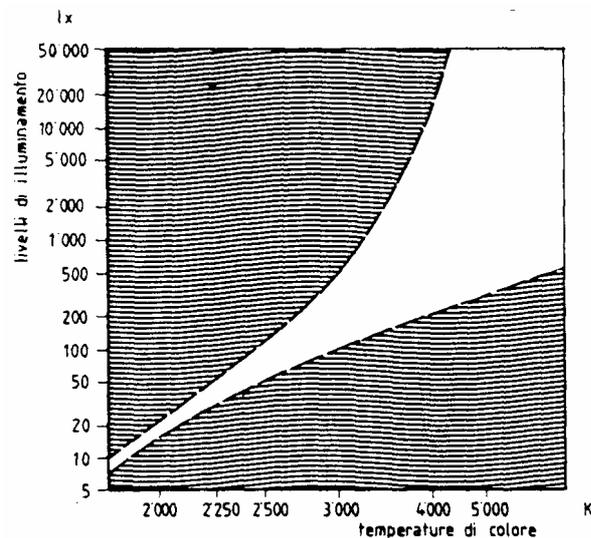
Nella tabella seguente le sorgenti sono classificate (CIE) in tre gruppi di tonalità cromatica in relazione alla temperatura di colore della sorgente.

| GRUPPI D TONALITÀ | TONALITÀ   | TEMPERATURE DI COLORE [K] |
|-------------------|------------|---------------------------|
| 1                 | calda      | < 3300                    |
| 2                 | intermedia | 3300 ÷ 5300               |
| 3                 | fredda     | > 5300                    |

Nel gruppo 1 rientrano le tonalità indicate per ambienti di tipo residenziale, nel secondo quelle adatte per ambienti di lavoro, nel terzo quelle per ambienti ove si richiedano impegni visivi molto

elevati.

Esiste, inoltre, una correlazione tra le temperature di colore e i livelli d'illuminamento: accoppiamenti tra le due grandezze entro l'area chiara in figura (**diagramma di Kruithof**) raccolgono consensi e giudizi di soddisfazione dai fruitori.



Come si può osservare su questo diagramma, a livelli modesti di illuminamento è preferibile utilizzare luci "calde", e cioè a temperatura di colore relativamente bassa, mentre per livelli di illuminamento molto elevati, sono da preferirsi luci a più elevata temperatura di colore, e cioè più "fredde".

Per quanto riguarda più specificamente la resa cromatica delle sorgenti, e cioè il modo con cui una sorgente luminosa consente di riprodurre i colori degli oggetti illuminati, si può ricordare che questa problematica risulta di rilevante importanza in alcune applicazioni, ad esempio nel caso dell'illuminazione di musei, pinacoteche, etc. Nella seguente tabella è riportata la classificazione CIE per la scelta dell'indice di resa cromatica in relazione alla destinazione d'uso.

| Gruppo | Indice R <sub>a</sub> | Colore apparente                          | Destinazione d'uso                                    |
|--------|-----------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 1A     | > 90                  | caldo<br>intermedio - freddo              | Gallerie, quadri<br>Analisi mediche                   |
| 1B     | 90 – 80               | caldo - intermedio<br>intermedio - freddo | Casa, uffici, scuole<br>Stampa, industrie tessili     |
| 2      | 80 – 60               | caldo - intermedio - freddo               | Industria                                             |
| 3      | 60 – 40               | caldo - intermedio - freddo               | Lavorazioni grossolane                                |
| 4      | 40 – 20               | caldo - intermedio - freddo               | Lavorazioni con bassi requisiti<br>di resa del colore |

### 8.3.1 Metodologie di calcolo

In generale, si usa distinguere tra illuminazione diretta, semidiretta, mista, semi-indiretta, indiretta. L'**illuminazione diretta** è caratterizzata da una disposizione degli apparecchi illuminanti tale da dirigere almeno il **90%** del flusso luminoso direttamente sul piano di lavoro: essa, se da un lato è economica e di realizzazione semplice, d'altra parte provoca sul piano di lavoro spesso disuniformità dell'illuminamento. Quando la percentuale di flusso luminoso, indirizzata direttamente sul piano di lavoro, è compresa tra il **60** e il **90%** si parla di **illuminazione semidiretta**; il restante flusso luminoso è quindi indirizzato verso le pareti delimitanti l'ambiente, contribuendo così a ridurre il contrasto di illuminamento tra il piano di lavoro e le altre superfici dell'ambiente.

Nell'**illuminazione mista o diffusa**, il **50%** del flusso luminoso è diretto sulle superfici riflettenti, creando così una buona uniformità di illuminamento. Quando la percentuale di flusso luminoso indirizzata direttamente sulle superfici riflettenti dell'ambiente è compresa tra il **60** e il **90%** si parla di **illuminazione semi-indiretta**.

Nel caso, poi, dell'**illuminazione indiretta**, almeno il **90%** del flusso luminoso è diretto sulle superfici riflettenti, garantendo, così, un'ottima uniformità d'illuminamento.

È opportuno osservare che, tanto maggiore è la porzione del flusso luminoso indirizzata sulle superfici riflettenti (pareti soffitti), tanto più sarà necessario queste siano chiare per contenere i consumi energetici.

Poiché l'illuminamento che si stabilisce sul piano di lavoro è dato dalla somma del flusso diretto più il flusso riflesso dalle pareti, ed il contributo dei due termini dipende dal sistema d'illuminazione, non è in generale agevole utilizzare procedimenti di carattere generale. Ad esempio, un possibile ma complesso modo di procedere

potrebbe essere il seguente: in una fase iniziale si può determinare con i metodi descritti in precedenza l'illuminamento direttamente provocato dalla sorgente primaria in un numero sufficientemente rappresentativo di punti appartenenti alle diverse pareti dell'ambiente e del piano di lavoro. Ottenuta, così, una prima approssimata descrizione degli illuminamenti medi  $E_i$  che si verificano sulle varie porzioni -iesime di superfici si può assegnare ad ogni porzione la corrispondente luminanza  $L_i = \rho_i E_i / \pi$ , e considerare ciascuna di esse come una sorgente luminosa estesa che fornisce un ulteriore contributo sulle varie superfici del locale.

A questo punto si possono correggere i vari illuminamenti medi precedentemente valutati, ottenendo un secondo e più approssimato andamento dell'illuminamento sulle varie pareti. Ripetendo questo macchinoso procedimento di calcolo per un numero sufficiente di volte, si arriva a determinare con l'approssimazione desiderata l'illuminamento delle varie pareti e del piano di lavoro. Ovviamente, nella pratica raramente sono richieste valutazioni così accurate dei livelli d'illuminamento; oltre a ciò, queste sarebbero illusorie: ad esempio, i fattori di riflessione delle superfici sono noti, in genere solo approssimativamente.

Una valutazione di prima approssimazione dell'**illuminamento medio**  $E_m$  sulla superficie delimitante un ambiente chiuso, spesso sufficiente a risolvere semplici casi (ad esempio, ambienti privati), può ottenersi in base al principio di conservazione dell'energia (luminosa). Si supponga che all'interno di un ambiente sia immesso complessivamente, da parte delle sorgenti luminose presenti, un flusso luminoso  $\phi_1$  e che questo sia perfettamente diffuso in ogni punto dell'ambiente. Si supponga un fattore medio di riflessione  $\rho_m$  pari a:

$$\rho_m = \frac{\rho_1 A_1 + \rho_2 A_2 + \rho_3 A_3 + \dots + \rho_n A_n}{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n}$$

dove:

$\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$  e  $A_1, A_2, \dots, A_n$  rappresentano rispettivamente i fattori di riflessione e le aree delle varie superfici delimitanti l'ambiente. Il flusso luminoso riflesso la **prima volta verso l'ambiente** sarà  $\rho_m \phi_1$ . A sua volta il flusso  $\rho_m \phi_1$  subisce un **secondo processo di riflessione**, per cui verrà nuovamente riflessa verso l'ambiente la porzione  $\rho_m^2 \phi_1$ . Il flusso luminoso complessivamente presente nell'ambiente (flusso circolante) sarà espresso dalla somma :

$$\varphi_1 + \rho_m \varphi_1 + \rho_m^2 \varphi_1 + \dots \rho_m^j \varphi_1$$

Come noto, la serie (geometrica) per  $\rho_m < 1$  converge al valore limite :

$$\varphi_1 / (1 - \rho_m)$$

Ovviamente la condizione di regime (corrispondente al limite della serie per  $j \rightarrow \infty$ ), si raggiunge, diversamente da quanto si verifica in acustica, pressoché istantaneamente in conseguenza dell'elevatissima velocità della luce. A regime allora vale la seguente eguaglianza:

$$\varphi_1 / (1 - \rho_m) = E_m \sum A_n$$

In realtà, non tutte le ipotesi sono interamente verificate, per cui il valore di  $E_m$  così valutato, ad esempio sul piano di lavoro, risulta solo di carattere indicativo. Oltre a ciò è opportuno osservare che il flusso  $\varphi_1$  non coincide con il flusso emesso dalle sorgenti luminose a causa dei seguenti fatti:

- a) le armature per indirizzare il flusso inevitabilmente danno luogo ad un certo assorbimento;
- b) il flusso emesso dalle sorgenti luminose diminuisce progressivamente nel tempo in conseguenza a vari processi di degrado della sorgente luminosa;
- c) il flusso luminoso emesso dall'apparecchio luminoso (sorgente + armatura) diminuisce nel tempo per deposito di polvere.

In genere, informazioni di questo genere sono fornite dai costruttori sotto forma di alcuni corrispondenti fattori di maggiorazione  $< 1$  e cioè  $\eta_a, \eta_b, \eta_c$ . Ad esempio, una volta determinato il flusso  $\varphi_1$  necessario nell'ambiente, il **flusso nominale** che effettivamente dovrà essere installato (sorgenti nuove di fabbrica)  $\varphi_{in}$  sarà dato da:

$$\varphi_{in} = \varphi_1 / (\eta_a \eta_b \eta_c) = \varphi_1 / k$$

ove il fattore correttivo complessivo è:

$$k = \eta_a \cdot \eta_b \cdot \eta_c < 1$$

Questo fattore consente un'opportuna maggiorazione del flusso luminoso da installare per tener conto di questi effetti.

Nella pratica vengono utilizzati metodi approssimati più o meno sofisticati detti metodi del "**fattore di utilizzazione**", che consentono di superare la notevole difficoltà connessa al calcolo dei contributi legati al flusso luminoso riflesso dalle pareti. Questi

metodi, in generale, forniscono soddisfacenti risultati purché applicati a determinati sistemi di illuminazione e geometrie degli ambienti. In genere per determinare il flusso luminoso necessario a realizzare l'illuminamento di progetto sul piano di lavoro, è necessario valutare quale frazione del flusso emesso dalle sorgenti giunga effettivamente sul piano stesso, sia direttamente che indirettamente per riflessione da parte delle pareti e del soffitto. A questo scopo si definisce **fattore di utilizzazione u** il rapporto tra il flusso luminoso  $\Phi_{lu}$  che giunge sul piano di lavoro e quello  $\Phi_{IT}$  totale emesso dalle sorgenti luminose:

$$u = \frac{\Phi_{lu}}{\Phi_{IT}}$$

Indicando con  $E_m$  l'illuminamento medio che il progettista desidera sul piano di lavoro (in genere considerato a 0.80 [m] dal pavimento) e con  $S$  la superficie di questo piano, risulta evidentemente:

$$\Phi_{lu} = E_m \cdot S$$

Si può allora scrivere:

$$\Phi_{IT} = E_m \cdot S / u$$

Il flusso nominale da installare  $\Phi_{ITn}$  (sorgenti nuove) potrà essere espresso :

$$\Phi_{ITn} = \frac{\Phi_{IT}}{k}$$

ove  $k = \eta_a \eta_b \eta_c$  rappresenta il fattore correttivo di manutenzione ( $k < 1$ ).

Ovviamente il flusso nominale  $\Phi_{ITn}$  (sorgenti nuove) necessario all'ambiente può essere ripartito su un numero  $n$  di sorgenti, ciascuna emettente un flusso unitario nominale  $\Phi_{lni}$  per cui si può scrivere:

$$\Phi_{ITn} = n\Phi_{lni} = E_m \cdot S / (u \cdot k)$$

Il valore di  $u$  dipende ovviamente dal tipo di apparecchi illuminanti impiegati, dalle dimensioni dell'ambiente, dai fattori di riflessione delle pareti e del soffitto e dalla posizione degli apparecchi rispetto al piano di utilizzo. Secondo il metodo qui presentato, il complesso effetto della geometria dell'ambiente e del tipo di illuminazione (diretta, semidiretta, etc.) sul fattore di utilizzazione  $u$  viene riassunto in un parametro  $i$  detto indice del locale. Il valore dell'indice del locale si valuta mediante le seguenti due relazioni:

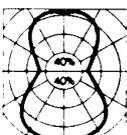
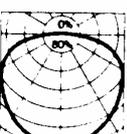
$$i = a b / h (a + b) \quad \text{per illuminazione diretta, semidiretta o mista}$$

$$i = 3 a b / h (a + b) \quad \text{per illuminazione indiretta o semi-indiretta}$$

In queste due relazioni **a** e **b** rappresentano le dimensioni del locale, mentre **h** è nel primo caso (illuminazione diretta, etc.) l'altezza di montaggio delle lampade sul piano di lavoro e nel secondo (illuminazione indiretta) la distanza tra il soffitto ed il piano di lavoro. Nella seguente tabella sono riportati, a titolo di esempio, valori del fattore **u**, determinati sperimentalmente in corrispondenza all'indice del locale **i**, per alcuni valori dei fattori di riflessione delle pareti e dei soffitti. I valori del fattore **u** si possono leggere nella tabella in corrispondenza alle lettere da A a J corrispondenti ai vari intervalli di valori numerici dell'indice **i** del locale.

I dati riportati si riferiscono ad alcuni usuali valori della distanza mutua **d = f(h)** tra le sorgenti luminose (maglia quadrata) sul soffitto che devono comunque distare dalle pareti almeno **d/2**. In tabella sono pure riportati valori indicativi del fattore di **k** in corrispondenza a tre situazioni diverse e cioè manutenzione buona "**b**", media "**m**" e pessima "**p**".

Dopo aver assicurato il prescritto illuminamento medio sul piano di lavoro di un ambiente è poi opportuno verificare che la distanza **d** che separa tra loro le sorgenti luminose poste, ad esempio, sul soffitto non sia troppo elevata da comportare sensibili disuniformità di illuminamento sul piano di lavoro.

| Curva fotometrica                                                                                                             | Indice del locale | Coefficiente di utilizzazione |      |      |      |      |      |      |      |                                                                                                                              | Fattore di manutenzione |      |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|------|------|
|                                                                                                                               |                   | b                             | m    | n    |      |      |      |      |      |                                                                                                                              |                         |      |      |
| Illuminazione semidiretta<br>$d = 1,1 h$<br> | J                 | 0,28                          | 0,22 | 0,18 | 0,26 | 0,21 | 0,18 | 0,20 | 0,17 | Plafoniera nuda o con coppa diffusore<br> | 0,80                    | 0,70 | 0,60 |
|                                                                                                                               | I                 | 0,35                          | 0,29 | 0,25 | 0,33 | 0,27 | 0,24 | 0,26 | 0,24 |                                                                                                                              |                         |      |      |
|                                                                                                                               | H                 | 0,39                          | 0,33 | 0,30 | 0,37 | 0,32 | 0,28 | 0,30 | 0,27 |                                                                                                                              |                         |      |      |
|                                                                                                                               | G                 | 0,45                          | 0,38 | 0,33 | 0,40 | 0,36 | 0,32 | 0,33 | 0,30 |                                                                                                                              |                         |      |      |
|                                                                                                                               | F                 | 0,49                          | 0,42 | 0,37 | 0,43 | 0,39 | 0,34 | 0,37 | 0,33 |                                                                                                                              |                         |      |      |
|                                                                                                                               | E                 | 0,56                          | 0,50 | 0,44 | 0,49 | 0,44 | 0,40 | 0,42 | 0,38 |                                                                                                                              |                         |      |      |
|                                                                                                                               | D                 | 0,60                          | 0,55 | 0,50 | 0,53 | 0,48 | 0,44 | 0,47 | 0,44 |                                                                                                                              |                         |      |      |
|                                                                                                                               | C                 | 0,64                          | 0,59 | 0,54 | 0,56 | 0,51 | 0,47 | 0,50 | 0,47 |                                                                                                                              |                         |      |      |
|                                                                                                                               | B                 | 0,68                          | 0,62 | 0,59 | 0,61 | 0,56 | 0,53 | 0,54 | 0,52 |                                                                                                                              |                         |      |      |
|                                                                                                                               | A                 | 0,70                          | 0,65 | 0,62 | 0,65 | 0,62 | 0,60 | 0,58 | 0,57 |                                                                                                                              |                         |      |      |
| Illuminazione mista<br>$d = 1,1 h$<br>       | J                 | 0,26                          | 0,23 | 0,21 | 0,23 | 0,21 | 0,19 | 0,19 | 0,17 | Diffusore<br>                             | 0,75                    | 0,70 | 0,65 |
|                                                                                                                               | I                 | 0,32                          | 0,29 | 0,27 | 0,28 | 0,26 | 0,24 | 0,23 | 0,21 |                                                                                                                              |                         |      |      |
|                                                                                                                               | H                 | 0,37                          | 0,33 | 0,31 | 0,31 | 0,29 | 0,27 | 0,26 | 0,24 |                                                                                                                              |                         |      |      |
|                                                                                                                               | G                 | 0,40                          | 0,36 | 0,34 | 0,34 | 0,31 | 0,30 | 0,28 | 0,26 |                                                                                                                              |                         |      |      |
|                                                                                                                               | F                 | 0,42                          | 0,39 | 0,36 | 0,36 | 0,33 | 0,32 | 0,30 | 0,28 |                                                                                                                              |                         |      |      |
|                                                                                                                               | E                 | 0,46                          | 0,43 | 0,40 | 0,41 | 0,38 | 0,35 | 0,32 | 0,30 |                                                                                                                              |                         |      |      |
|                                                                                                                               | D                 | 0,50                          | 0,46 | 0,43 | 0,44 | 0,40 | 0,39 | 0,34 | 0,33 |                                                                                                                              |                         |      |      |
|                                                                                                                               | C                 | 0,52                          | 0,48 | 0,45 | 0,46 | 0,44 | 0,41 | 0,37 | 0,36 |                                                                                                                              |                         |      |      |
|                                                                                                                               | B                 | 0,55                          | 0,52 | 0,49 | 0,48 | 0,46 | 0,45 | 0,39 | 0,38 |                                                                                                                              |                         |      |      |
|                                                                                                                               | A                 | 0,57                          | 0,54 | 0,51 | 0,49 | 0,47 | 0,46 | 0,42 | 0,41 |                                                                                                                              |                         |      |      |
| Illuminazione diretta<br>$d = h$<br>        | J                 | 0,38                          | 0,32 | 0,28 | 0,37 | 0,32 | 0,28 | 0,31 | 0,28 | Riflettore a fascio largo<br>             | 0,75                    | 0,65 | 0,55 |
|                                                                                                                               | I                 | 0,46                          | 0,42 | 0,38 | 0,46 | 0,41 | 0,38 | 0,41 | 0,38 |                                                                                                                              |                         |      |      |
|                                                                                                                               | H                 | 0,50                          | 0,46 | 0,43 | 0,50 | 0,46 | 0,43 | 0,46 | 0,43 |                                                                                                                              |                         |      |      |
|                                                                                                                               | G                 | 0,54                          | 0,50 | 0,48 | 0,53 | 0,50 | 0,47 | 0,49 | 0,47 |                                                                                                                              |                         |      |      |
|                                                                                                                               | F                 | 0,58                          | 0,54 | 0,51 | 0,56 | 0,53 | 0,50 | 0,52 | 0,50 |                                                                                                                              |                         |      |      |
|                                                                                                                               | E                 | 0,62                          | 0,59 | 0,56 | 0,60 | 0,58 | 0,56 | 0,58 | 0,56 |                                                                                                                              |                         |      |      |
|                                                                                                                               | D                 | 0,67                          | 0,64 | 0,61 | 0,65 | 0,63 | 0,61 | 0,62 | 0,61 |                                                                                                                              |                         |      |      |
|                                                                                                                               | C                 | 0,69                          | 0,66 | 0,63 | 0,67 | 0,65 | 0,63 | 0,64 | 0,62 |                                                                                                                              |                         |      |      |
|                                                                                                                               | B                 | 0,72                          | 0,70 | 0,67 | 0,70 | 0,68 | 0,66 | 0,67 | 0,66 |                                                                                                                              |                         |      |      |
|                                                                                                                               | A                 | 0,74                          | 0,71 | 0,69 | 0,72 | 0,70 | 0,68 | 0,69 | 0,67 |                                                                                                                              |                         |      |      |
| Illuminazione diretta<br>$d = 0,9 h$<br>   | J                 | 0,35                          | 0,32 | 0,30 | 0,35 | 0,32 | 0,30 | 0,32 | 0,30 | Riflettore a fascio medio<br>           | 0,75                    | 0,65 | 0,55 |
|                                                                                                                               | I                 | 0,43                          | 0,39 | 0,37 | 0,42 | 0,39 | 0,37 | 0,39 | 0,37 |                                                                                                                              |                         |      |      |
|                                                                                                                               | H                 | 0,48                          | 0,45 | 0,42 | 0,47 | 0,44 | 0,42 | 0,43 | 0,41 |                                                                                                                              |                         |      |      |
|                                                                                                                               | G                 | 0,53                          | 0,50 | 0,47 | 0,52 | 0,49 | 0,47 | 0,48 | 0,46 |                                                                                                                              |                         |      |      |
|                                                                                                                               | F                 | 0,57                          | 0,53 | 0,50 | 0,55 | 0,52 | 0,50 | 0,52 | 0,50 |                                                                                                                              |                         |      |      |
|                                                                                                                               | E                 | 0,61                          | 0,57 | 0,55 | 0,59 | 0,57 | 0,54 | 0,56 | 0,54 |                                                                                                                              |                         |      |      |
|                                                                                                                               | D                 | 0,64                          | 0,61 | 0,59 | 0,62 | 0,60 | 0,58 | 0,59 | 0,57 |                                                                                                                              |                         |      |      |
|                                                                                                                               | C                 | 0,66                          | 0,63 | 0,61 | 0,63 | 0,61 | 0,60 | 0,61 | 0,59 |                                                                                                                              |                         |      |      |
|                                                                                                                               | B                 | 0,68                          | 0,66 | 0,63 | 0,66 | 0,64 | 0,63 | 0,63 | 0,62 |                                                                                                                              |                         |      |      |
|                                                                                                                               | A                 | 0,69                          | 0,67 | 0,66 | 0,67 | 0,66 | 0,64 | 0,65 | 0,63 |                                                                                                                              |                         |      |      |
| Fattore di riflessione pareti                                                                                                 |                   | 50%                           | 30%  | 10%  | 50%  | 30%  | 10%  | 30%  | 10%  |                                                                                                                              |                         |      |      |
| Fattore di riflessione soffitto                                                                                               |                   | 75%                           |      |      | 50%  |      |      | 30%  |      |                                                                                                                              |                         |      |      |

(\*)  $b$  = pulizia frequente

$m$  = pulizia mediocre

$n$  = pulizia scarsa

A  $i = 4,50 \div 6,00$

D  $i = 2,25 \div 2,75$

G  $i = 1,12 \div 1,38$

B  $i = 3,50 \div 4,50$

E  $i = 1,75 \div 2,25$

H  $i = 0,90 \div 1,12$

C  $i = 2,75 \div 3,50$

F  $i = 1,38 \div 1,75$

I  $i = 0,70 \div 0,90$

J  $i = 0,50 \div 0,70$

In tal caso sarà opportuno suddividere il flusso luminoso necessario nell'ambiente su un numero maggiore di sorgenti meno potenti. Un criterio indicativo che si può adottare a questo scopo prevede di verificare per alcuni punti significativi del piano di lavoro che il rapporto  $E_{\min}/E_{\max}$  tra l'illuminamento minimo e quello massimo direttamente provocato dalle sorgenti risulti maggiore di 0.7 - 0.8.

### ESERCIZI ED ESEMPI

- 1) L'illuminamento notturno realizzato sulla facciata di un edificio da un proiettore luminoso è  $E = 100$  [lux]. Quale sarà la luminanza  $L$  assunta dalla facciata se la sua superficie fosse mattoni a vista ( $\rho_{ma} = 0.1$ ) oppure intonacata bianca ( $\rho_{in} = 0.8$ ).

Nel caso di comportamento lambertiano la luminanza della facciata illuminata sarà costante (indipendente dalla direzione di osservazione) ma dipenderà dal fattore di riflessione della superficie. Si avrà nei due casi:

$$L_{ma} = \rho_{ma} \cdot E / \pi = \frac{0.1 \cdot 100}{3.14} = 3.2 \text{ [cd/m}^2\text{]}$$
$$L_{in} = \rho_{in} \cdot E / \pi = \frac{0.8 \cdot 100}{3.14} = 25.2 \text{ [cd/m}^2\text{]} .$$

- 2) Una sorgente luminosa con  $P = 100$  [W] e con un'efficienza luminosa  $\eta = 15$  [lm/W] viene utilizzata in un locale cubico (lato  $L = 4$  [m]) con interni in colore chiaro ( $\rho_m = 0.7$ ). Quanto vale l'illuminamento medio  $E_m$  ?

L'illuminamento medio è esprimibile da:

$$E_m = \frac{\Phi_l}{(1 - \rho_m) \cdot S}$$

Il flusso luminoso emesso è:

$$\Phi_l = P \eta$$

La superficie interna  $A$  delimitante l'ambiente è:

$$A = 6 L^2$$

Per cui risulta:

$$E_m = \frac{\Phi_l}{(1 - \rho_m) \cdot A} = \frac{P \cdot \eta}{(1 - \rho_m) \cdot 6 \cdot L^2} = \frac{100 \cdot 15}{(1 - 0.7) \cdot 6 \cdot 16} = 52 \text{ [lux]}$$

3) Per illuminare una sala conferenze quadrata (lato 6 m; distanza lampade-piano lavoro  $h = 2$  [m]) si usano  $n = 9$  apparecchi con n° 2 tubi fluorescente posizionati al centro di una maglia quadrata con lato  $d = h$  (tubo nuovo  $\phi_{lm} = 3000$  [lm/tubo];  $\eta_l = 75$  [lm/W]). In relazione ai fattori di riflessione delle pareti e del soffitto si è valutato dalle tabelle un valore del fattore di utilizzazione  $u = 0.53$ . Quale illuminamento medio  $E_m$  si otterrà in esercizio sul piano di lavoro e quale la potenza elettrica  $P$  necessaria ? (N.B. assumere fattore di manutenzione  $k = 0.7$ ).

Ovviamente, risulta  $\phi_{lmi} = 2\phi_{lm}$  per cui l'illuminamento medio sul piano di lavoro (superficie  $S = 36$  [m<sup>2</sup>]) è esprimibile da:

$$E_m = \frac{u \cdot k \cdot n \cdot \phi_{lmi}}{S} = \frac{0.53 \cdot 0.7 \cdot 9 \cdot 2 \cdot 3000}{36} = 556 \text{ [lux]}$$

La potenza elettrica  $P$  sarà:

$$P = \frac{n \cdot \phi_{lmi}}{\eta} = \frac{9 \cdot 2 \cdot 3000}{75} = 720 \text{ [W]}$$