

ILLUMINOTECNICA

[LA VISIONE – LE LAMPADE – ILLUMINAZIONE ARTIFICIALE]



PROF. ING. GIULIANO CAMMARATA

2016

FILE: ILLUMINOTECNICA.DOC
AUTORE: GIULIANO CAMMARATA
DATA: 09/12/2016

www.giulianocammarata.it

Il presente volume può essere liberamente copiato e diffuso per uso didattico e personale a condizione che rimangano invariati i riferimenti sopra indicati.

INTRODUZIONE ALL'ILLUMINOTECNICA

Una delle più innovative invenzioni scientifiche è certamente la lampada di *Edison*. Essa ha totalmente cambiato la vita dell'Uomo consentendogli di vedere in ogni condizione senza dover dipendere dalla luce solare.

Certo i mezzi utilizzati fino ad inizio secolo erano stati sufficienti per l'illuminazione artificiale: in fondo dalla torcia al lume ad olio o alla candela in cera o al lume a petrolio non ci sono grandi evoluzioni tecnologiche se non nel materiale utilizzato.

Ciò che caratterizza l'illuminazione artificiale con lampade moderne è la possibilità di ricreare un ambiente confortevole che consente non solo di vedere (o appena di vedere) ma di *vivere* in piena dignità e di produrre in piena sicurezza.

L'evoluzione della tecnica dell'illuminazione non è solamente tecnologica (mezzi più evoluti, meno costosi e più efficienti) ma anche funzionale nel senso che tende a creare le migliori condizioni di *benessere visivo*.

Con questa definizione si intende, ancora una volta, *l'atteggiamento mentale di piena accettazione senza sensazioni sgradevoli dell'ambiente visivo*.

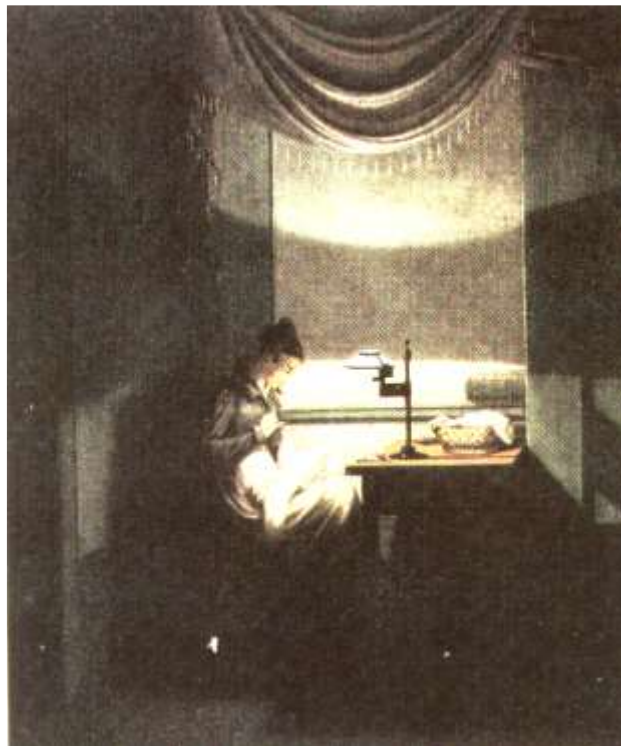


Figura 1: "Donna che cuce alla luce della lampada" (1828) di Georg Friedrich Kersting

Oggi siamo in grado di illuminare in modo diverso a seconda delle esigenze: per lavoro, per svago, per arte, ...

Disponiamo di numerose sorgenti luminose che consentono di vedere *fedelmente* i colori degli oggetti e di illuminare gli oggetti nel modo desiderato evitando, ad esempio, effetti indesiderati e sgradevoli quali l'abbagliamento visivo. Per arrivare a questo stadio della ricerca e della tecnica si è passati in varie fasi, ancora non esaurite, che hanno avuto origine proprio con la piena disponibilità di luce mediante illuminazione artificiale.

La vita notturna (*la ville lumière*) è oggi possibile grazie alla possibilità di ricreare condizioni accettabili di visibilità e di poter lavorare in tutta sicurezza. Si parla già di città da *utilizzare* per 24 ore anziché per il solo periodo diurno.



Figura 2: Vista della Terra nelle ore notturne e delle zone più illuminate

In questo modo si avrebbe un utilizzo più razionale delle risorse urbane (strade, uffici, negozi, trasporti, ...) distribuendolo nell'arco dell'intera giornata ed evitando gli affollamenti mattutini per gli uffici, la scuola, i negozi, ...

L'esame della precedente figura mostra come possa esserci una correlazione fra l'illuminazione artificiale e le condizioni di avanzamento tecnologico. Risultano più luminose le nazioni più avanzate.

La nozione di comfort visivo è ormai, forse inconsciamente, diffusa e quasi banale per tutti. In realtà lo studio del comfort visivo è sempre in continua evoluzione e siamo ben lontani dall'aver esaurito l'argomento. In fondo a definire le condizioni di benessere visivo è l'Uomo mediante il suo organo della vista. Tanto più avanzano le conoscenze sugli organi umani tanto più si evolvono le conoscenze sul comfort in genere e in particolare su quello visivo.

L'analisi e la valutazione del livello di illuminazione che si vuole raggiungere in uno specifico ambiente (abitazione, ufficio, industria, scuola, ospedale, etc.), per una perfetta visione, assume primaria importanza in fase progettuale essendo ad essa legata il corretto svolgimento delle attività lavorative.

La maggior parte delle informazioni necessarie per lo svolgimento di una attività lavorativa sono infatti di tipo visivo per cui, le modalità di illuminazione del *compito* devono essere attentamente valutate al fine di garantire il comfort dell'operatore.

Per raggiungere tale obiettivo bisogna:

- *realizzare un ambiente luminoso idoneo a soddisfare le esigenze fisiopsicologiche dell'operatore assicurando sempre, ove possibile, il ricorso all'illuminazione naturale;*

- *rendere ottimale la percezione delle informazioni visive, per assicurare buone condizioni di lavoro ed una prestazione visiva veloce e precisa.*

Sulla base di queste premesse la progettazione degli interni non deve mirare esclusivamente al raggiungimento di un illuminamento uniforme del piano di lavoro e quindi dell'ambiente, ma deve garantire una corretta visibilità del compito visivo mediante un'analisi accurata e dettagliata di tutti quei parametri che ne influenzano la prestazione visiva quali: *il contrasto percepito dall'operatore, lo stato di adattamento, la presenza di fenomeni di abbagliamento e di riflessione, la procedura di svolgimento del compito visivo, etc.*

Particolare importanza riveste lo studio dello spazio fisico e delle caratteristiche funzionali ad esso connesse quali:

- corretta dimensione degli ambienti e delle superfici vetrate;
- finitura, colore e caratteristiche di riflessione delle superfici;
- dimensione e caratterizzazione di eventuali schermi;
- definizione delle classi di utenza;
- definizione delle attività svolte nell'ambiente;
- profilo di occupazione dell'ambiente.

Questo volume, affrontando il problema dell'illuminazione di interni con luce artificiale e con luce naturale descrive inoltre i principali parametri da adottare in fase di progettazione e di verifica degli ambienti.

Si presentano in questa sede solo gli aspetti ritenuti più importanti e fondamentali rinviando per gli approfondimenti ai testi e manuali specializzati indicati in *Bibliografia*.

Catania 9 dicembre 2016

1. UNITÀ DI MISURA ILLUMINOTECNICHE

L'Illuminotecnica è scienza recente ed è associata agli sviluppi degli studi sull'Irraggiamento dei corpi. L'Illuminotecnica è in pratica lo studio dell'Irraggiamento (in particolare dell'irraggiamento solare) applicato all'Uomo. Questa caratteristica deriva dalla capacità dell'Uomo di percepire le lunghezze d'onda fra 0.38 e 0.78 μm mediante la retina degli occhi e di trasformare questi segnali in impulsi elettrici che il cervello interpreta come "luce" e dando luogo alla **visione** delle immagini. Per caratterizzare questa peculiarità le grandezze illuminotecniche sono state diversificate da quelle radiative, come si vedrà in questo capitolo.

Prima di procedere avanti occorre subito osservare che le grandezze illuminotecniche differiscono da quelle energetiche, definite per l'irraggiamento, per il fatto che si riferiscono all'Uomo e quindi tengono conto della risposta soggettiva dell'occhio umano medio.

Le onde luminose che interessano la visione dell'Uomo sono quelle con lunghezza d'onda compresa fra 0.38 e 0.78 μm . Quest'intervallo è davvero piccolo rispetto allo spettro delle onde elettromagnetiche, come si può osservare nella successiva figura.

Si osserva che quest'intervallo corrisponde anche la massima intensità di radiazione solare, vedi figura successiva, che trova un massimo in corrispondenza di 0.55 μm che è proprio la lunghezza d'onda di massima visibilità dell'occhio umano medio.

Si può allora pensare che l'occhio umano si sia specializzato nella zona di massima disponibilità energetica solare.

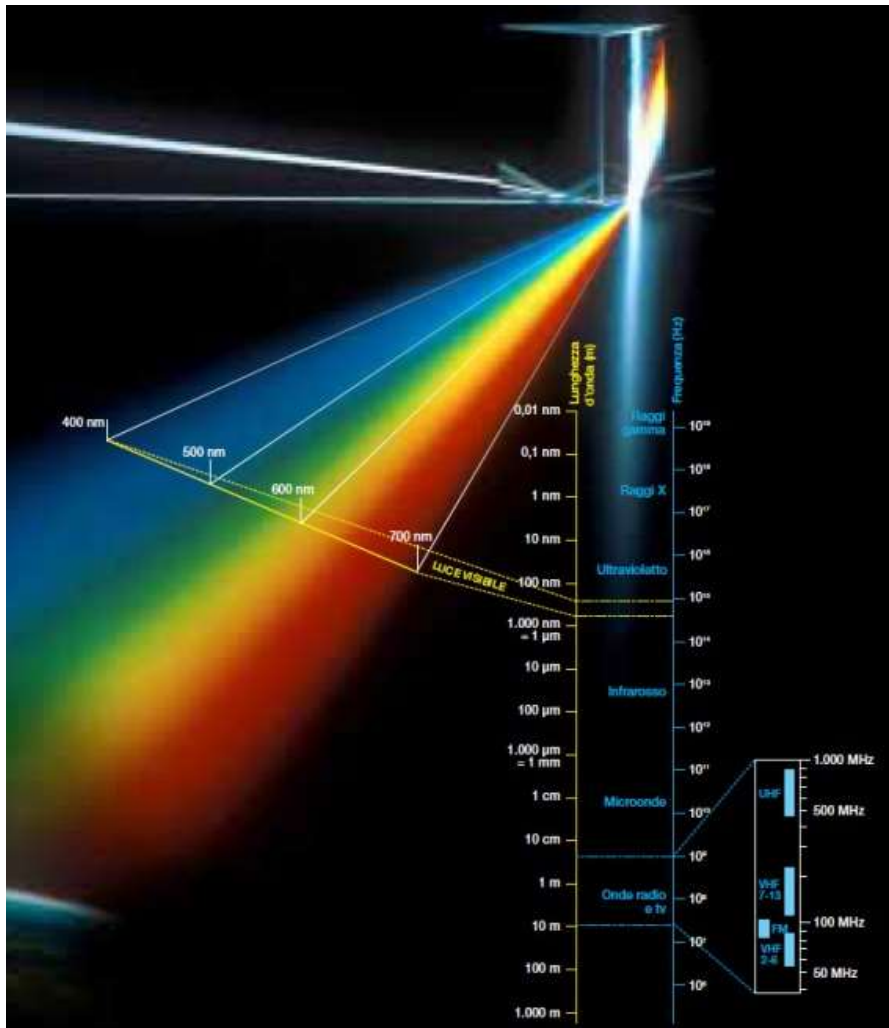


Figura 3: Distribuzione spettrale delle onde elettromagnetiche.

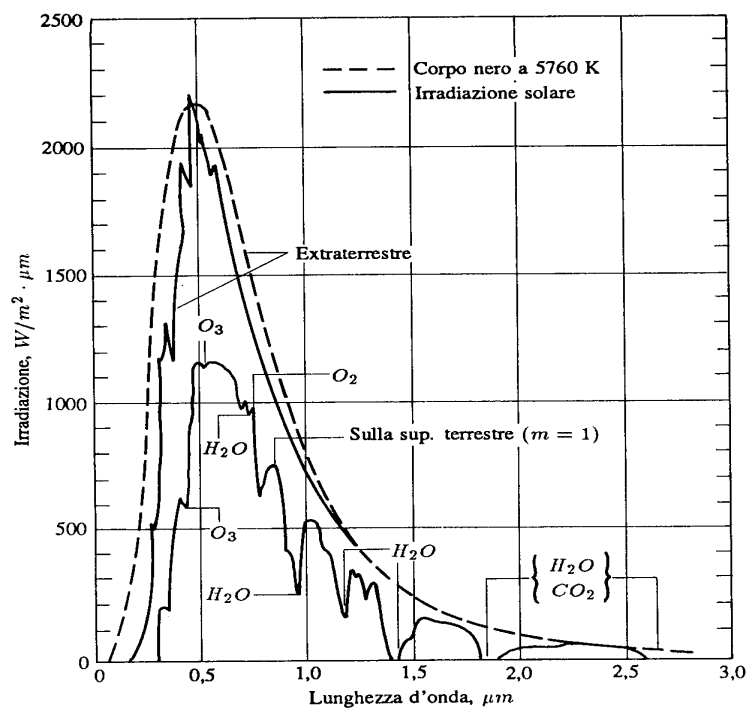


Figura 4: Radiazione solare fuori dell'atmosfera e al suolo

1.1. GRANDEZZE SOGGETTIVE E GRANDEZZE OGGETTIVE

La grandezza che definisce questo passaggio, da energetica a soggettiva o illuminotecnica, è il **flusso luminoso** per la cui definizione occorre anticipare due concetti che saranno ripresi e discussi ampiamente nel prossimo capitolo.

L'**occhio umano medio** è sensibilizzato (volgarmente diciamo che *vediamo*) da radiazioni elettromagnetiche con lunghezze d'onda fra 380 e 780 nm. Poi la visibilità (fenomeno soggettivo connesso alla visione, di cui di parlerà nel prosieguo) non è uniforme per tutte le lunghezze d'onde ma varia secondo la curva di Figura 5 (anch'essa ripresa nel prosieguo). Il massimo di visibilità è associato ad un valore pari a 680 lumen/Watt e rappresenta anche il valore di passaggio fra le grandezze illuminotecniche (soggettive) e quelle energetiche (oggettive).

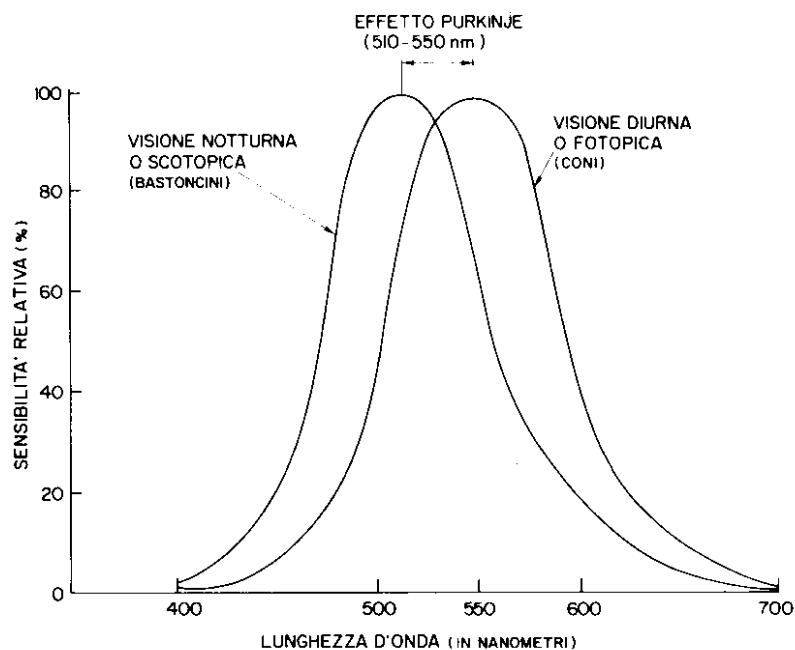


Figura 5: Curve di visibilità relativa fotopica e scotopica

La lunghezza d'onda di massima visibilità è di 555 nm corrispondente alla luce gialla verdastra. Si osservi che la curva agli estremi si annulla: in effetti a 380 nm si ha luce viola (a sinistra della quale si hanno i raggi ultra violetti, non visibili) e a 780 nm si ha il rosso (a destra del quale si hanno i raggi infrarossi, non visibili). Non si confonda la visibilità con l'attenzione che il colore rosso genera nell'Uomo medio. In effetti illuminare un ambiente con luce rossa (vedi, ad esempio, gli studi di riproduzione fotografica) non porta ad avere un buon confort visivo, anzi si ha un grande sforzo di adattamento. La **curva di visibilità relativa** va considerata come rapporto fra effetti prodotti da radiazioni di data lunghezza d'onda rispetto a quella di massima emissione.

In Figura 5 si hanno due curve: una relativa alla **visione fotopica** nella quale l'occhio può pienamente percepire i colori (vedi nel prossimo capitolo) ed una relativa alla **visione scotopica** nella quale si possono percepire solo i grigi.

Quest'ultimo caso è relativo a scarse illuminazioni (o meglio a bassi valori di luminanza) e non trovano applicazioni nell'impiantistica a luce artificiale dove, al contrario, si persegue la condizione di massimo confort visivo in visione fotopica.

1.1.1. FLUSSO LUMINOSO

In base a quanto detto se $w(\lambda)$ è la distribuzione di flusso di una sorgente radiativa, chiameremo **flusso luminoso** l'integrale:

$$\Phi = \int_{380nm}^{780nm} K(\lambda)w(\lambda)d\lambda, \quad \text{Lumen} \quad (1)$$

ove $K(\lambda)$ è il **fattore di visibilità assoluto** e $w(\lambda)$ la **radianza** mono energetica della sorgente.

L'integrale è esteso fra 380 e 780 nm che corrisponde all'intervallo di visibilità dell'occhio umano medio. Si osservi che la precedente relazione è il legame fra la grandezza fisica (oggettiva) $w(\lambda)$ e la visione dell'Uomo. Normalizzando il fattore di visibilità assoluta si può anche scrivere:

$$\Phi = 683 \int_{380nm}^{780nm} k(\lambda)w(\lambda)d\lambda, \quad \text{Lumen} \quad (2)$$

con 683 *lumen/Watt* valore massimo di $K(\lambda)$.

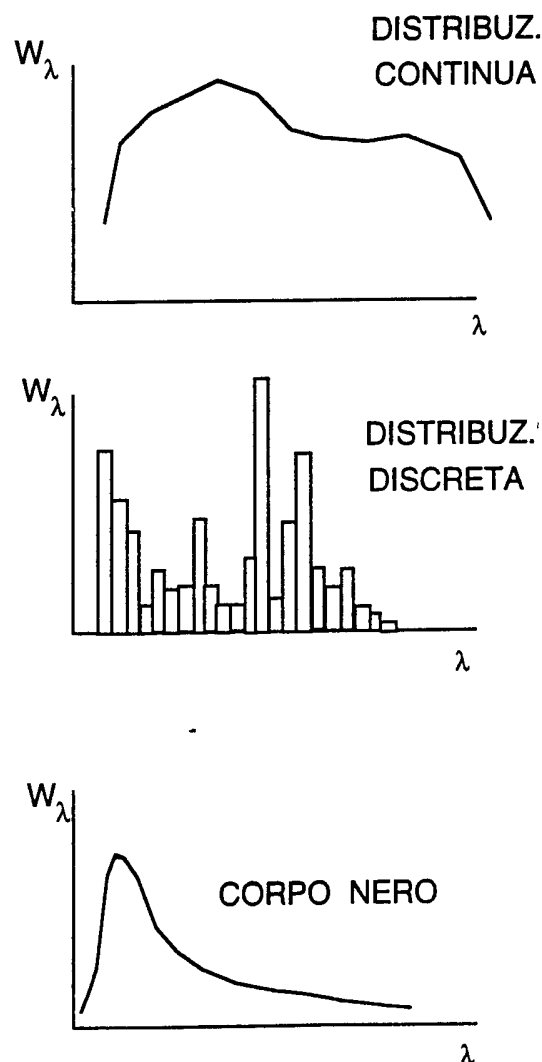


Figura 6: Tipi di sorgenti luminose

Il tipo di distribuzione spettrale dipende dalla sorgente luminosa. In Figura 6 sono rappresentate le tre tipologie ricorrenti:

- 1° Distribuzione **continua**: tipica delle sorgenti che emettono radiazioni luminose per effetto termico (ad esempio, filamenti delle lampade ad incandescenza);

- 2° Distribuzione **discreta** a righe: tipica dell'emissione nelle lampade a scarica nei gas (a luminescenza, ad Hg, Na, Ar, ...). Le righe sono corrispondenti ai salti quantici dei livelli elettronici dello elemento utilizzato in questo tipo di lampade);
- 3° Distribuzione **normale** del corpo nero: si tratta di una distribuzione ideale relativa ad un corpo ideale (il corpo nero). Nella realtà anche i corpi grigi emettono una distribuzione continua omotetica a quella del corpo nero secondo l'emissività ε . In figura si ha un esempio dei tre tipi di sorgenti luminose: a distribuzione continua (come si ha nelle lampade ad incandescenza), a distribuzione discreta (vedi, ad esempio, nelle lampade a fluorescenza) e ideale (corpo nero secondo la legge di Planck).

Per calcolare il *flusso luminoso* occorre risolvere l'integrale (1), vedi Figura 7, e ciò può essere fatto con metodi numerici (ad esempio con il metodo di *Simpson*). Si osservi che l'azione di filtro della *curva di visibilità* diminuisce l'effetto di visibilità delle sorgenti luminose.

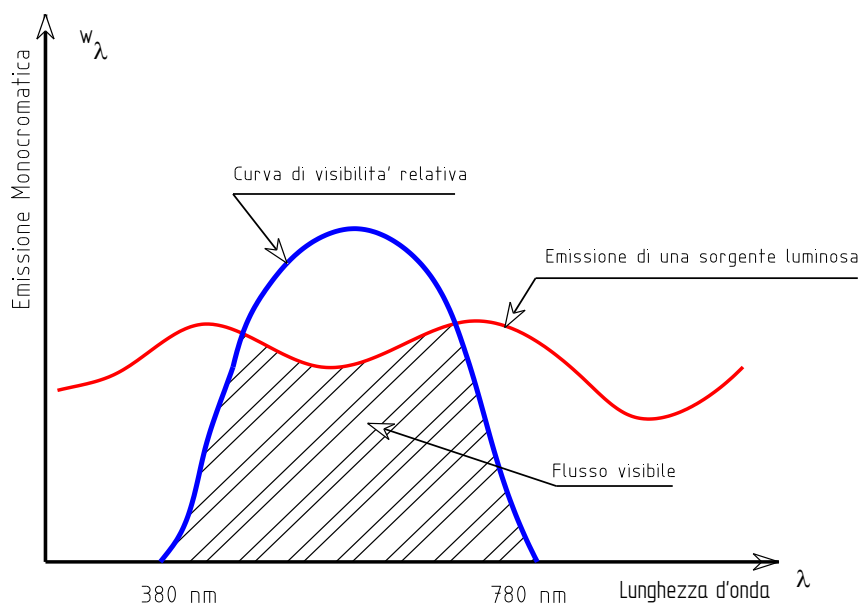


Figura 7: Significato di Flusso Luminoso

Noi vediamo in un intervallo ristretto di frequenze e, all'interno di questo intervallo 380÷780 nm, con efficienze diverse. Vedremo nel prosieguo quali effetti produce questa osservazione sull'efficienza luminosa delle lampade.

1.1.2. INTENSITÀ LUMINOSA

L'intensità luminosa è il flusso luminoso che ricade nell'unità di angolo solido, cioè si ha:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad \text{Candele} \quad (3)$$

per cui risulta anche:

$$1 \text{ cd} = K_{\max} \frac{1}{683} \left(\frac{W}{sr} \right) \quad (4)$$

da cui:

$$K_{\max} = 683 \frac{cd \cdot sr \cdot lm}{W} \quad (5)$$

L'unità è la **Candela** definita come l'intensità di una sorgente luminosa emessa nell'angolo solido di 1 sr, di $\lambda=555$ nm e di potenza pari a 1/683 W. E' questa l'unità di misura fondamentale dell'Illuminotecnica e pertanto tutte le altre grandezze sono derivate da questa mediante relazioni inverse. Dalla precedente e si ottiene che il flusso luminoso vale:

$$\Phi = \int_{\Omega} I \cdot d\Omega \quad (6)$$

ove l'angolo solido è dato da:

$$d\Omega = \frac{dA \cos \varepsilon}{r^2} \quad (7)$$

Per i corpi lambertiani che emettono in un semispazio secondo la legge del coseno è:

$$I = I_0 \cos \varepsilon$$

$$\Phi = \int_{\Omega} I d\Omega = 2\pi I_0 \int_0^{\pi/2} \sin \varepsilon \cos \varepsilon d\varepsilon = \pi I_0$$

$$\Phi = \pi I_0$$

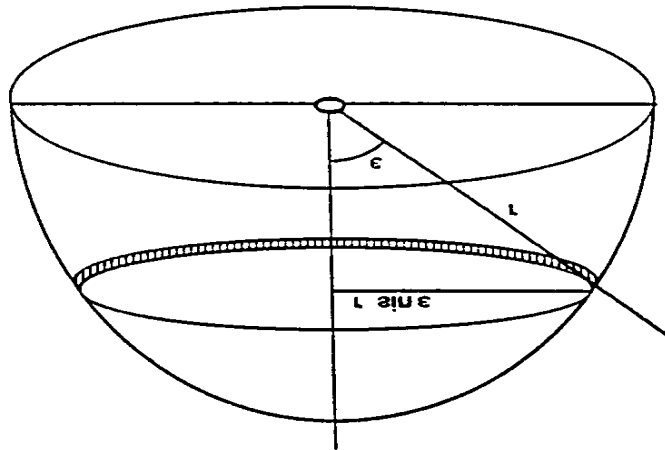


Figura 8: Relazione fra intensità ed angolo solido

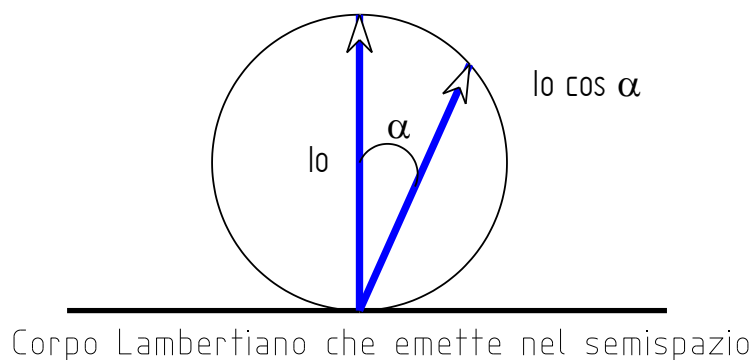
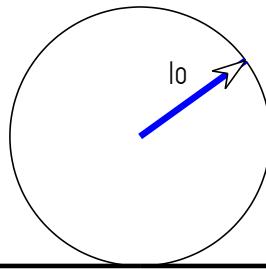


Figura 9: Intensità per corpi lambertiani

Per le sorgenti puntiformi che emettono uniformemente in tutto l'angolo solido 4π si ha, ponendo $I=I_0$ in tutte le direzioni:

$$\Phi = \int_{\Omega} I d\Omega = I_0 \int_0^{4\pi} d\Omega = 4\pi I_0$$



Sorgente puntiforme che emette in tutto l'angolo solido 4π

Figura 10: Sorgenti puntiformi

1.1.3. LUMINANZA

La luminanza è definita dalla relazione:

$$L = \frac{dI}{dA \cos \alpha} = \frac{dE}{d\Omega \cos \alpha} \quad \text{Nit (cd / m}^2\text{)} \quad (8)$$

Le unità utilizzate sono:

$$[L] = \left[\frac{\text{Cd}}{\text{m}^2} \right] = [\text{Nit}] \quad [\text{Stilb}] = \left[\frac{\text{Cd}}{\text{cm}^2} \right] = 10^4 \text{ Nit}$$

Un confronto con la definizione dell'intensità energetica, definita a proposito dell'Irraggiamento, porta a riconoscere nella luminanza la grandezza analoga in campo illuminotecnico.

Per i corpi lambertiani si ha che la luminanza non dipende dalla direzione ε :

$$I_\varepsilon = I_0 \cos \varepsilon$$

e quindi:

$$L = \frac{I_\varepsilon}{S \cos \varepsilon} = \frac{I_0 \cos \varepsilon}{S \cos \varepsilon}$$

cioè:

$$L = \frac{I_0}{S}$$

1.1.4. ILLUMINAMENTO

Una grandezza molto utilizzata nella pratica (forse quella maggiormente nota, anche per l'utilizzo che se fa in fotografia) è l'illuminamento dato dalla relazione:

$$E = \frac{d\Phi_{\text{ricevuto}}}{dA_{\text{ricevente}}} \quad \text{Lux} \quad (9)$$

Combinando con la relazione dell'intensità si ottiene anche l'importante relazione:

$$E_p = \frac{d\Phi_{\text{ricevuto}}}{dA_{\text{ricevente}}} = \frac{d\Phi}{d\Omega} \cdot \frac{d\Omega}{dA} = I_\varepsilon \frac{d\alpha \cos \alpha / R^2}{dA} \quad (10)$$

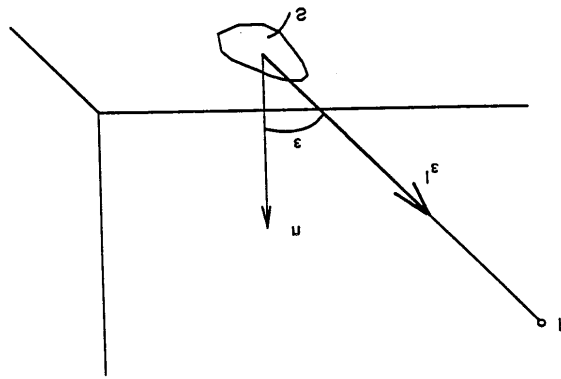


Figura 11: Luminanza per corpi lambertiani

$$E_p = I_\epsilon \frac{\cos \alpha}{R^2} \quad (11)$$

Si utilizza questa relazione per la verifica illuminotecnica degli impianti di illuminazione artificiali.

Se vi sono più sorgenti luminose si applica il principio di sovrapposizione degli effetti per cui si ha:

$$E_p = E_{P_1} + E_{P_2} = I_{\epsilon_1} \frac{\cos \alpha_1}{R_1^2} + I_{\epsilon_2} \frac{\cos \alpha_2}{R_2^2} \quad (12)$$

E' opportuno osservare che la luminanza si riferisce alla superficie apparente della sorgente emittente mentre l'illuminamento si riferisce alla superficie ricevente il flusso luminoso. Nel caso di superfici trasparenti si ha:

$$\Phi_{emesso} = \tau \Phi_{incidente}$$

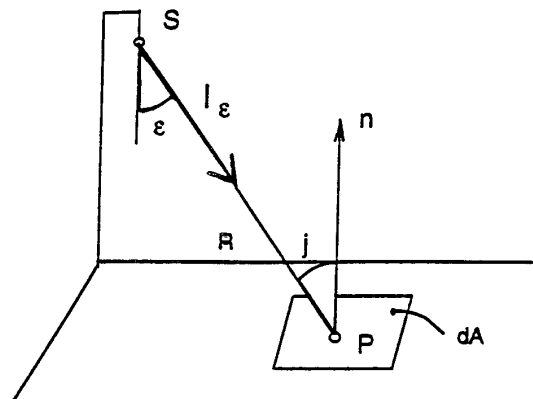


Figura 12: relazione fra flusso ed Intensità

Essendo $\Phi_{emesso} = \pi I_0$ per superfici lambertiani si ha:

$$\tau \frac{\Phi_{incidente}}{A} = \pi \frac{I_0}{S}$$

ossia:

$$\tau E = \pi L$$

da cui:

$$L = \frac{\tau E}{\pi}$$

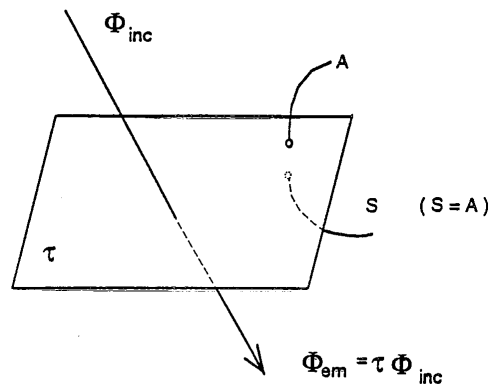


Figura 13: Luminanza per superfici trasparenti

Per superfici lambertiani si ha:

$$\Phi_{emesso} = \rho \Phi_{incidente}$$

Essendo $\phi_{\text{emesso}} = \pi I_0$ per superfici lambertiani si ha:

$$\tau \frac{\Phi_{incidente}}{A} = \pi \frac{I_0}{S}$$

ossia:

$$\rho E = \pi L$$

da cui:

$$L = \frac{\rho E}{\pi}$$

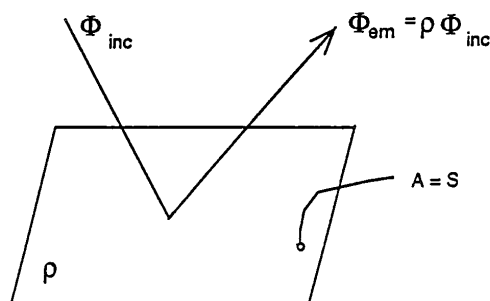


Figura 14: Luminanza per superfici lambertiane

1.1.5. RADIENZA

La radianza è definita dalla relazione:

$$R = \frac{d\Phi}{dA} \quad \text{Lux sul bianco} \quad (13)$$

e risulta anche:

$$R = rE \quad (14)$$

con r fattore di riflessione della superficie su cui ricade l'illuminamento E . Questa relazione ci dice che la radiazione visibile emessa una superficie riflettente è pari al prodotto dell'illuminamento ricevuto per il suo fattore di riflessione. Poiché le radiazioni emesse dai corpi sono, per la legge di Wien, di lunghezza d'onda elevata (in genere oltre i $3 \mu\text{m}$) allora la (14) ci dice che vediamo solo la loro luce riflessa.

Ricordando dall'Irraggiamento che per corpi uniformemente diffondenti vale la relazione:

$$R = \pi L \quad (15)$$

per cui la luminanza si può calcolare con la relazione:

$$L = \frac{rE}{\pi} \quad (16)$$

che la lega all'illuminamento ricevuto da una superficie. Questa relazione è importante nelle applicazioni perché consente di passare da E ad L , grandezza quest'ultima oggi preferita in Illuminotecnica.

1.2. LA SFERA DI ULBRICHT

La sfera di *Ulbricht* è cava e la superficie interna è dipinta con vernice uniformemente diffondente. Una lampada posta al suo interno produce un flusso dato da:

$$\Phi_{\text{circolante}} = \Phi_{\text{diretto}} + \Phi_{\text{indiretto}} \quad (17)$$

Il flusso diretto è quello prodotto dalla lampada (lampada campione con F_0 noto):

$$\Phi_{\text{diretto}} = \Phi_0 \quad (18)$$

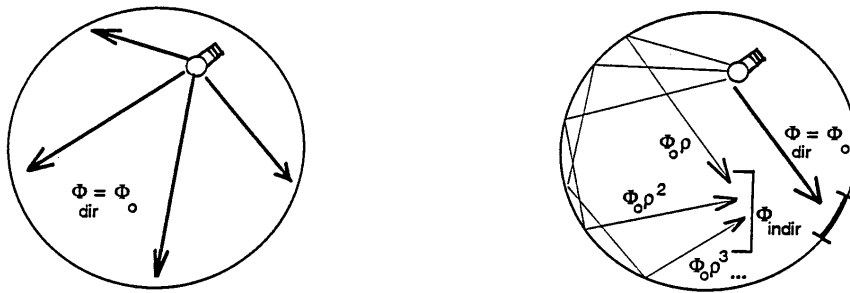


Figura 15: Distribuzione interna del flusso nella sfera di Ulbricht

Pertanto si ha:

$$\Phi_{\text{indiretto}} = \Phi_0\rho + \Phi_0\rho^2 + \Phi_0\rho^3 + \Phi_0\rho^4 + \dots = \Phi_0 \frac{\rho}{1-\rho}$$

da cui:

$$\Phi_{\text{circolante}} = \Phi_{\text{diretto}} + \Phi_{\text{indiretto}} = \Phi_0 + \Phi_0 \frac{\rho}{1-\rho} = \Phi_0 \frac{1}{1-\rho}$$

da cui:

$$E = \frac{\Phi_{\text{circolante}}}{A_{\text{totale}}} = \frac{\Phi_0}{A_{\text{totale}}} \frac{1}{1-\rho} \quad (19)$$

Allora, nota la *riflettività* r della superficie interna si calcola il flusso:

$$\Phi_0 = EA_{\text{totale}}(1-\rho) \quad (20)$$

1.2.1. MISURA DEL FLUSSO LUMINOSO CON LA SFERA DI ULBRICHT

La misura del Flusso luminoso è effettuata mediante una *Sfera di Ulbricht*.

Si pratica una finestra sulla superficie della sfera e si pone all'interno una lampada schermata mediante un foglio di carta in modo da eliminare la componente di illuminazione diretta.

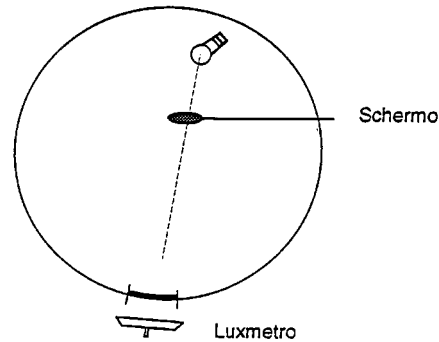


Figura 16: Sfera di Ulbricht

Il flusso incidente in un generico punto della sfera vale:

$$\Phi_{\text{incidente}} = \Phi_{\text{indiretto}} = \Phi \frac{\rho}{1 - \rho}$$

e l'illuminamento che è possibile misurare con un luxometro:

$$E_{\text{misurato}} = \frac{\Phi_{\text{indiretto}}}{4\pi R^2} = \Phi_0 \frac{\rho}{4\pi R^2 (1 - \rho)}$$

da cui si ricava:

$$\Phi_0 = E_{\text{misurato}} \left(\frac{4\pi R^2 (1 - \rho)}{\rho} \right) = E_{\text{misurato}} K \quad (21)$$

con la costante della sfera K data da:

$$K = \frac{4\pi R^2 (1 - \rho)}{\rho} \quad (22)$$

Pertanto si determina Φ dalla misura di E sulla sfera.

1.3. METODI DI MISURA DELLE GRANDEZZE ILLUMINOTECNICHE

Si presentano brevemente alcuni metodi di misura utilizzati in campo illuminotecnico.

1.3.1. MISURA DEL FLUSSO CON IL LUXOMETRO

Per misurare l'illuminamento si utilizza una cellula fotovoltaica che genera una corrente in funzione della radiazione incidente.

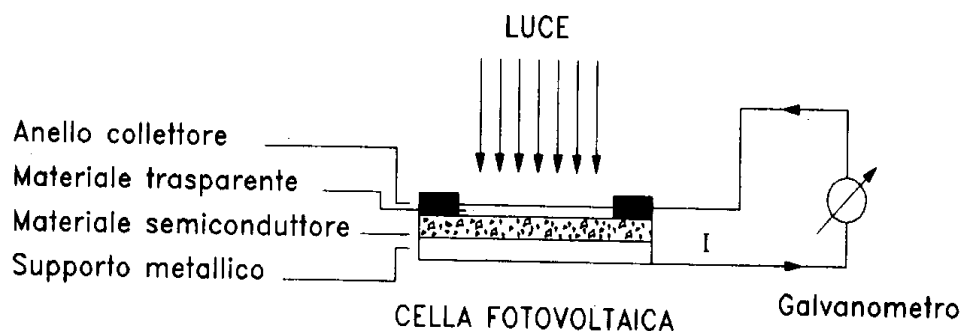


Figura 17: Schema di un luxometro a cellula fotovoltaica

Un filtro sovrapposto alla cellula rende la risposta di questa simile alla curva di visibilità relativa e quindi la misura dell'irraggiamento totale può rendersi proporzionale all'illuminamento.

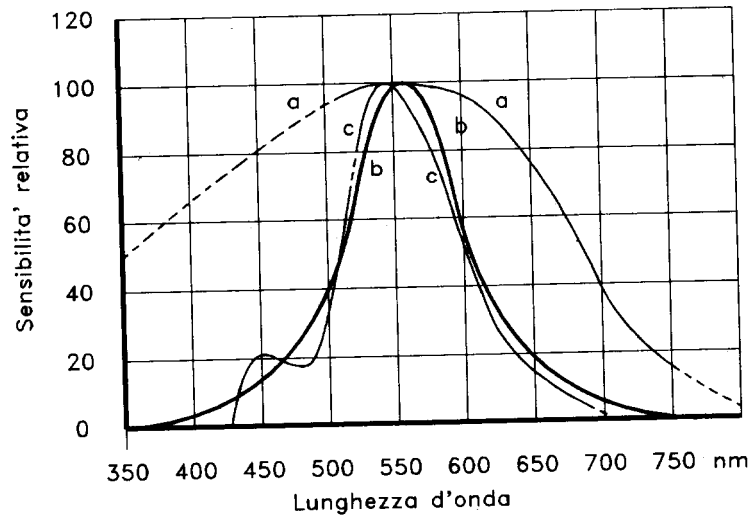


Figura 18: Tipologia di filtri per le celle fotovoltaiche

1.3.2. IL BANCO FOTOMETRICO

Il Banco fotometrico è costruito come in figura sottostante. A sinistra si ha una lampada campione e a destra una lampada da esaminare.

Il carrello mobile porta un dispositivo ottico che presenta l'illuminazione prodotta da entrambi i lati dalle due lampade.

Si sposta il carrello fino a quando gli illuminamenti sono eguali sulle due facciate e quindi vale la relazione (per direzioni normali):

$$E = \frac{I_1}{d_1^2} = \frac{I_2}{d_2^2}$$

Allora nota I_1 e le distanze d_1 e d_2 si calcola:

$$I_2 = I_1 \frac{d_1^2}{d_2^2} \quad (23)$$

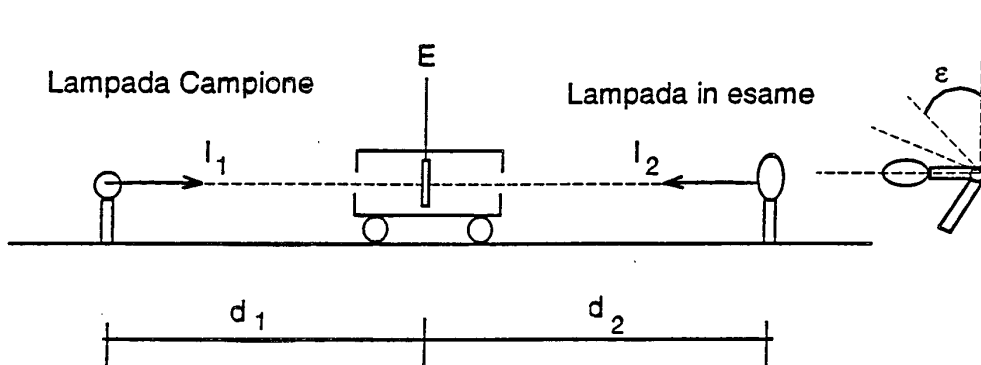


Figura 19: Banco fotometrico

Ripetendo il calcolo per diverse direzioni si ha la costruzione della curva fotometrica di figura.

Ruotando la lampada attorno allo zoccolo di montaggio e ripetendo per varie angolazioni si può avere la costruzione del solido fotometrico.

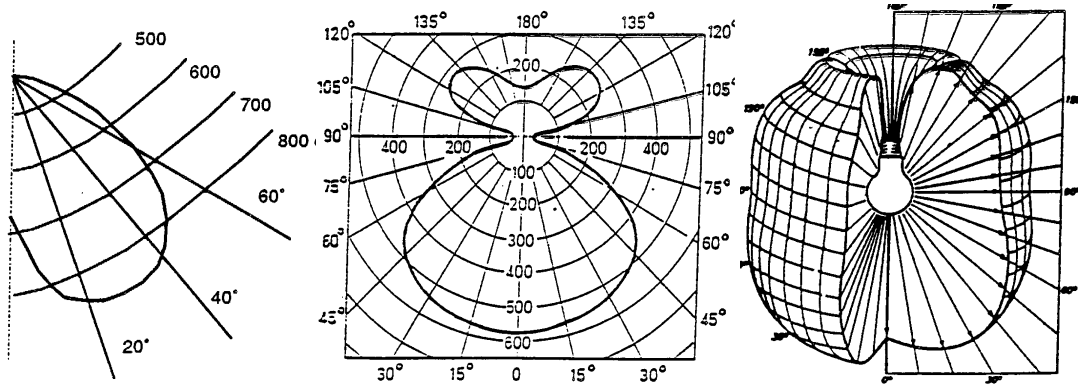


Figura 20: Solido fotometrico e sua sezione in piano

1.3.3. CALCOLO DEL FLUSSO CON IL METODO IEC

L'angolo solido di una zona sferica compresa fra α ed $\alpha+d\alpha$ vale:

$$\int_{\alpha}^{\alpha+d\alpha} d\Omega = \int_{\alpha}^{\alpha+d\alpha} 2\pi \sin \alpha d\alpha = 2\pi [(\cos \alpha) - \cos(\alpha + d\alpha)]$$

Per un solido fotometrico avente simmetria di rotazione si può calcolare il flusso luminoso suddividendo la sfera in quattro zone corrispondenti agli angoli (IEC N. 52/1982):

$$\frac{\pi}{2}, \quad \pi, \quad \frac{3}{2}\pi, \quad 2\pi$$

Il flusso Φ , ricordando quanto sopra scritto, vale:

$$\Phi = \int_0^{2\pi} I d\Omega = \sum_{\alpha=0}^{\pi} I_{\alpha} \Delta\Omega_{\alpha} = 2\pi \sum_{\alpha=0}^{\pi} [(\cos \alpha) - \cos(\alpha + d\alpha)]$$

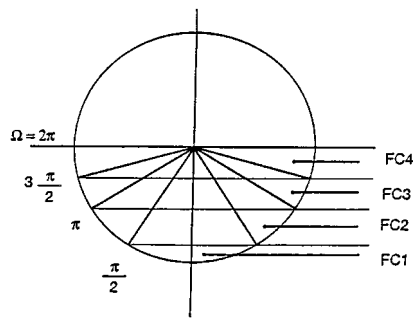


Figura 21: Sezioni per il metodo IEC

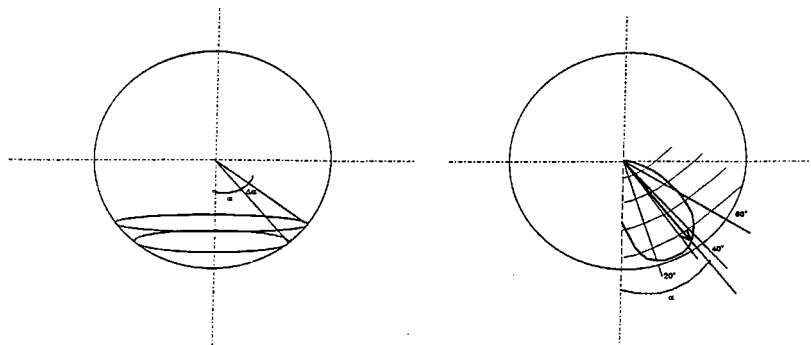


Figura 22: Calcolo del flusso con il metodo IEC

Di solito il flusso emesso nelle quattro regioni IEC viene espresso in termini percentuali rispetto al flusso emesso nel 2π sr ed indicato rispettivamente con FC1, FC2, FC3, FC4.

1.3.4. CALCOLO DELL'ILLUMINAMENTO FRA SUPERFICI

Sia la superficie S1 emittente ed S2 ricevente. L'illuminamento in P vale:

$$E_p = L_1 \int d\Omega_{0 \rightarrow S} \cos j = L_1 \int_{S_1} \frac{dS_1 \cos \varepsilon}{d^2} \cos j \quad (24)$$

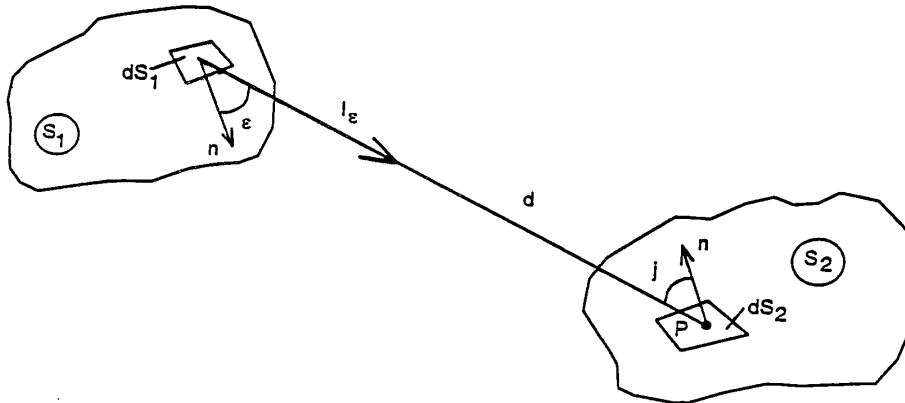


Figura 23: Illuminamento fra due superfici

Il flusso emesso da S1 che raggiunge S2 risulta:

$$\Phi_{12} = \int_{S_2} E_p dS_2 = L_1 \int_{S_1} \frac{dS_1 \cos \varepsilon}{d^2} \int_{S_2} \cos j dS_2 \quad (25)$$

e quindi anche, moltiplicando e dividendo per πS_1 :

$$\Phi_{12} = \pi S_1 L_1 \left[\frac{1}{\pi S_1} \int_{S_1} \frac{dS_1 \cos \varepsilon}{d^2} \int_{S_2} \cos j dS_2 \right] \quad (26)$$

Il termine in parentesi è il **fattore di vista** fra S1 ed S2:

$$F_{12} = \frac{1}{\pi S_1} \int_{S_1} \frac{dS_1 \cos \varepsilon}{d^2} \int_{S_2} \cos j dS_2 \quad (27)$$

per cui:

$$\Phi_{12} = \pi L_1 S_1 F_{12} \quad (28)$$

Ricordando che per corpi *lambertiani* la radianza è $R = \pi L$ si ha:

$$E_2 = \frac{\Phi_{12}}{S_2} = R_1 \frac{S_1}{S_2} F_{12} \quad (29)$$

La risoluzione della (27) non è agevole se non per geometrie semplici per le quali si riesce ad effettuare il calcolo degli integrali di superfici.

In Figura 24 si ha un esempio di fattore di forma per due geometrie semplici: piani formanti un diedro retto e piani paralleli. Il fattore di forma è dato dalle curve nei rispettivi abachi al variare dei vari rapporti geometrici.

Nello studio dell'Irraggiamento si sono viste altre geometrie e altri metodi di calcolo (anche semplificati) per il calcolo di F_{12} . Si ricordi che vale la *legge di reciprocità* cioè deve aversi:

$$S_1 F_{12} = S_2 F_{21} \quad (30)$$

e pertanto nei calcoli applicativi basta calcolare solo uno dei fattori di forma.

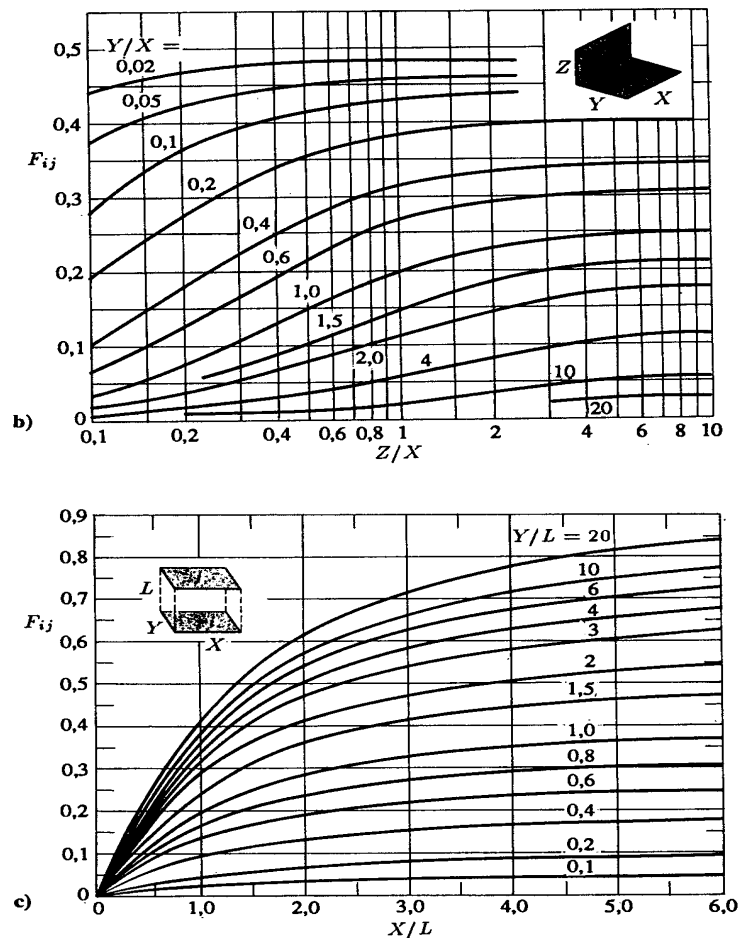


Figura 24: Scambio radiativo fra superfici

1.3.5. ILLUMINAMENTO IN UN PUNTO DA SUPERFICIE ESTESA

Con riferimento alla Figura 25, dalle definizioni di Luminanza ed Illuminamento che qui si ripetono

$$L = \frac{dI_\varepsilon}{dS \cos \varepsilon} \quad , \quad dE_p = \frac{dI_\varepsilon \cos j}{d^2}$$

combinando insieme si ha:

$$dE_p = L \cos j \left(\frac{dS \cos \varepsilon}{d^2} \right) = L \cos j \cdot d\Omega_{0 \rightarrow S} \quad (31)$$

Il termine in parentesi è l'**angolo solido** entro il quale l'oggetto vede la sorgente:

$$d\Omega_{0 \rightarrow S} = \left(\frac{dS \cos \varepsilon}{d^2} \right) \quad (32)$$

Allora se $L = \text{costante}$ segue:

$$E_p = L \int_{\Omega_{0 \rightarrow S}} \cos j \cdot d\Omega_{0 \rightarrow S} \quad (33)$$

che è la relazione per il calcolo dell'Illuminamento in un punto P dovuto ad una sorgente estesa S e di luminanza costante L.

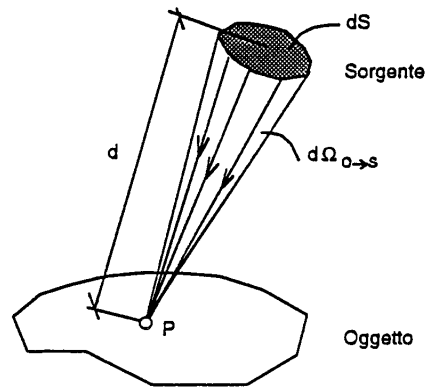


Figura 25: Illuminamento da una superficie in un punto

1.3.6. ILLUMINAMENTO DA UNA SORGENTE LINEARE

Nelle applicazioni si utilizzano spesso sorgenti aventi dimensioni prevalenti linearmente (si pensi ai tubi fluorescenti). In questo caso il calcolo dell'illuminamento in un punto P si può effettuare suddividendo la sorgente in elementi differenziali di lunghezza dl ai quali compete una intensità dI . Ne segue che l'illuminamento infinitesimo vale:

$$dE_P = \frac{dI_\varepsilon \cos j}{r^2}$$

ove j è l'angolo fra la normale al punto P e la congiungente dl con P. La luminanza dell'elemento dl è data dalla relazione:

$$L = \frac{dI_\varepsilon}{dl \cos \varepsilon}$$

essendo ε l'angolo sotto il quale l'elemento dl vede il punto P. Sostituendo nella precedente si ha:

$$dE_P = \frac{L dl \cos j \cos \varepsilon}{r^2}$$

con la luminanza misurata in cd/m . Integrando all'intera lunghezza della sorgente lineare si ha:

$$E = \int_l dE = \int_l \frac{L dl \cos j \cos \varepsilon}{r^2} \quad (34)$$

Nel caso di $L = \text{cost}$ si ha:

$$E = L \int_l \frac{dl \cos j \cos \varepsilon}{r^2} \quad (35)$$

Il calcolo dell'integrale dipende dal tipo di sorgente lineare. Queste possono essere di varie tipologie. Ad esempio un tubo al neon la luminanza può essere espressa nella forma:

$$L = L_\varepsilon \cos \varepsilon = L_s^* = \text{Costante}$$

Per altre sorgenti, come ad esempio, tubi a vapore di mercurio, a vapori di sodio e fluorescenti, si ha la relazione:

$$L_\varepsilon = L_s^* = \text{Costante}$$

In funzione delle tipologie di sorgenti si effettua, quindi, il calcolo della (35).

2. LA STORIA DELLA TEORIA DELLA LUCE

L'Uomo interagisce con il mondo esterno mediante i suoi sensi che trasformano i segnali ricevuti (acustici, visivi, olfattivi, gustativi e tattili) in stimoli neurali che il nostro cervello elabora in sensazioni (suoni, luce, odori, sapori, tatto). I segnali esterni sono di tipo fisico mentre le risposte sensoriali sono fisiologiche e pertanto affette dal "giudizio" dell'Uomo. La trasformazione dei segnali esterni in sensazioni sensoriali non è semplice né lineare. Si è visto in Acustica Tecnica come la risposta dell'orecchio umano non è lineare. Allo stesso modo la risposta dell'occhio non è lineare ma funzione della lunghezza d'onda. Ne segue che la realtà sensoriale è ben diversa dalla realtà oggettiva esterna e tutto nell'Uomo è soggettivo e legato alle condizioni psico fisiche in cui si trova. Nel caso della visione si ricordi che tutti i corpi emanano onde elettromagnetiche che solo l'Uomo, per uno specifico intervallo di lunghezze d'onda, interpreta come luce visibile e come visione del mondo esterno. La risposta psico fisica dell'Uomo condiziona sia l'interpretazione della visione che la visione stessa.

Nel corso degli ultimi tre secoli due diverse teorie si sono contese il privilegio di spiegare la natura della luce, a seguito di studi condotti da *Isaac Newton* (1642-1727) e da *Cristopher Huygens* (1629-1695).

Secondo Isaac Newton la luce doveva essere formata da una successione di minuscole particelle mentre Cristopher Huygens sosteneva l'esistenza di un sistema vibratorio, concepito sotto forma di sfere elastiche di un sistema vibratorio, in contatto fra di loro, che diffondeva i suoi impulsi nell'etere, un mezzo impercettibile ovunque presente.

Tale controversia, una delle più interessanti che si siano verificate nella storia della Scienza di tutti i tempi, ha origine dalla pubblicazione di *Giovanni Keplero* dal titolo “*Ad vitellionem paralipomena*” avvenuta nel 1604 con la quale viene dato un assetto definitivo alla spiegazione del meccanismo della visione sino a quel tempo ancora relegato a interpretazioni fantasiose e prive di qualsiasi supporto sperimentale, perfezionando quanto asseriva l’arabo *Ibn – Al - Haitham* nel XI secolo¹. *Keplero* spiegò che da ogni punto di un corpo luminoso o illuminato partono in tutte le direzioni infiniti raggi rettilinei che, per rifrazione del sistema ottico dell’occhio, formano l’immagine sulla retina.



Figura 26: Ritratti di Christopher Huygens, (da ignoto) e di Isaac Newton, (ritratto da C. Jervas)

Dopo *Keplero* si affermò definitivamente il concetto di *lumen*, l’agente fisico esterno, e nel giro di pochi anni si sviluppò un’importante capitolo della scienza chiamata *ottica geometrica* con la quale furono condotte tra l’altro dettagliate ricerche per comprendere la natura del *lumen* abbandonando quasi definitivamente gli studi sulla *lux* (l’effetto psichico corrispondente al *lumen*). Si affermarono quindi due correnti di pensiero: una che considerava il *lumen* come sciame di particelle materiali, cioè una *substantia* e l’altra che lo considerava un movimento, cioè un *accidens*. Ci si pose anche la domanda: che cosa succede ai raggi di luce passando da un mezzo all’altro? Mediante semplici prove sperimentali si osservò che quando la luce entra obliquamente, formando cioè un angolo con la perpendicolare alla superficie, in una sostanza trasparente, essa viene rifratta secondo una direzione che forma, sempre con la perpendicolare, un angolo inferiore a quello d’incidenza.

Nel 1621 il filosofo olandese *Willebrord Snell* stabilì la relazione esistente fra l’angolo d’incidenza e l’angolo di rifrazione giungendo alle medesime conclusioni di *Renè Descartes* detto

¹ Secondo *Ibn-Al-Haitham*, da ogni corpo si propagano, secondo delle traiettorie che uniscono l’oggetto considerato con l’occhio, dei corpuscoli infinitamente piccoli e percettibili solo se capaci di penetrare entro le orbite oculari. In base a tali postulati, accettati da tutti i filosofi dell’epoca, la luce è un fenomeno psichico, cioè una rappresentazione a cui la psiche perviene quando sulla retina agisce un agente esterno di natura fisica. In funzione di quanto in precedenza descritto furono adottate due parole capaci di spiegare in maniera esauriente tali fenomeni: *lumen* fu chiamato l’agente fisico esterno (composto da raggi rettilinei) e *lux* si chiamò l’effetto psichico corrispondente

*Cartesio*² (1596-1650). Cartesio nel suo trattato *Diottrica* si occupò delle leggi di riflessione della luce in uno specchio, considerando la luce stessa costituita da piccole sfere che si comportano come palle da biliardo che urtano la sponda del tavolo e rimbalzano sempre con la stessa angolazione pari a 45°.

Nonostante la deduzione cartesiana di luce fatta da corpuscoli, non si era ancora in grado di dare una risposta esauriente circa il problema dei diversi colori della luce. Nel 1672 *Isaac Newton* nella sua lettera *Philosophical transactions* espone le proprie idee circa la natura dei colori scaturite da circa dieci anni di esperienza mediante l'utilizzo di prismi ottici.

Egli fece in modo che un raggio di luce incidesse obliquamente su una faccia di un prisma triangolare di vetro: il raggio veniva rifratto una prima volta quando penetrava nel vetro ed una seconda volta nella stessa direzione, quando ne usciva da un'altra faccia del prisma verificando l'effettiva differente inclinazione tra raggio incidente e raggio rifratto.

Sempre con tale esperimento ci si accorse che il raggio luminoso che fuoriusciva dal prisma colpendo una superficie bianca formava una striscia di vari colori, che vanno dal rosso al viola, anziché una luce bianca. Nulla togliendo alla sua grandezza Newton, con la sua teoria corpuscolare, diede una spiegazione errata del fenomeno ammettendo che i corpuscoli della luce avevano forma e caratteristiche diverse a seconda del colore del raggio considerato, i quali venivano attratti dai corpi che attraversavano, secondo leggi simili a quelle della gravitazione universale. Nonostante i molti interrogativi che la teoria corpuscolare lasciava irrisolti³ questa divenne la teoria ufficiale del *lumen* durante tutto il secolo XVIII.

Il più noto oppositore della teoria corpuscolare fu il fisico olandese *Cristian Huygens* (1629-1695). Huygens dichiarava che il fenomeno della diffrazione era causato dalla minore velocità della luce nei mezzi più densi, prospettando con felice intuizione un'ipotesi che soltanto molti anni dopo doveva essere confermata sperimentalmente dal fisico francese *Foucault*.

La *teoria ondulatoria*, così venne chiamata la teoria alternativa proposta da *Huygens*, si rifà all'idea di un *lumen* come *accidens* secondo la quale la luce è costituita da piccolissime onde. Il fisico olandese sosteneva che le differenti lunghezze d'onda della luce fanno sì che l'occhio distingua i vari colori. I colori corrispondono quindi a precise lunghezze d'onda⁴, capaci di far stimolare la retina e di far percepire il senso del colore, al di là delle quali, in corrispondenza delle radiazioni infrarosse ed ultraviolette, l'occhio non è più in grado di vedere.

Nonostante la teoria di *Huygens* appariva del tutto soddisfacente rimanevano anche in questo caso molti interrogativi privi di risposta come ad esempio non si spiegava perché i raggi luminosi non aggirino gli ostacoli, come fanno le onde sonore; ed inoltre non si capiva il motivo per cui la luce poteva propagarsi nel vuoto essendo fatta di onde. Nel 1801 *Thomas Young*, medico e fisico inglese (1773-1829), studiando il *fenomeno della interferenza*⁵ ebbe modo di calcolare la lunghezza delle onde luminose.

² Cartesio formulò la legge della rifrazione *legge del seno* che dice: *quando la luce passa da un mezzo A in un mezzo B il seno dell'angolo d'incidenza sta al seno dell'angolo di rifrazione in un rapporto costante*. Questo rapporto rappresenta l'indice di rifrazione relativo ai due mezzi e viene indicata con la lettera *n*.

³ Con tale teoria non era possibile spiegare per quale motivo due fasci di luce possono incrociarsi senza che le particelle costituenti entrino in collisione, ed ancora le differenti caratteristiche di rifrazione della luce di vario colore.

⁴ Le lunghezze d'onda sono maggiori per il rosso (780 nm) e diminuiscono man mano che ci si avvicina al violetto (300 nm). la luce bianca comprende luci di tutti i colori o meglio onde di tutte le lunghezze d'onda comprese fra quella del rosso e del violetto.

⁵ Tale fenomeno consiste nel far collimare un fascio di luce, emesso da una sorgente, con una fessura e successivamente viene fatto passare attraverso altre due fessure parallele. Su uno schermo trasparente posto dopo le due fessure si osserva una serie di frange scure e chiare. Infatti, secondo la teoria ondulatoria un'onda piana (linee

Da tale esperimento scaturì che tali lunghezze d'onda erano estremamente piccole, per cui incapaci di aggirare un ostacolo così come avveniva nelle onde sonore.

Il fatto che le lunghezze d'onda abbiano valori così piccoli, le cui dimensioni sono enormemente minori di quelle degli oggetti, spiega il motivo per cui le onde luminose viaggiano in linea retta e proiettano ombre nette. In seguito le lunghezze d'onda della luce vennero espresse in un'unità di misura suggerita da *Anders Jonas Angstrom*, fisico ed astronomo svedese (1814-1872): 1 *Angstrom* (A) corrisponde ad un centomillesimo di centimetro (10^{-8} cm).

Attualmente si preferisce usare dei prefissi per ogni ordine di grandezza e *nano* è il prefisso usato per indicare la miliardesima parte dell'unità. Un *nanometro* (abbreviazione *nm*) è pari a 10^{-9} metri ed equivale a 10 A. Grazie agli ricerche condotte da *Huygens*, *Young* e *Angstrom* nel XIX secolo la teoria ondulatoria della luce fece progressi straordinari, debellando definitivamente la teoria corpuscolare di Newton.

La conclusione di questo grande sviluppo dello studio delle onde si ebbe con *James Clerk Maxwell* (1831-1879) con la sua *teoria elettromagnetica della luce*. Egli elaborò un insieme di quattro equazioni che complessivamente descrivevano tutti i fenomeni riguardanti l'elettricità ed il magnetismo.

Tali equazioni pubblicate nel 1864 non solo descrivevano le interrelazioni tra i fenomeni elettrici e magnetici, ma mostravano anche che essi non potevano essere mai separati, giungendo alla conclusione che tali radiazioni presentano le proprietà di un'onda. In breve *Maxwell* riuscì a calcolare la velocità con cui un'onda elettromagnetica avrebbe potuto propagarsi, velocità che risultava essere precisa a quella della luce⁶.

La luce è quindi una radiazione elettromagnetica e, come essa, vi sono altre radiazioni con lunghezze d'onda molto maggiori e molto minori di quelle della luce *visibile* (che vanno dai raggi cosmici alle microonde).

In base a quanto precedentemente descritto le due teorie corpuscolare ed ondulatoria si relazionano per descrivere la luce come oggi la si intende e cioè come un flusso di particelle, i *fotoni*, i cui fenomeni possono essere spiegati dall'elettrodinamica quantistica (*QED: Quantum Electro - Dynamics*).

Il Fotone è il quanto elementare di energia della luce; si misura in *Joule* ed è dato dalla relazione

$$E = h\nu \quad [36]$$

ove *h* è la costante di *Planck* (J/s) e *v* la frequenza (Hz).

parallele) che incontra una fenditura genera un sistema di onde specifiche (linee curve) che si propagano oltre la fenditura. Se le fenditure sono due, le onde si sovrappongono sommandosi o sottraendosi, cresta con cresta o cresta con cavo, ottenendo così le frange chiare e scure.

⁶ Un astronomo danese *Roemer* (1644-1719) intento ad annotare le eclissi di quattro luminosi satelliti ruotanti in orbita attorno al pianeta Giove si accorse che queste succedevano ad intervalli regolari in rapporto alle variabili distanze i Giove e della Terra. *Roemer* concluse che l'irregolarità delle eclissi era in rapporto alla diversità del tempo impiegato dalla luce per coprire il percorso tra i satelliti di Giove e la Terra e che il tempo aumentava con l'aumentare della distanza perché la luce viaggiava con una certa velocità. In base a questi dati ed a una valutazione approssimativa della distanza del sole, il danese stabilì che la velocità della luce era di 308.000 km/s. Dato questo molto vicino a quello ottenuto con le moderne conoscenze sul diametro dell'orbita terrestre la quale velocità è stata corretta a circa 300.000 km/s, in presenza di vuoto assoluto.

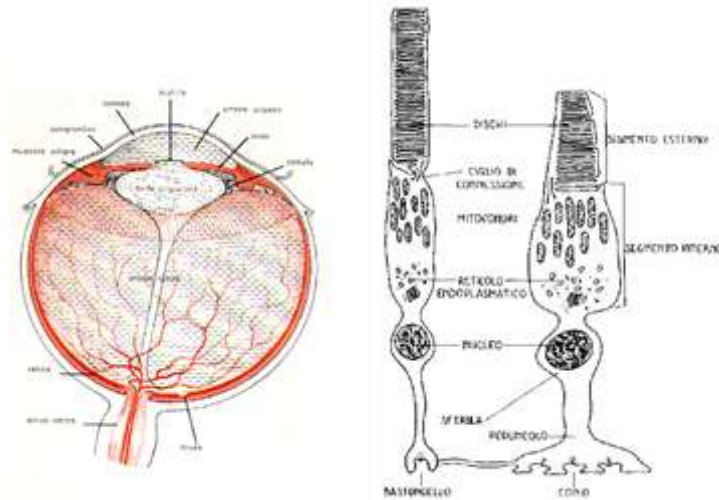


Figura 27: Anatomia dell'occhio umano e dei recettori retinici: coni e bastoncelli

Le radiazioni luminose presentano quindi diverse lunghezze d'onda; quelle a breve lunghezza d'onda sono caratterizzate da un numero di onde maggiori rispetto alle radiazioni luminose di lunghezza d'onda più elevata. La luce naturale, al pari di quella generata con mezzi artificiali, si presenta quindi come formata da differenti radiazioni di diversa lunghezza d'onda.

2.1. FISILOGIA DELL'OCCHIO

L'occhio umano, strumento sensoriale estremamente specializzato per la visione, dotato di una perfetta organizzazione anatomica e funzionale, consente per mezzo di una lente (*lente cristallina*) di proiettare l'immagine rimpicciolita e capovolta degli oggetti su dei *fotorecettori* situati al suo interno, capaci di trasformare l'energia luminosa ricevuta in una serie di impulsi elettrici intelligibili per il cervello.

L'occhio è una macchina perfetta dotata di sei muscoli estrinseci, o esterni al globo oculare, che lo trattengono nella cavità orbitaria, lo fanno ruotare nella direzione degli oggetti in movimento e lo dirigono sugli oggetti fermi.

Gli occhi partecipano alla visione in perfetto sinergismo cosicché normalmente si rivolgono su uno stesso oggetto, sul quale convergono al fine di comprenderne distanza e dimensioni; in altre parole gli occhi permettono di vedere in tre dimensioni.

Oltre ai muscoli estrinseci esistono altri muscoli denominati intrinseci, o interni. Uno di essi è l'*iride*, un muscolo anulare che forma la *pupilla* attraverso cui passa la luce proveniente dall'esterno per giungere sulla *lente cristallina*. L'iride con il suo movimento (contrazione muscolare) permette di restringere il foro pupillare, sia per la visione degli oggetti prossimi che per adattare l'occhio ad eccessiva intensità luminosa.

Un altro muscolo intrinseco, denominato *ciliare*, controlla inoltre la messa a fuoco della lente e permette quindi una corretta visione degli oggetti. L'occhio può essere distinto anatomicamente e funzionalmente in una parte diottrica o anteriore ed in una posteriore o sensoriale. La parte diottrica comprende tutte quelle strutture che hanno la funzione di far sì che i raggi provenienti da qualsiasi oggetto fissato vadano a fuoco esattamente sulla retina che ne rappresenta la parte sensoriale.

Per consentire la visione è indispensabile che i mezzi diottrici posseggano determinate caratteristiche quali *potere rifrattivo* ed una perfetta *trasparenza* alla luce. Le strutture rifrattive sono rappresentate da: *cornea, umore acqueo, cristallino e corpo vitreo*.

La cornea che costituisce l'1/6 anteriore della tonaca fibrosa riveste l'occhio detto anche *sclera* e rappresenta la lente principale del sistema diottrico oculare avendo un potere di circa 42 diottrie⁷. Dietro la cornea è situato l'*iride* al cui centro vi è la *pupilla*. L'iride presenta un pigmento colorato che ha la funzione con la sua opacità di limitare l'apertura delle lenti⁸.

Il diaframma irideo è posto al davanti del cristallino, ed è delimitato da due anelli, uno periferico che lo collega al corpo ciliare e che delimita la base dell'angolo *irido-corneale*, e uno centrale che circonda il forame pupillare; il muscolo costrittore della pupilla è innervato dal III° nervo cranico, il muscolo dilatatore dal sistema nervoso simpatico.

L'iride, come in precedenza accennato, ha la proprietà di dilatarsi e di contrarsi, per mezzo del muscolo ciliare, fungendo da diaframma per i raggi luminosi. È errato pensare che le variazioni di grandezza della pupilla, che rappresenta il foro centrale dell'iride, abbiano esclusivamente lo scopo di garantire il funzionamento dell'occhio a differenti intensità di luce.

Infatti il foro pupillare può modificarsi in un rapporto di 16:1, mentre l'occhio riesce a funzionare entro un arco di intensità luminose che stanno in un rapporto di 100.000:1

La pupilla invece restringendosi limita esclusivamente l'ingresso dei raggi luminosi in corrispondenza della parte centrale della lente, che è la più funzionale dal punto di vista ottico, mentre si apre completamente in quei casi in cui si richiede la massima sensibilità. La pupilla⁹ si restringe anche nella visione prossima aumentando così la profondità del campo visivo.

La lente dell'occhio umano, il *cristallino*, ha grande importanza nel regolare l'accomodazione alla distanza modificando, in virtù della notevole elasticità posseduta, il raggio di curvatura delle proprie superfici, mediante un notevole movimento muscolare (muscolo ciliare e *zonula*)¹⁰.

Per tale motivo il cristallino può essere considerato come una lente positiva di potere variabile (circa 13D) il cui raggio di curvatura si riduce infatti per la visione prossima aumentando così il potere della lente che accentua la convergenza dei raggi luminosi, già operata dalla cornea.

Lo spazio compreso tra *cornea* ed *iride* è detto *camera anteriore* al cui interno circola l'*umore acqueo*, mentre lo spazio compreso tra il *cristallino* e la *retina* è occupato dal *corpo vitreo*. La parte *neurosensoriale* è rappresentata dalla retina, composta da elementi fotosensibili e da neuroni, il cui nome deriva dal fitto intreccio dei suoi vasi sanguigni che ne conferiscono un aspetto simile a quello di una rete.

La retina dell'uomo è una retina inversa cioè strutturata in maniera tale che le estremità dei fotorecettori non siano rivolte verso la sorgente dello stimolo e quindi verso il diottrio, bensì all'opposto.

A livello retinico si compie la conversione degli stimoli fotonici in impulsi nervosi che, raggiungendo i centri cerebrali evocano la sensazione visiva. Tale percezione è dovuta a due tipi di *fotorecettori* (particolari cellule nervose), i *coni* ed i *bastoncelli*, aventi funzioni diversificate e diversa distribuzione topografica.

⁷ La diottria è una misura ottica definita come il reciproco della distanza focale (espressa in metri) di un sistema ottico.

⁸ Gli occhi privi di pigmento (albinismo) non possono funzionare perfettamente in presenza di luce intensa.

⁹ La pupilla non è una struttura anatomica ma un foro circoscritto dall'iride, che consente alla luce di giungere prima sulla lente, e successivamente sulla retina per formare l'immagine. La pupilla ci appare di colore nero e non ci è possibile vedere, attraverso di essa, nell'interno dell'occhio di un'altra persona poiché il nostro occhio viene sempre a trovarsi sul cammino della luce destinata ad illuminare la parte della retina che dovremmo vedere.

¹⁰ Il cristallino è mantenuto nella sua posizione, ortogonale all'asse ottico, da un sistema di sospensione costituito da numerose e sottili fibre (*fibre zonulari*) disposte a raggiera, che si inseriscono ad un estremo in corrispondenza dell'equatore della lente e dall'altro estremo sui processi ciliari.

In corrispondenza della periferia retinica si trovano in prevalenza i *bastoncelli*; a livello della *fovea* centrale (detta anche macula) sono presenti esclusivamente i *coni*.

Questi ultimi sono eccitati da radiazioni luminose intense, hanno cioè una soglia di eccitazione elevata e presiedono alla *visione diurna* o *visione fotopica* e lavorando alla piena luce diurna e producono la visione del colore. I bastoncelli sono invece eccitati da radiazioni luminose meno intense e pertanto forniscono la base per la *visione crepuscolare* o *scotopica*. Tale diversità funzionale è dovuta anche al diverso rapporto che i due tipi di recettori hanno con le fibre del nervo ottico: i coni sono in rapporto di 1:1; quindi ogni cono eccitato attiva una singola fibra nervosa; i bastoncelli hanno rapporti plurimi così che su una stessa fibra nervosa possono convergere impulsi provenienti da numerosi bastoncelli. Da quanto detto se ne deduce come la sensazione visiva più dettagliata è quella che ha origine nei coni e pertanto la fovea centrale è la sede della visione distinta e diretta.

Le zone periferiche della retina sono viceversa popolate dai bastoncelli ed idonei quindi alla visione notturna. Per concludere l'area retinica che corrisponde alla fuoriuscita dal bulbo delle fibre nervose che costituiscono il nervo ottico prende il nome di papilla ottica, una zona priva di fotorecettori e quindi insensibile allo stimolo luminoso

2.2. PRINCIPI DELLA VISIONE

La visione è garantita dall'eccitazione della retina che deve quindi considerarsi come un rilevatore di energia radiante compresa tra i 380 e i 780 *nm*; la gamma del visibile.

L'eccitazione dei recettori presenti nella retina è inizialmente un fenomeno *fotochimico* la quale si verifica quando il fotone viene captato da una molecola del pigmento *fotolabile*; successivamente tale stimolo viene trasformato in impulso elettrico trasmesso successivamente al cervello. La reazione fotochimica avviene in corrispondenza dei fotorecettori della retina sono: i *coni* ed i *bastoncelli*, i quali contengono nel loro articolo esterno due diversi tipi di pigmento visivo, la *rodopsina* e la *jodopsina*.

Lo stimolo luminoso porta quindi, attraverso fenomeni chimici (*fotoisomerizzazione*), alla scomposizione dei suddetti pigmenti, trasformandoli in *lumirodopsina*, in modo da consentire l'amplificazione e la partenza del segnale verso i centri superiori; subito dopo, sempre per mezzo di meccanismi fotochimici, viene rigenerata la rodopsina, attraverso la riconversione del *trans-retinale* in *cis-retinale*.

Questi fenomeni fotochimici avvengono in 1/25 milionesimo di secondo, determinando una variazione di potenziale sinaptico¹¹ in 1/500 *ms*, consentendo quindi la trasmissione ininterrotta di segnali da parte della retina, anche se esposta a stimoli intensi e continuativi.

Attraverso le vie ottiche i segnali provenienti dalla retina raggiungono la corteccia visiva occipitale, dove vengono elaborati e trasformati in immagini. I *fotopigmenti* sono così distribuiti nell'occhio: la *rodopsina* è contenuta nei *bastoncelli*, il *clorolabile*, il *cianolabile*, l'*eritrolabile* sono contenuti in tre diverse varietà di coni (una per ciascun colore fondamentale: *rosso*, *verde* e *blu*¹²).

¹¹ La *sinapsi* è una specie di membrana fra il *neurone* e l'*assone* (cioè il collegamento fra neuroni). La sinapsi controlla la concentrazione ionica di Na^+ e K^- mediante variazione del potere di permeabilità di questi ioni. Quando la permeabilità allo ione sodio diviene massima allora si ha una immissione di cariche positive che producono un innalzamento del segnale da circa -70 mV a -30 mV . La transazione del segnale avviene in circa 0.5 ms.

¹² Vedremo come questi tre colori (denominati Red, Green, Blue, con la sigla *RGB*) sono anche assunti come fondamentali per la *Colorimetria*.

Riassumendo, la visione può essere *scotopica*, dovuta ai *bastoncelli* (condizione di illuminazione notturna), *fotopica*, dovuta ai conici (condizione di illuminazione diurna), ed *mesopica* (condizione di illuminazione intermedia) come appare dal grafico seguente.

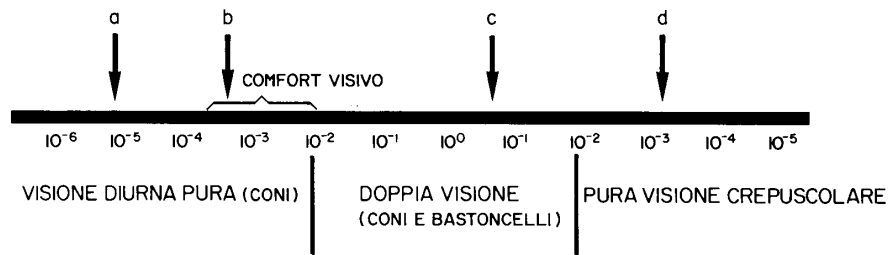


Figura 28: Illuminamento in lux di una superficie per diverse situazioni

Se la visione notturna (caratterizzata da un valore di illuminamento inferiore a $0,1 \text{ lux}^{13}$) è privilegiata nei confronti di quella diurna, per la capacità di percepire sorgenti luminose estremamente deboli (l'occhio è capace di percepire, in visione scotopica, la fiamma di una candela ad una distanza superiore a 10 km), tale incremento di sensibilità della retina resta decisamente molto labile potendo essere facilmente abolito da un improvviso abbagliamento.

A causa del mancato funzionamento dei *coni* la visione *scotopica* risulta decisamente limitata rispetto a quella *fotopica*. Con luce crepuscolare infatti l'acuità visiva si riduce a un valore uguale o inferiore a 1/10 e si verifica inoltre la mancanza di percezione dei colori con conseguente spostamento della curva di sensibilità retinica in funzione della lunghezza d'onda, in direzione delle lunghezze d'onda più corte. Per tale motivo all'alba ed al tramonto il colore blu appare più intenso di quello rosso più visibile di giorno¹⁴.

Appare evidente come in visione *fotopica* (dovuta ai *coni*) la sensibilità dell'occhio è massima alla radiazione della zona centrale dello spettro luminoso (in corrispondenza della colorazione giallo-verde, intorno ai 550 nm) e decresce man mano che ci si sposta verso la periferia dello spettro come meglio evidenziato dalla curva del fattore di visibilità relativa.

In visione *scotopica* (dovuta ai *bastoncelli*) viceversa la curva di sensibilità dell'occhio è spostata verso le lunghezze d'onda inferiore in corrispondenza della colorazione blu-verde. La condizione di illuminazione intermedia definisce la visione *mesopica* in cui il senso del colore è ancora ridotto e gli oggetti si distinguono per la diversa luminosità. Tale spostamento in termini di lunghezza d'onda viene definito **effetto Purkinje** e la lunghezza d'onda a cui corrisponde la massima visibilità è di circa 510 nm. Una simile risposta dell'occhio sembra essere dovuta al selettivo assorbimento dei mezzi oculari antistanti la retina caratterizzati ognuno da un proprio coefficiente di trasmissione τ_λ , dipende dalla lunghezza d'onda considerata ed infatti la percentuale di flusso monocromatico che incide sulla retina, in relazione al flusso pupillare ϕ , può essere espresso dalla relazione seguente

$$\Phi = \phi \tau_\lambda \quad [37]$$

Riassumendo si ottiene quanto esposto nella seguente tabella:

¹³ Si ricorda che il *lux* è l'unità di misura dell'illuminamento e cioè è il rapporto fra flusso luminoso (espresso in *lumen*) e la superficie di illuminazione (in m^2).

¹⁴ I *coni* funzionano in condizioni di luminosità elevata, e sono molto sensibili alle lunghezze d'onda giallo e verde; i *bastoncelli* funzionano a bassi livelli di luminosità e sono altamente sensibili alle lunghezze d'onda blu-verde.

Tipi di visione	Livelli di illuminamento (lux)	Luminanza¹⁵ (cd/m²)
Fotopica	10÷15	10 ⁶ ÷ 3
Mesopica	10÷5.10 ⁻³	<u>3 ÷ 10⁻²</u>
Scotopica	5x10 ⁻³ ÷ 5x10 ⁻⁶	10 ⁵ ÷ 10

Tabella 1: Tipologia della visione

Per stabilire la visibilità sufficiente sul piano di lavoro si fa riferimento al concetto di *livello di visibilità* che comprende in un unico dato l'illuminazione dell'ambiente, il contrasto fra gli oggetti ed il tempo di percezione degli stessi. La valutazione di questo livello è quindi fondamentale per definire la prontezza della sensazione visiva.

Al livello di visibilità zero si fa corrispondere la *soglia della visibilità Es*, che coincide con la percezione visiva di un oggetto dopo un tempo molto lungo. I valori del livello della visibilità successivi al valore di soglia possono essere espressi da una curva detta appunto *Curva della visibilità* rappresentata in Figura 29.

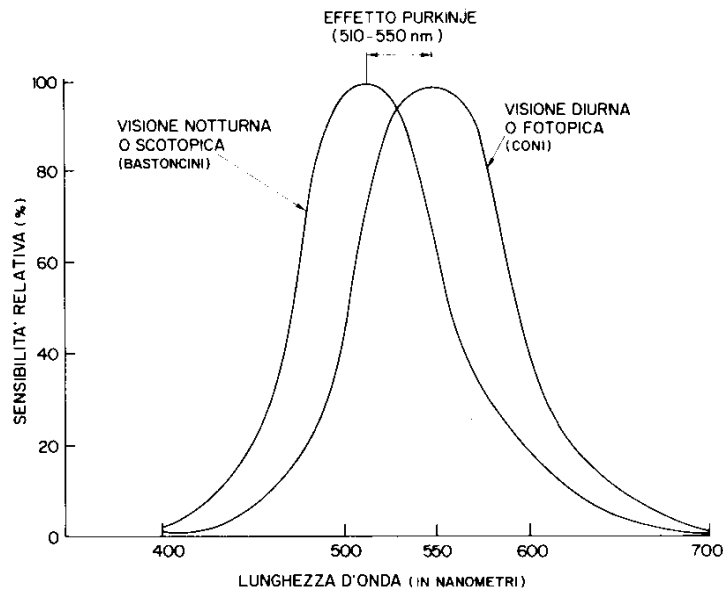


Figura 29: Sensibilità relativa dell'occhio alle varie lunghezze d'onda

Su di essa sono riportati i livelli medi della visibilità di un oggetto sottoposto ad una illuminazione E in funzione dell'illuminamento relativo $E_r = E / E_s$

La soglia può quindi essere definita come la minima quantità di energia che permette la percezione la quale dipende da vari fattori quali:

- la variabilità dei fotoni di stimolazione;
- la soggettività; le diverse condizioni di adattamento;
- il prestimolo e la variazione delle condizioni sperimentali.

Da quanto in precedenza descritto ne consegue la difficoltà pratica di determinare la soglia di visibilità in modo assoluto. Secondo esperimenti condotti nel 1942 da *Hecht, Schlaer e Pinene* venne definito l'occhio come il più sensibile strumento di misura di energia luminosa.

¹⁵ La *Luminanza* è data dal rapporto fra l'intensità luminosa (espressa in *candele*) e la superficie apparente di emissione e si misura in *Nit*.

Infatti, secondo questi sperimentatori basta che in condizioni di massima sensibilità (per occhi adattati al buio per un tempo non inferiore ad un'ora), un bastoncino assorba un fotone di 5000 \AA di lunghezza d'onda per determinare la sua stimolazione e la conseguente sensazione luminosa.

Per successive stimolazioni è necessario che almeno 10-15 recettori assorbano un fotone ciascuno perché il soggetto percepisca una sensazione visibile. È evidente che per determinare la percezione di soglia è necessaria un'energia incidente nell'occhio sensibilmente superiore. Difatti è stato valutato che, a seguito dell'assorbimento dei diversi mezzi ottici, della riflessione corneale e dell'assorbimento da parte delle fibre nervose e dei vasi sanguigni che antistanno ai recettori, almeno 100 fotoni devono incidere sull'occhio. Questa energia corrisponde a circa 10^{-6} mL^{16} . È stato inoltre determinato che per un occhio adattato alla luce diurna è necessaria un'intensità pari ad 1 mL , cioè un'intensità un milione di volte più grande della precedente.

La visione è l'effetto sensoriale generato dalla luce sull'organo visivo. Essa è frutto di una interpretazione cerebrale (zona *occipitale* del cervello) e pone alcuni problemi di ordine psicofisico.

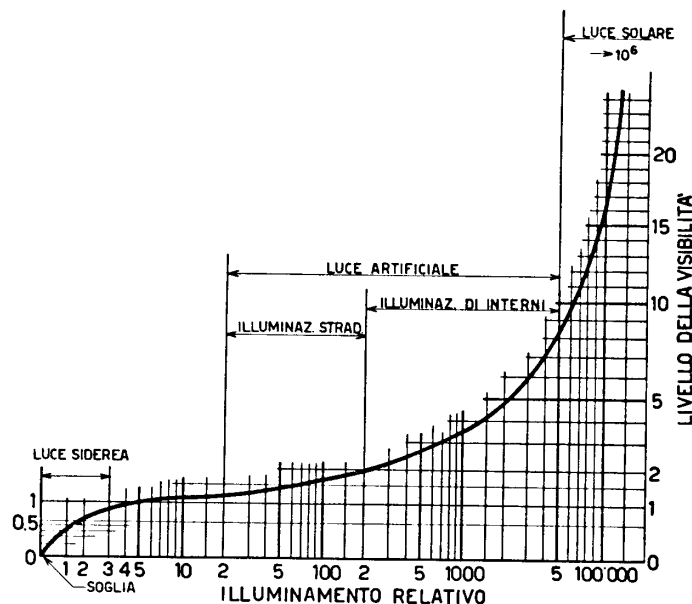


Figura 30: Livello della visibilità al variare dell'illuminamento relativo

I parametri principali che caratterizzano la visione sono i seguenti:

- **Adattamento visivo**
- **Accomodamento e Contrasto**
- **Brillanza**
- **Abbagliamento**
- **Acuità Visiva**
- **Senso Morfologico**

Alcuni di essi possono essere definiti analiticamente e misurati opportunamente, altri costituiscono parametri accessori e derivano direttamente dall'interpretazione psicofisica della visione.

¹⁶ E. Giannazzo, Nozioni di fisica e biofisica della visione, Piccin, Padova, 1989.

2.2.1. L'ADATTAMENTO VISIVO

L'occhio è in grado di riconoscere gli oggetti in condizioni di illuminazione che coprono un campo estremamente vario. La Luminanza dello stimolo che costituisce la soglia luminosa assoluta è di circa 10^{-6} Nit (quella del pieno sole è di circa 10^9 Nit). La capacità che ha l'occhio di regolare la propria sensibilità al variare delle condizioni ambientali è detta *adattamento*.

E' quindi un processo mediante il quale le caratteristiche ottiche del sistema visivo sono modificate in relazione alla luminanza del campo visivo o alla distribuzione spettrale dello stimolo luminoso.

L'adattamento è assicurato da tre tipi di meccanismi:

1. *Modificazione del diametro pupillare*¹⁷: *miosi ed midriasi*;
2. *Adattamento retinico*¹⁸: la retina reagisce a livello biochimico all'aumento ed alla diminuzione dell'intensità luminosa mediante generazione ed esaurimento (*sbiancamento*) della rodopsina;
3. *Meccanismo nervoso*¹⁹; quando l'occhio passa dal buio alla luce i mutamenti biochimici sono sopraffatti dai più veloci adattamenti nervosi, così che l'adattamento alla luce è soprattutto un fenomeno nervoso.

Dopo essere rimasti all'oscurità per un certo tempo i nostri occhi diventano più sensibili ed un oggetto illuminato ci sembrerà più splendente che in altre circostanze. Questo fenomeno è l'espressione del processo di *adattamento all'oscurità* che si manifesta fin dai primi minuti quando si rimane al buio.

Analizzando l'esempio in precedenza esposto è facile intuire come la velocità di adattamento è diversa per i *coni* e per i *bastoncelli*: i primi infatti si adattano completamente entro *sette minuti*, mentre l'adattamento dei secondi si prolunga per un'ora e più, come dimostra la figura seguente, che riporta le rispettive curve d'adattamento dei fotorecettori come se ci fossero due retine indipendenti in ogni occhio.

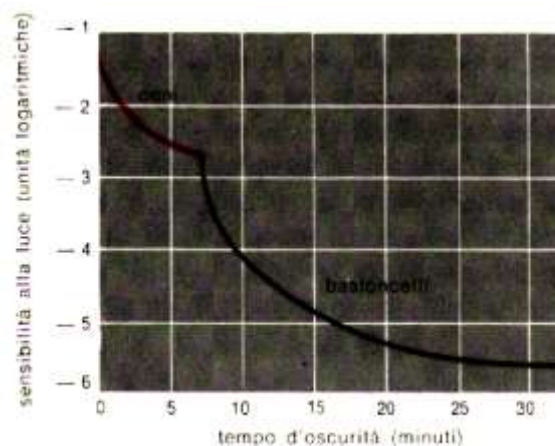


Figura 31: Curva di adattamento visivo dei coni e dei bastoncelli

¹⁷ *Miosi* rappresenta il restringimento della pupilla (condizione di intensa illuminazione), *midriasi* indica la dilatazione della pupilla in condizione di ridotta luminosità.

¹⁸ L'adattamento retinico avviene a livello biochimico mediante una rigenerazione della rodopsina (adattamento al buio) e ad un suo esaurimento alla luce (adattamento alla luce in circa 50 s).

¹⁹ Quando si passa da un luogo a bassa intensità luminosa ad un altro caratterizzato da valori di illuminazione elevati i mutamenti biochimici (50 s circa) sono preceduti dai più veloci adattamenti nervosi. Quindi l'adattamento alla luce è soprattutto un fenomeno nervoso.

La spiegazione precisa di tale meccanismo è stata data dal fisiologo inglese *W.A.H. Rushton*, il quale ha dimostrato, mediante opportuni esperimenti sugli occhi delle rane e dell'uomo²⁰, uno stretto rapporto tra le modificazioni fotochimiche della rodopsina e le variazioni di sensibilità dei bastoncelli.

Da tali studi è apparso che la luminosità della visione è legata alla quantità di *fotopigmento* presente nei fotorecettori e sottoposta allo sbiancamento.

Rushton dimostrò la modificazione cromatica del fotopigmento durante il processo di adattamento ed ha anche stabilito che il rapporto tra l'intensità energetica dello stimolo luminoso e la quantità di fotopigmento che diventa bianco, è di natura logaritmica.

2.2.2. L'ACCOMODAMENTO

Per accomodazione si intende la modificazione del potere diottrico del cristallino, regolazione focale dell'occhio, al fine di mettere a fuoco sulla retina l'immagine di un oggetto situato ad una data distanza dall'occhio.

2.2.3. IL CONTRASTO

Si definisce *contrasto* differenza di luminosità tra due oggetti o superfici vicine o ancora la valutazione soggettiva della differenza di spettro di due parti di un campo visivo viste simultaneamente o successivamente. Esiste inoltre una soglia di contrasto definita come la più piccola differenza di luminosità che permette il riconoscimento di un oggetto. Ma il contrasto può anche definirsi come differenza relativa delle luminanze fra due parti di un campo visivo (*Luminance contrast*).

Da quanto in precedenza esposto appare evidente come il contrasto sia strettamente condizionato dal livello di illuminamento del compito visivo. Infatti *uno²¹ dei fattori che condizionano la sensazione luminosa è rappresentato dall'intensità della luce che colpisce le zone circostanti della retina*

Un determinato oggetto risulta più luminoso su uno sfondo scuro, e un particolare colore acquista una tonalità più intensa se circondato dal colore complementare. (questo fatto deve essere messo senza dubbio in rapporto all'esistenza di connessioni crociate tra i recettori).

L'effetto di potenziamento della sensazione luminosa cromatica operato dal contrasto rientra probabilmente nel quadro generale dell'importanza dei contorni per la percezione visiva.

Sembra infatti che siano soprattutto i contorni che vengono segnalati con particolare evidenza al cervello, mentre, per le zone che presentano una illuminazione uniforme, le informazioni sono molto più generiche.

Il sistema visivo, completando il quadro definito dai contorni, risparmia le energie del suo sistema periferico, sia pure a costo di un maggior lavoro dei centri nervosi.

Sebbene i fenomeni di contrasto e di rinforzo che si manifestano a livello dei contorni siano fondamentalmente determinati dall'attività retinica, si deve ritenere che anche i centri nervosi

²⁰ La tecnica da lui adottata consiste essenzialmente nel proiettare un piccolo fascio di luce sull'occhio e nel misurare successivamente, per mezzo di una fotocellula molto sensibile, la quantità di luce riflessa dall'occhio, potendo dimostrare la modificazione cromatica del fotopigmento durante l'adattamento dell'occhio.

²¹ R. L. Gregory: *Occhio e Cervello: la psicologia della vista*, Il Saggiatore, Milano 1966.

abbiano una certa influenza, come risulta dalla figura seguente, che ci sottopone un caso evidente di contrasto.

Il cerchio grigio appare infatti più chiaro sullo sfondo nero che sullo sfondo bianco ed ancor più marcato risulta questo effetto quando, lungo il diametro trasverso del cerchio, si dispone un filo bianco che si continua sul fondo dividendolo in due metà.

Il contrasto è dunque più evidente se la figura viene interpretata come due metà distinte anziché come una figura unica e questo fenomeno deve essere verosimilmente provocato dall'intervento dei centri nervosi cerebrali.

Un'idea della complessità del sistema che controlla la sensazione luminosa può essere ricavata dal "*paradosso di Fechner*". Se l'occhio umano viene stimolato da una sorgente di modesta intensità, esso avrà una certa sensazione luminosa e la pupilla si restringerà; aggiungendo un'altra sorgente di intensità ancora più debole, a una certa distanza dalla prima in modo che vada a stimolare una differente regione della retina, la pupilla non si restringe ulteriormente, come ci si potrebbe aspettare, ma piuttosto si dilata con un'apertura che può essere messa in rapporto ad una intensità di luce intermedia tra quella della prima e quella della seconda sorgente di luce, adattandosi evidentemente, non alla illuminazione totale, ma a quella media, in virtù di un meccanismo retinico di cui s'ignora il funzionamento.

Se si chiude un occhio la sensazione luminosa non varia, cioè praticamente non v'è alcuna differenza sia che uno solo, o tutti e due gli occhi contemporaneamente, ricevano lo stimolo.

Ma le cose vanno diversamente nel caso delle piccole luci di debole intensità viste in un ambiente oscuro: in queste condizioni la sensazione luminosa risultare molto più evidente se si guarda con entrambi gli occhi anziché con un occhio solo. Anche le ragioni di questo fenomeno sono ancora sconosciute. La sensazione luminosa è inoltre condizionata dal colore.

Se sui nostri occhi arrivano contemporaneamente delle luci di colore diverso, ma di uguale intensità, la zona intermedia dello spettro risultare più brillante rispetto a quelle periferiche, come dimostra dalla curva di luminosità dello spettro.

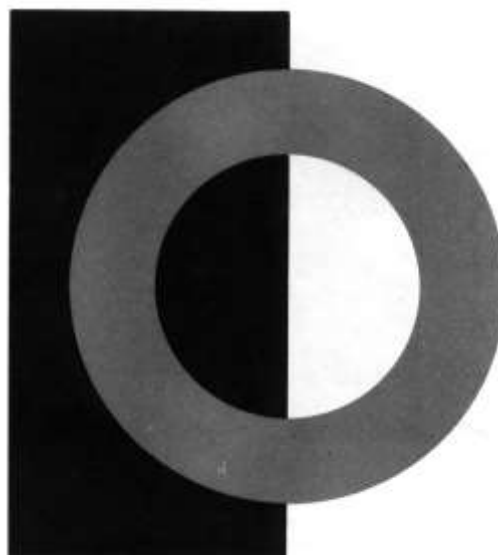


Figura 32: Contrasto luminoso

Questo fatto ha una certa importanza pratica perché un segnale di pericolo, per risultare chiaramente visibile, dovrebbe essere di un colore appartenente alla zona intermedia dello spettro cui l'occhio è particolarmente sensibile.

Mediante le *Griglie di Hermann* è possibile comprendere i fenomeni legati al contrasto nelle quali delle strisce bianche perpendicolari tra loro poste in uno sfondo nero in corrispondenza degli incroci determinano una depressione luminosa per cui si crea la sensazione di una macchietta grigia.

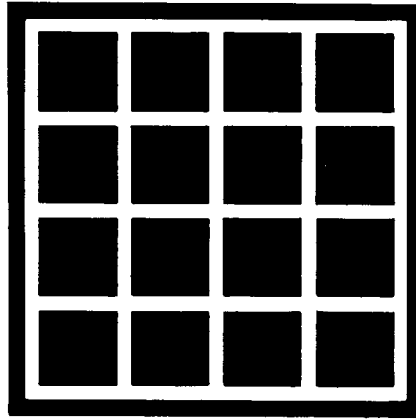


Figura 33: La Griglia di Hermann

La valutazione dell'indice di contrasto è basata sulla differenza relativa delle luminanze fra due parti di un campo visivo e valutare quindi la situazione più confortevole:

- **in senso soggettivo:** valutazione della differenza dell'aspetto di due zone del campo di visivo viste simultaneamente o successivamente;
- **in senso oggettivo:** valore della grandezza definita per stabilire una correlazione con la valutazione soggettiva del contrasto, generalmente espressa mediante formule basate sulla luminanza dominante dello sfondo (L_1), ad esempio una pagina bianca, e dell'oggetto (L_2), ad esempio i caratteri sulla pagina, visti simultaneamente:

$$C = \frac{L_2 - L_1}{L_1} \quad [38]$$

Quando i valori di luminanza delle zone considerate sono diversi ma di ordine comparabile, si può definire un valore medio espresso dalla seguente relazione:

$$C = \frac{L_2 - L_1}{0,5(L_2 + L_1)} \quad [39]$$

Da quanto in precedenza descritto si evince come grandi riduzioni di luminosità possono causare una forte riduzione nella costanza del contrasto.

Appare infatti evidente come indici di contrasto tendenti a zero, la visione tende a non essere nitida; viceversa elevati valori dello stesso ne migliorano le condizioni di visibilità. L'indice di contrasto viene quindi penalizzato dall'abbagliamento, dai riflessi disturbanti, dalla errata dislocazione della fonte luminosa e dai bassi livelli di illuminamento

Ritornando alla *Griglia di Hermann*, a livelli di illuminazione molto bassi, i quadratini posti nella parte inferiore della griglia appaiono più chiari. Questo spiega il motivo per cui una superficie bianca appare più grande di una scura.

2.2.4. LA BRILLANZA

Attributo della sensazione visiva secondo il quale un'area appare emettere, trasmettere e

riflettere radiazioni visibili e rappresenta il corrispondente soggettivo della luminanza.

Nelle condizioni di tutti i giorni, in cui si verificano bruschi sbalzi di illuminazione, l'adattamento alla luce è sufficiente veloce da assicurare la costanza della percezione: un muro bianco in un giorno d'estate o in uno d'inverno, presenta sempre la stessa luminosità, benché la quantità di illuminazione sia molto differente.

Interviene a questo punto la luminosità di una sorgente o sua brillantezza soggettiva, che è funzione sia della luminanza della sorgente che dello stato di adattamento della retina di chi osserva.

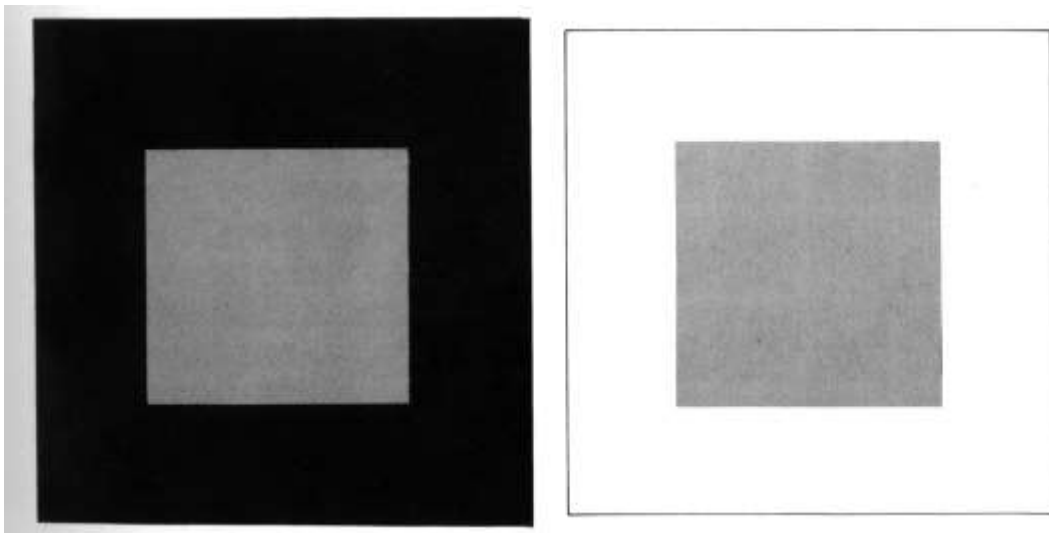


Figura 34: Esempi di brillantezza

La luminosità di uno stimolo dipende anche dagli altri oggetti che gli sono vicini e dallo sfondo sul quale sono posti.

In genere un oggetto che riflette una minore percentuale di luce rispetto ad altri ci appare scuro, grigio o addirittura nero, mentre può apparirci bianco se gli altri elementi dello spazio riflettono ancora meno luce di esso.

Attraverso l'induzione di luminosità e di contrasto si possono creare delle *sensazioni di bordo* la quale può essere considerata come l'aspetto psicofisico più importante per il riconoscimento degli oggetti. Tale fenomeno è visibile chiaramente con le *bande di Mach*. Tale esperimento consiste nell'accostare tre bande contigue di cui una è più luminosa dell'altra.

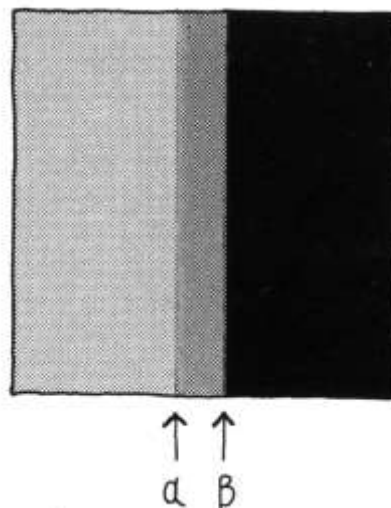


Figura 35: Le Bande di Mach

2.2.5. L'ABBAGLIAMENTO VISIVO

Si definisce abbagliamento la condizione che genera fastidio e riduce la capacità di distinguere gli oggetti, ed ancora quella condizione che provoca ambedue gli effetti, in conseguenza di una distribuzione o di un livello inadeguati della luminanza o di contrasti eccessivi nel campo visivo²².

Si usa quindi sintetizzare nel termine abbagliamento il complesso dei fenomeni di discomfort aventi come origine una cattiva distribuzione delle luminanze nel campo visivo.

Nella sua forma più leggera si riduce ad attirare l'attenzione dell'osservatore verso la zona di maggiore luminanza; in un grado appena più intenso può produrre una sensazione più o meno forte di disagio che, prolungata nel tempo, provoca un fenomeno di fatica; nelle forme più gravi determina un abbassamento generale anche se temporaneo della visibilità.

Holladay ha proposto un modello per esprimere l'abbagliamento che determina un abbassamento temporaneo e transitorio della visibilità, denominato *disability glare*²³ o *abbagliamento simultaneo o perturbante*, il quale si manifesta con effetto simile a quello derivante dalla interposizione tra il campo visivo e l'osservatore di un velo luminoso - *velino glare* - dovuto in parte alla diffusione della luce nell'occhio e in parte a situazioni di origine fisiologica a seguito di una interazione fra i canali nervosi²⁴.

Holladay ha inoltre espresso tale abbagliamento con la seguente relazione:

$$L = K \frac{E n}{\theta} \quad [40]$$

dove:

- L = luminanza di velo, cioè di un campo periferico uniforme che produce la stessa perturbazione dell'abbagliamento in questione ed è espressa in cd/m^2 .
- E = l'illuminamento sulla pupilla prodotto dalla sorgente abbagliante, in lux con K ed n costanti.
- θ = angolo formato dalla direzione dello sguardo con il raggio proveniente dalla sorgente abbagliante.

Oltre all'abbagliamento perturbatore esiste un'altra forma di abbagliamento definito *discomfort glare*²⁵ o non confortevole espresso da:

$$G = \frac{\Omega^m L_s^h}{\theta L_f^t} \quad [41]$$

dove:

- Ω = angolo solido sotto cui è vista la sorgente;
- L_s = luminanza della sorgente;

²² Si definisce *campo visivo* la superficie o estensione di uno spazio fisico che l'occhio vede fisso in una direzione assegnata; il *compito visivo* è invece l'oggetto della visione.

²³ L'abbagliamento che produce una diminuzione di visibilità è definito *disability glare* o abbagliamento simultaneo o perturbante. Il vocabolario CIE lo definisce: *Abbagliamento che turba la visione senza causare necessariamente una sensazione sgradevole*".

²⁴ L'abbagliamento simultaneo è dovuto alla coesistenza di luminanze molto differenti in termini di intensità come ad esempio il faro dell'automobile in piena notte.

²⁵ Il vocabolario internazionale CIE lo definisce: *Abbagliamento che produce una sensazione sgradevole senza necessariamente disturbare la visione*.

- θ = l'angolo tra la direzione della sorgente e quella dello sguardo, detto indice di posizione;
- L_f = luminanza del fondo;
- m, h, t : esponenti variabili a seconda delle condizioni sperimentali.

Secondo due studiosi *Petherbridge* e *Hopkinson* sono stati definiti i seguenti valori del fattore di abbagliamento:

G=3000	L'abbagliamento è considerato intollerabile
G=600	L'abbagliamento è considerato fastidioso
G=120	L'abbagliamento è considerato sopportabile
G=24	L'abbagliamento è considerato impercettibile

Tabella 2: Valori dell'indice di abbagliamento

Dopo la soppressione dell'abbagliamento sopravvengono dei fenomeni che vanno dalla comparsa iniziale di un buco nero ad un successivo e graduale recupero delle capacità visive che corrisponde ad una rigenerazione dei pigmenti retinici valutabile intorno ai 15 secondi.

I valori dell'abbagliamento perturbante e confortevole in precedenza esposti non devono essere considerati come una vera e propria misura dell'effetto prodotto, ma ne rappresentano esclusivamente un termine indicativo.

La difficoltà di uso di tali formule ha indotto gli studiosi ad usare regole più semplici ed empiriche come quella di considerare la luminanza della sorgente e la luminanza media del campo visivo in un rapporto compreso tra 1/5 e 1/10. Di recente è stato introdotto *contrast rendering factor CRF*, proposto dalla CIE 29/2, con il quale è possibile valutare in modo esauriente le caratteristiche di comfort visivo di un ambiente e di conseguenza l'assenza di fenomeni di abbagliamento che impediscono o limitano la visibilità del compito visivo.

2.2.6. FATTORE DI RESA DEL CONTRASTO

Il *contrast rendering factor (fattore di resa del contrasto)* è un parametro che individua il rapporto fra il contrasto misurato nella situazione progettata ed il contrasto di riferimento che equivale ad una situazione di totale diffusione della luce con livelli di illuminamento uniformi in un ambiente semisferico. Tale parametro si individua con la seguente espressione:

$$CRF = C/C_r \quad [42]$$

dove:

- C = Contrasto realizzato;
- C_r = Contrasto di riferimento pari a 0,91.

Appare evidente dalla precedente espressione come il massimo comfort visivo si ottiene con valori del CRF superiori od uguali ad 1.

Parametro correlato al CRF è la riduzione del contrasto di luminanza R parametro facile da rilevare con un misuratore di contrasto e che consente una rapida valutazione del CRF.

La norma *UNI 10530* definisce inoltre l'abbagliamento da luce riflessa come: *abbagliamento prodotto dalla riflessione di oggetti luminosi, soprattutto se l'immagine appare nella direzione dell'oggetto osservato o vicino ad essa.*

2.2.7. L'ACUITÀ VISIVA

- **Qualitativamente:** capacità di percepire nitidamente oggetti o dettagli di oggetti, molto vicini tra loro;
- **Quantitativamente:** Reciproco del valore (generalmente espresso in minuti di grado) della separazione angolare di due oggetti vicini (punti e linee) che l'occhio può appena vedere separati.

Considerando che l'immagine retinica è costituita da una distribuzione disuniforme e discontinua di illuminamento, dovuto al potere riflessivo delle superfici degli oggetti, si può definire l'acuità visiva come il rapporto tra le caratteristiche fisiche dei corpi e la distribuzione retinica dell'energia riflessa che ne determina l'immagine.

E' da precisare inoltre che la diversa distribuzione dei *coni* e dei *bastoncelli* nella retina e la loro diversa convergenza in cellule monopolari per i primi e bipolari per i secondi, ci permette di affermare che la periferia retinica presenta una bassa capacità di discriminazione, che cresce man mano che dalla periferia ci si sposta verso la fovea centrale dove è presente il massimo addensamento di coni.

Bisogna precisare che le dimensioni dell'immagine retinica non dipendono dalle dimensioni assolute dell'oggetto ma dall'angolo di visuale sotteso dall'oggetto ai punti nodali dell'occhio. Si valuteranno quindi in radianti le dimensioni dell'oggetto e dell'immagine retinica. L'occhio umano deve essere capace di discriminare i dettagli ed in particolare.

- *la più piccola superficie percettibile o il minimo visibile:* da semplici esperimenti è possibile rilevare che passando dall'osservazione di un punto scuro presentato su uno sfondo chiaro ad una retta nera la dimensione angolare si riduce a vantaggio della discriminazione visiva.
- *il più piccolo intervallo tra due linee o acuità di Vernier:* è la misura dell'angolo che separa due linee. Tale valore cresce lievemente passando da linee verticali a linee disposte in orizzontale. Tale differenza è di origine psicovisiva: la verticalità è più agevole da discriminare.
- *la più piccola distanza visibile tra due punti:* essendo la più facile da esaminare, è quella utilizzata nella pratica per indagare l'acuità visiva. Essa è il reciproco della distanza angolare che deve separare alcuni oggetti perché possano essere visti come distinti. Molti fattori, oltre alla dimensione angolare dell'oggetto, ne influenzano il suo riconoscimento. Grande importanza hanno infatti la sua luminosità, la luminosità dello sfondo, il contrasto e la forma.

Sulla base delle superiori premesse bisogna distinguere tre tipi fondamentali di acuità visiva: di *rivelazione*, di *risoluzione* e di *localizzazione*.

Ricordando infatti che la sensazione visiva è legata fundamentalmente al contrasto tra due luminanze, il sistema visivo è in grado di discernere due sensazioni diverse, se esiste una determinata variazione percentuale di illuminamento. Pertanto la rivelazione di piccoli oggetti (punti o linee) è legata alla variazione percentuale che esse determinano in relazione all'illuminamento ambientale.

Risulta evidente che distinguere particolari oggetti è più difficoltoso in un ambiente assai illuminato (spazi fortemente illuminati dalla luce solare) che in una stanza con una lampada accesa. Se si considerando dei piccoli punti luminosi si avrà un'immagine retinica di dimensioni maggiori delle reali per effetto di quella che viene denominata diffrazione²⁶. La capacità che ha l'occhio di distinguere due sorgenti puntiformi o due particolari di un oggetto viene definito invece acuità visiva di *risoluzione*.

²⁶ Questo è quello che avviene quando ci si sofferma a guardare la volta celeste stellata.

Misurazioni dell'acuità visiva di risoluzione danno valori medi di circa $4,6 \cdot 10^{-4} \text{ rad}^{27}$, valore questo dovuto, secondo le teorie di *Helmholtz*, alla distribuzione spaziale dei ricettori *foveali*.

Secondo tale teoria due punti determinano una visione separata, se le energie luminose delle loro immagini retiniche interessano due coni distinti non contigui, separati da almeno un fotorecettore non sensibilizzato.

Se si valuta invece la capacità di determinare la posizione relativa di due linee verticali, tra loro separate in senso orizzontale si fa riferimento all'acuità visiva di localizzazione, con la quale si ottengono i valori minimi di circa $2 \cdot 10^{-10} \text{ rad}$, per cui si suole parlare *iperacutezza* visiva.

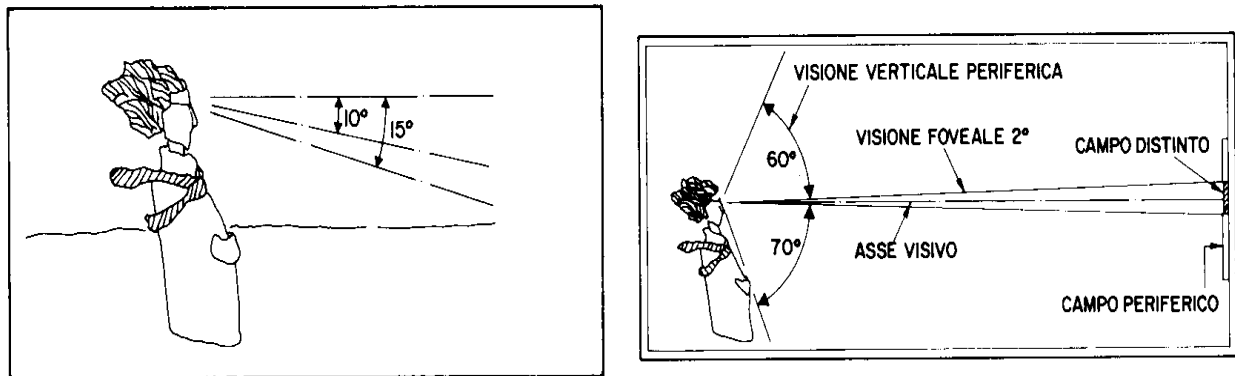


Figura 36: Acuità visiva

L'acuità visiva è fortemente condizionata dall'estensione della visione. Dai precedenti disegni appare infatti evidente come per una persona in piedi l'estensione della visione verticale periferica è di 60° verso l'alto e di 70° verso il basso; in condizione di rilassamento l'asse visivo risulta inclinato verso il basso di 10° (per persone in piedi) o di 15° (per persone sedute).

La visione distinta è limitata dalle dimensioni della *fovea*; mentre la retina copre un angolo visivo di un centinaio di gradi, la fovea sottende un *angolo di soli 2°* .

Pertanto, per percepire i dettagli di un compito visivo esteso le *fovee* di entrambi gli occhi si devono muovere. Se la misura degli oggetti è elevata l'illuminamento può essere ridotto; ad esempio, in una aula scolastica, avvicinarsi di un metro verso la lavagna può corrispondere, in termini di miglioramento visivo, ad un incremento di circa 30 volte il livello di illuminazione.

Ritornando alla percezione degli oggetti un punto più scuro dello sfondo viene infatti percepito solo a partire da un determinato valore di dimensione angolare. Il punto più luminoso dello sfondo invece, è sempre visto indipendentemente dalla sua grandezza spaziale, perché il rapporto da luminanza *oggetto-sfondo* eccede il valore di soglia.

L'acuità visiva tra due punti decade progressivamente quando la loro differenza di luminanza rispetto allo sfondo aumenta, a causa della diffusione della luce che non viene bilanciata sufficientemente dallo sfondo.

²⁷ In casi eccezionali sono stati riscontrati valori di acuità visiva di risoluzione di circa $2 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$, che non possono essere spiegate secondo la teoria di Helmholtz, ma tuttavia superiori alla risoluzione energetica delle immagini di diffrazione considerata.

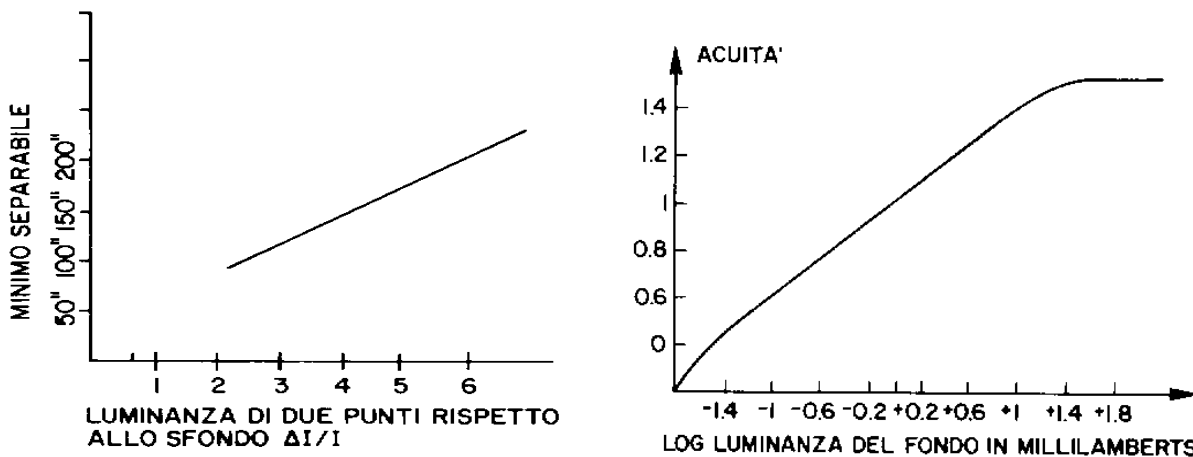


Figura 37: Acuità visiva in funzione della luminanza

Il metodo più semplice per ridurre il deterioramento della acuità visiva per effetto della diffusione della luce è quello di aumentare l'intensità dello sfondo, almeno quando le mire sono più luminose dello sfondo, mentre la migliore acuità visiva si ottiene quando la luminanza dell'ambiente, che rappresenta quella del campo che circonda lo sfondo, risulta uguale a quella del fondo.

Appare evidente come molti fattori, oltre alla dimensione angolare dell'oggetto, ne influenzano il suo riconoscimento quali: la sua luminosità, la luminosità dello sfondo, il contrasto e la forma.

2.2.8. OGGETTI IN MOVIMENTO E TEMPO NECESSARIO PER LA VISIONE

La percezione di un oggetto in movimento richiede uno spostamento dell'immagine dell'oggetto sulla retina. La periferia della retina presenta un'acuità visiva limitata ma è più sensibile al movimento.

Gli oggetti in movimento sono dunque meglio individuati, rispetto a quelli immobili, se osservati alla periferia del campo visivo. Questa sorta di segnale di avvertimento impegna il globo oculare a ruotare nella direzione dell'oggetto osservato per riportarlo al centro della retina ed esaminarlo con maggior precisione. La precisione nella percezione dell'oggetto in movimento dipende dalle dimensioni, dalla forma, dal contrasto e dal tempo di osservazione. La visibilità di un oggetto in movimento può essere migliorata se lo si segue con lo sguardo per un tempo appropriato. Se la velocità del movimento attraverso il campo visivo è elevata e/o la traiettoria è irregolare, la visibilità peggiora rapidamente.

La velocità o il tempo di percezione non deve riguardare esclusivamente oggetti in movimento ma anche e soprattutto compiti visivi di tipo fisso.

Essendo il compito visivo un'attività percettiva strettamente collegata ad un determinato lavoro da svolgere in un certo tempo, occorre armonizzare la velocità di esecuzione dell'operazione lavorativa alla velocità di percezione dell'individuo. Per ottenere tale risultato occorre una adeguata illuminazione. Infatti la velocità di risposta percettiva, intesa come il tempo che occorre fra l'atto della percezione di un oggetto e la risposta operativa, è di circa 0,18 secondi a 500 lux ed aumenta notevolmente al diminuire dell'illuminazione già da 150 lux.

2.2.9. POSIZIONE DELL'IMMAGINE SULLA RETINA

Con riferimento alle caratteristiche fisiologiche dell'occhio, trattate nei capitoli precedenti, l'acuità visiva diminuisce rapidamente quando l'immagine dell'oggetto osservato non cade nella parte centrale della retina (*fovea centralis*). Per compiti che richiedono il riconoscimento di ciascun dettaglio, il sistema visivo funziona con la massima efficacia quando l'oggetto da osservare è situato sulla linea principale di vista e la sua immagine si forma sulla parte centrale della retina.

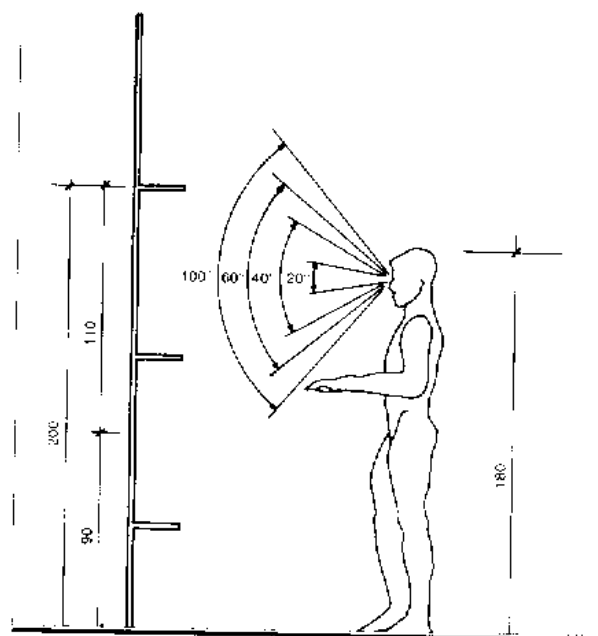
Il movimento e lo sfarfallamento sono più facilmente rilevabili alla periferia del campo visivo.

L'immagine di un oggetto una volta percepito dall'occhio viene elaborata ed interpretata dal cervello il quale possiede una notevole capacità organizzativa; infatti i vari elementi che costituiscono lo spazio tendono ad essere riuniti in gruppi sulla base di determinati schemi quali:

- **La legge della vicinanza:** Considerando un compito costituito da una serie di punti neri disposti secondo linee orizzontali e verticali le parti più vicine di tale sistema percettivo si organizzano nella formazione di un margine dando luogo a delle unità figurali.
- **La legge della somiglianza:** gli elementi uguali di un compito visivo tendono a raggrupparsi in figure.
- **La legge di chiusura:** le regioni delimitate da margini chiusi tendono ad essere percepite più facilmente di quelle con contorni aperti od incompleti.

2.3. IL SENSO MORFOLOGICO

Particolare importanza riveste il rapporto tra lo sfondo e l'oggetto che può dar luogo a delle ambiguità di interpretazione comunemente.



20° : Migliore percezione
 60° : Visibilità normale
 80° : Limite visibilità cromatica
 100° : Campo periferico

Campi di visibilità

Figura 38: Posizione dell'immagine ed acuità visiva

Le percezioni sono in alcuni casi soggette ad errori capaci di far apparire reale il mondo creato dalla fantasia e ciò accade quando la materia percettiva non appare in alcun modo legata allo stimolo sensoriale.

In questo ultimo caso si manifesta quella che viene comunemente detta *illusione*.

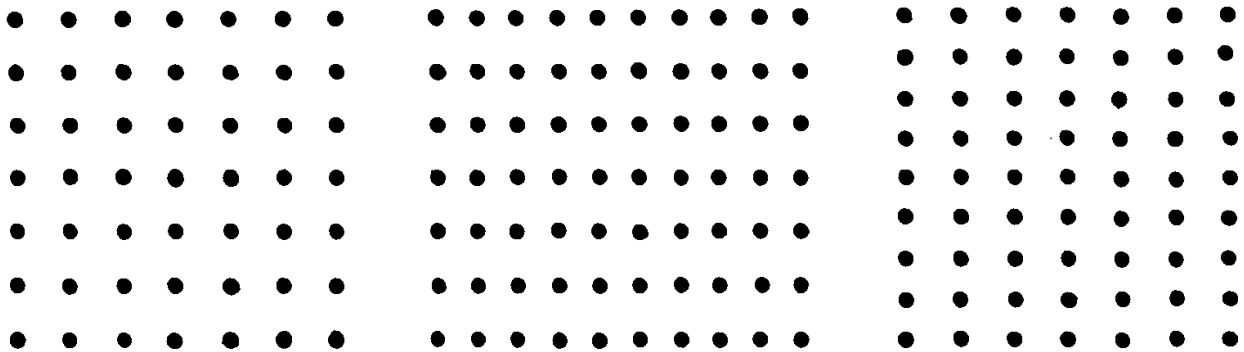


Figura 39: Legge della vicinanza

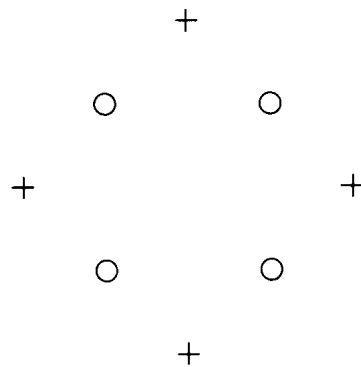


Figura 40: Legge della somiglianza

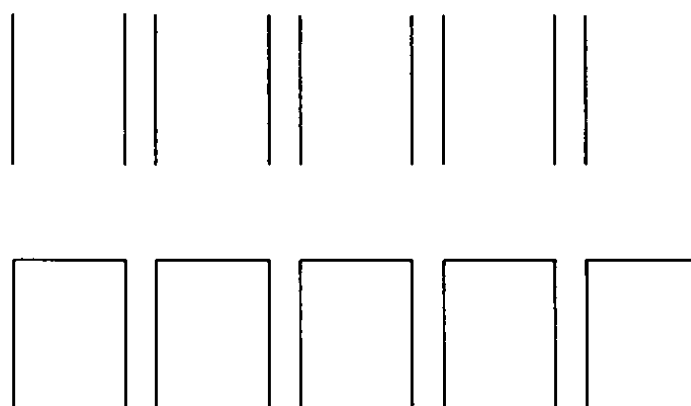


Figura 41: Legge della chiusura

Per concludere bisogna inoltre considerare l'attitudine del cervello ad unificare in una sola unità percettiva le parti che si muovono insieme in una stessa direzione ed ancora la capacità di organizzazione percettiva al fine di ottenere la massima omogeneità del compito visivo.

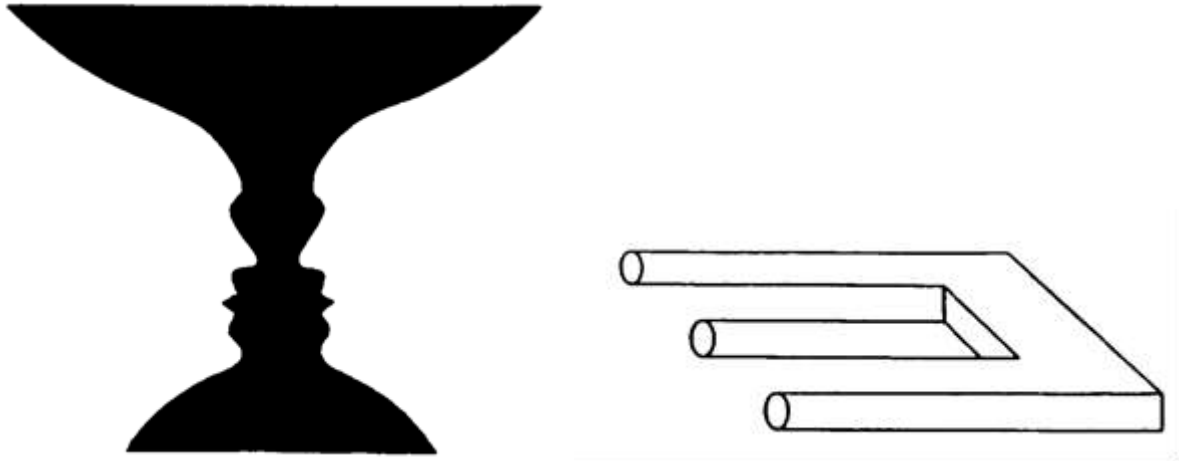


Figura 42: Esempi di illusione ottica

2.4. IL COLORE

Il colore è una qualità degli oggetti ma è anche funzione della luce che li illumina. Ogni corpo ha un fattore di assorbimento, di riflessione e di trasmissione variabile in funzione della lunghezza d'onda.

Ne consegue che se lo si illumina con una luce bianca (che è la somma di tutte le componenti cromatiche visibili) allora il corpo riflette una radiazione che dipende dalle proprie caratteristiche.

Se, ad esempio, il corpo non assorbe la lunghezza d'onda corrispondente al verde ma assorbe tutte le altre allora la luce riflessa è verde e noi attribuiremo il colore verde al corpo.

Se, però, la luce illuminante è solo monocromatica e di colore giallo allora il corpo non può apparire verde perché il verde non è presente nella radiazione originaria; esso appare, in questo caso, nero. Il colore si caratterizza per le seguenti tre qualità:

- **Tono o Tinta:** è dato dalla lunghezza d'onda dominante e quindi individua il colore fondamentale con cui viene visto un oggetto;
- **Purezza o Saturazione:** è la vivacità del colore che quindi si differenzia dalla visione del grigio;
- **Luminanza o Luminosità:** esprime l'intensità luminosa nella direzione della visione. In relazione all'impiego della luce naturale per l'illuminazione degli interni il colore interviene come elemento modificatore e condizionatore del comfort visivo dell'utente.

Infatti lo stimolo originario (o luce incidente) qualora venga condizionato per trasparenza o riflessione da una superficie colorata, causa una reazione *psico-fisiologica*, definita sensazione, dipendente dallo stimolo condizionato (luce secondaria che si ottiene quando parte dell'energia luminosa incidente è assorbita dalla superficie e solo una porzione di essa è trasmessa o riflessa selettivamente).

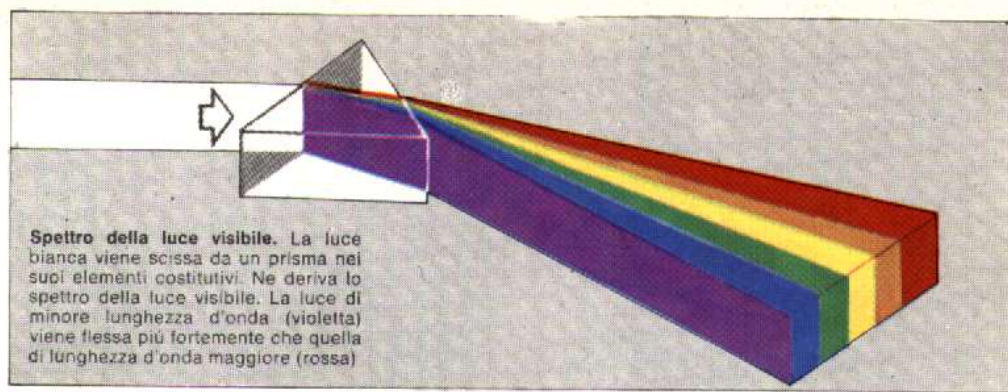


Figura 43: Spettro della luce visibile

La norma UNI 10530 al punto 4.1.4 così definisce il colore:

*Il **colore** è un attributo della luce che contribuisce all'osservazione ed alla percezione dell'ambiente. Tra gli attributi della luce esso è notoriamente il più utile per identificare rapidamente e agevolmente gli oggetti situati nello spazio di lavoro. La percezione e la discriminazione dei colori variano nelle diverse zone della retina; la capacità di discernere i colori è massima nella zona centrale della retina ed aumenta con l'illuminamento, almeno entro un limitato intervallo di valori. La qualità di "resa di colore" di una sorgente luminosa è determinata dalla composizione spettrale della luce emessa in rapporto alle caratteristiche spettrali della luce del giorno.*

La percezione del colore è dovuta alla complessa interazione tra una sorgente luminosa, un oggetto, l'occhio e il cervello. Va fatta quindi una distinzione tra il colore come sensazione e il colore come lunghezza d'onda. La luce infatti non è colorata, ma è capace di generare, a seconda della lunghezza d'onda, le sensazioni della luminosità e del colore quando stimola gli occhi e un sistema nervoso dotati di particolare recettività. Un colore può essere ottenuto dalla mescolanza di tre colori diversi definiti come primari; in questo caso si parla di *sintesi additiva*²⁸. Dalla sintesi additiva dei colori primari (*blu + verde + rosso*) si ottiene il colore bianco. Dai tre colori fondamentali si derivano altri tre colori detti secondari o complementari (*ciano, magenta e giallo*): il giallo è complementare al blu; il magenta è complementare del verde; il ciano è complementare del rosso. Tali coppie di colore per *sintesi sottrattiva* producono il nero, per cui un colore può essere ottenuto sottraendo alla luce una parte dei suoi componenti. Essendo il colore una questione di percezione e di interpretazione soggettiva si è cercato di esprimere i colori in maniera univoca e senza fraintendimenti stabilizzando in sede normativa sia la struttura del fascio di radiazioni che la capacità sensitiva dell'occhio.

La *CIE (Commissione Internationale pour l'Eclairage)* a tal proposito ha introdotto un codice numerico internazionale (sistema CIE 1931) di notazione delle caratteristiche fisiche del colore mediante un sistema di coordinate che fa riferimento a tre colori fondamentali: X, Y, Z considerati come primari nella sintesi additiva. Il sistema CIE si basa sulla misurazione dei valori spettrofotometrici di un colore in tutte le lunghezze d'onda. I valori che risultano vanno confrontati con i valori dei tre colori primari (*rosso, verde e blu*); i dati che ne risultano rappresentano la quantità di colori primari necessaria per riprodurre quel determinato colore dello spettro. La somma dei dati relativi al rosso, verde e blu si chiama "*valore-tristimolo*" di un determinato colore e viene definito con le lettere X per il rosso, Y per il verde e Z per il blu.

²⁸ E' questa la prima legge di Grassmann che è alla base della Colorimetria.

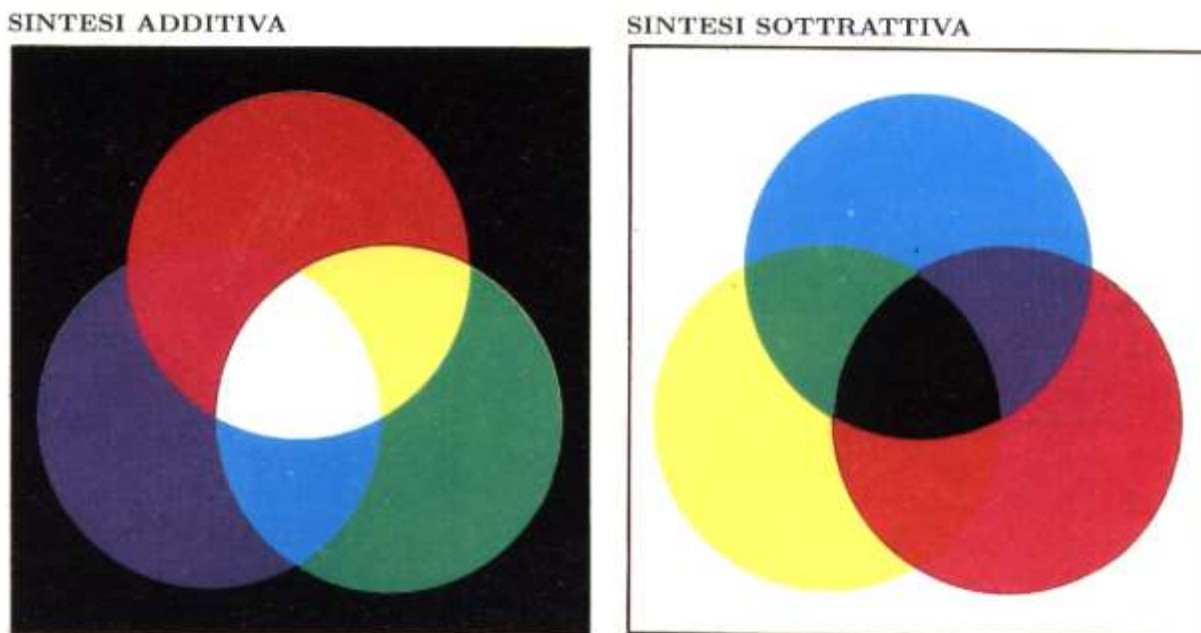


Figura 44: Sintesi additiva e sottrattiva dei colori

I valori *tristimolo* servono per calcolare le coordinate della *cromaticità* di un colore; tali coordinate rappresentano le percentuali relative di ciascun colore primario presente in un certo colore e il loro valore è indicato con lettere minuscole: *x* valori del rosso, *y* valori del verde e *z* valori del blu.

2.4.1. COLORIMETRIA

I tre colori fondamentali *rosso, verde e blu* non riescono a formare per semplice additività tutti i colori visibili ma occorre, in alcuni casi, andare in tricromia sottrattiva, cioè occorre togliere un colore fondamentale dagli altri due colori. Per evitare questo passaggio la CIE ha ipotizzato una costruzione fittizia dei colori mediante l'applicazione delle due **leggi di Grassmann**:

- Se si sommano tre sorgenti di colore diverso si ottiene un nuovo colore che non è distinguibile dai componenti:

$$D = A + B + C$$

- Se ciascuna sorgente viene variata di intensità anche il colore risultante varia la sua intensità e colore.

$$nD = nA + nB + nC$$

Il CIE ha stabilito di scegliere tre componenti cromatiche fittizie aventi andamento dato in Figura 45 e in valori frequenziali dati in Tabella 3.

Si osservino subito che le tre componenti sono **fittizie** e cioè non corrispondono a componenti reali, come erano invece il *rosso, il verde e il blu*. La componente *Y* è scelta in modo tale da coincidere con la curva di visibilità relativa. Inoltre la somma dei valori corrispondenti alle singole frequenze è pari a 21.37 per tutte e tre le componenti cromatiche.

Considerata la grandezza di stimolo $f(\lambda)$ (di solito *L* o *R*), applicando la seconda legge di Grassmann si hanno tre coordinate cromatiche:

$$X = \text{cost} \int f(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (43)$$

$$Y = \text{cost} \int f(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (44)$$

$$X = \cos t \int f(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (45)$$

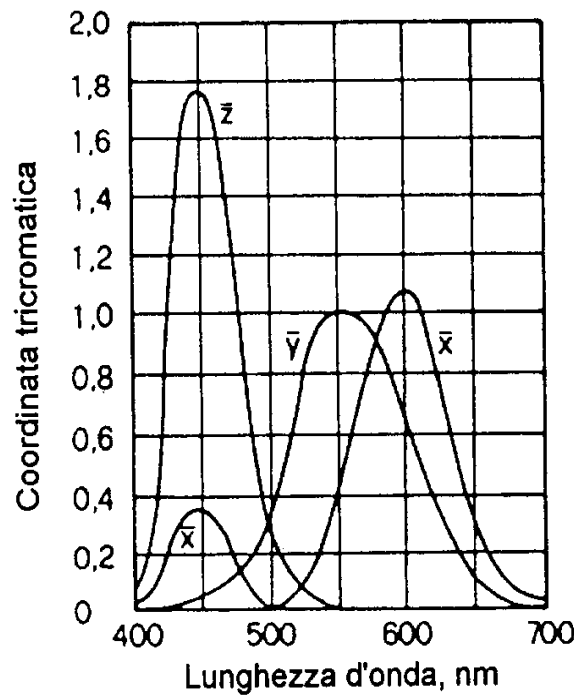


Figura 45: Componenti cromatiche X, Y e Z della CIE

λ	\bar{x}	\bar{y}	\bar{z}	λ	\bar{x}	\bar{y}	\bar{z}	λ	\bar{x}	\bar{y}	\bar{z}
380	0,0014	0,0000	0,0065	525	0,1096	0,7932	0,0573	675	0,0636	0,0232	
385	0,0022	0,0001	0,0105	530	0,1655	0,8620	0,0422	680	0,0468	0,0170	
390	0,0042	0,0001	0,0201	535	0,2257	0,9149	0,0298	685	0,0329	0,0119	
395	0,0076	0,0002	0,0362	540	0,2904	0,9540	0,0203	690	0,0227	0,0082	
400	0,0143	0,0004	0,0679	545	0,3597	0,9802	0,0134	695	0,0158	0,0057	
405	0,0232	0,0006	0,1102	550	0,4334	0,9950	0,0087	700	0,0114	0,0041	
410	0,0435	0,0012	0,2074	555	0,5121	1,0002	0,0057	705	0,0081	0,0029	
415	0,0776	0,0022	0,3713	560	0,5945	0,9950	0,0039	710	0,0058	0,0021	
420	0,1344	0,0040	0,6456	565	0,6784	0,9786	0,0027	715	0,0041	0,0015	
425	0,2148	0,0073	1,0391	570	0,7621	0,9520	0,0021	720	0,0029	0,0010	
430	0,2839	0,0116	1,3858	575	0,8425	0,9154	0,0018	725	0,0020	0,0007	
435	0,3285	0,0168	1,6230	580	0,9163	0,8700	0,0017	730	0,0014	0,0005	
440	0,3483	0,0230	1,7471	585	0,9786	0,8163	0,0014	735	0,0010	0,0004	
445	0,3481	0,0298	1,7826	590	1,0263	0,7570	0,0011	740	0,0007	0,0003	
450	0,3362	0,0380	1,7721	595	1,0567	0,6949	0,0010	745	0,0005	0,0002	
455	0,3187	0,0480	1,7441	600	1,0622	0,6310	0,0008	750	0,0003	0,0001	
460	0,2908	0,0600	1,6692	605	1,0456	0,5668	0,0006	755	0,0002	0,0001	
465	0,2511	0,0739	1,5281	610	1,0026	0,5030	0,0003	760	0,0002	0,0001	
470	0,1954	0,0910	1,2876	615	0,9384	0,4412	0,0002	765	0,0001	0,0000	
475	0,1421	0,1126	1,0419	620	0,8544	0,3810	0,0002	770	0,0001	0,0000	
480	0,0956	0,1390	0,8130	625	0,7514	0,3210	0,0001	775	0,0001	0,0000	
485	0,0580	0,1693	0,6162	630	0,6424	0,2650	0,0000	780	0,0000	0,0000	
490	0,0320	0,2080	0,4652	635	0,5419	0,2170	0,0000				
495	0,0147	0,2586	0,3533	640	0,4479	0,1750	0,0000				
500	0,0049	0,3230	0,2720	645	0,3608	0,1382	0,0000				
505	0,0024	0,4073	0,2123	650	0,2835	0,1070	0,0000				
510	0,0093	0,5030	0,1582	655	0,2187	0,0816					
515	0,0291	0,6082	0,1117	660	0,1649	0,0610					
520	0,0633	0,7100	0,0782	665	0,1212	0,0446					
				670	0,0874	0,0320					
								Σ	21,37	21,37	21,37

Tabella 3: Valori frequenziali delle componenti cromatiche

In forma discreta si possono sostituire gli integrali per ottenere le relazioni:

$$X = \cos t \sum f(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta \lambda$$

$$Y = \cos t \sum f(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta \lambda$$

$$Z = \cos t \sum f(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta \lambda$$

che in forma normalizzata divengono:

$$x = X / (X + Y + Z) \quad (46)$$

$$y = Y / (X + Y + Z) \quad (47)$$

$$z = Z / (X + Y + Z) \quad (48)$$

La forma normalizzata consente di riferirsi solamente a due componenti, x e y , ottenendo la terza, z , per complemento ad 1, cioè

$$z = 1 - (x + y) \quad (49)$$

Riportando in assi x e y i valori delle componenti cromatiche ottenute per i vari colori reali si ottiene una curva a campana. All'interno si hanno tutti i colori combinazione di più componenti cromatiche. Il diagramma cromatico CIE presenta una forma di tipo triangolare, vedi Figura 46, nella quale le tre luci primarie sono poste ai vertici e si irradiano verso l'interno con intensità luminosa, fatta uguale ad 1. Lungo i lati del triangolo sono posti i colori ottenuti per miscela dei due colori situati alle estremità.

I colori posti all'interno sono ottenuti invece per mescolanza. La quantità di rosso, verde e blu, presenti in un qualunque punto P sono espresse dal valore delle tre distanze di P dai corrispondenti lati del triangolo. Considerando inoltre che la somma delle tre coordinate di un punto qualsiasi è sempre uguale all'unità ed è quindi possibile dare i valori di due sole grandezze per dedurre la terza.

Considerando un punto P interno al diagramma CIE²⁹ il suo colore può essere ottenuto da una miscela di un colore monocromatico più il bianco di eguale energia (W). Per identificare tale colore basta unire P con W fino ad incontrare la linea dei corpi spettrali.

La lunghezza d'onda relativa a tale colore monocromatico, che miscelato in proporzioni opportune con W può dare luogo al colore P , si chiama *lunghezza d'onda dominante* (rappresentato dal punto D) ed il rapporto tra la luminosità del colore monocromatico incontrato sulla linea dei colori spettrali e la luminosità del colore miscelato P si chiama *fattore di energia*.

Tale fattore risulta sempre inferiore ad uno, salvo il caso in cui P coincide sulla linea dei colori spettrali e viene chiamato *colore puro* (monocromatico). In conclusione il punto P può identificarsi come intersezione della retta parallela all'asse delle ascisse e di ordinata y_p e della congiungente il punto D con W ³⁰.

²⁹Tale diagramma gode di alcune proprietà alcune delle quali verranno di seguito citate.

Il punto W , a cui corrispondono le coordinate $x=y=z=0,333$ rappresenta il "bianco di eguale energia" o punto acromatico di riferimento. I punti della linea a campana rappresentano i colori spettrali o puri, corrispondenti alle lunghezze d'onda a fianco indicate. I punti del segmento che unisce W con un punto qualunque della curva a campana (linea VRG) indicano i colori di eguale tono di colore, e di saturazione via che il punto si avvicina a W . Nei corrispondenti colori non saturi, la lunghezza d'onda del colore saturo si chiama *lunghezza d'onda dominante*. Inoltre i punti che si trovano fuori dall'area limitata dalla curva a campana rappresentano la luce non visibile.

³⁰ La lunghezza d'onda dominante ed il fattore di purezza individuano un determinato colore.

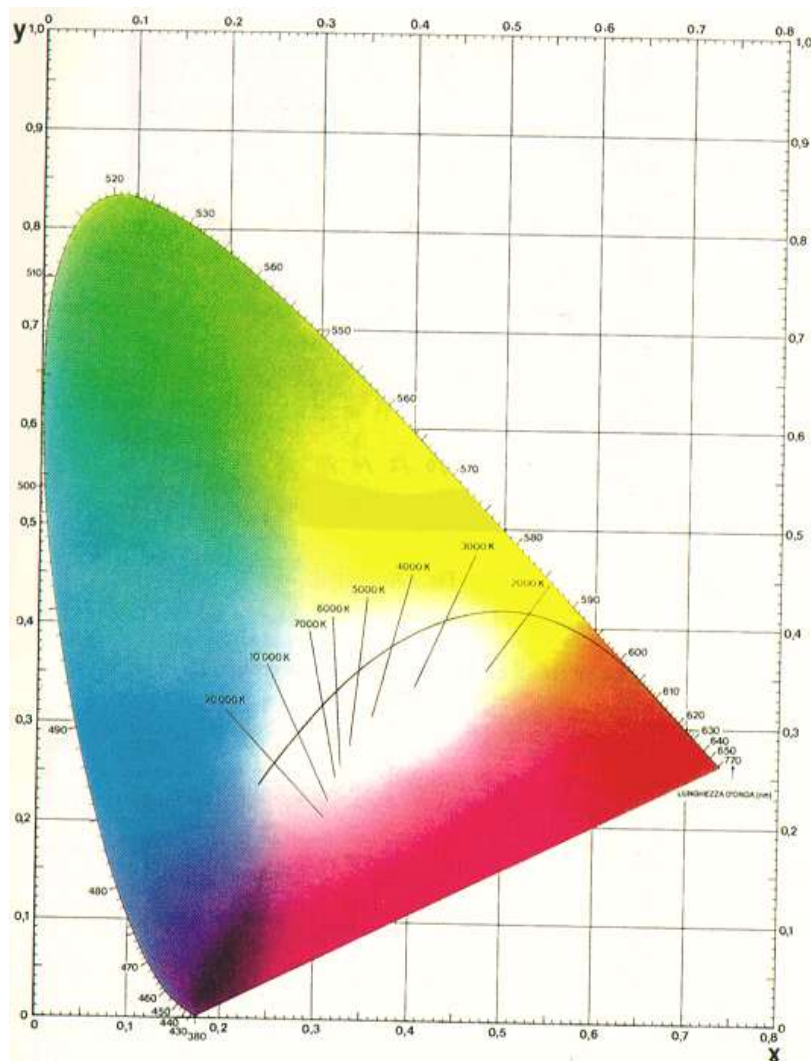


Figura 46: Il triangolo del colore

L'aspetto cromatico non dipende soltanto dalla composizione spettrale della luce ma anche dalle caratteristiche della superficie osservata, dalla luminanza, dai contrasti di colore e dallo stato di adattamento cromatico³¹. L'occhio è in grado di percepire contenute differenze di colore tra due superfici adiacenti in condizioni di pari livello di luminanza.

L'occhio dell'uomo percepisce una relazione tra la lunghezza d'onda piuttosto che una percezione diretta di una singola lunghezza d'onda, perciò il rapporto tra i colori non varia con i cambiamenti dello spettro di colore della sorgente; l'occhio si adatta quindi ad un nuovo punto neutrale in maniera tale che il colore resta più o meno lo stesso. Tale fenomeno è chiamato *costanza del colore*. Sorgenti di luce differenti possono influenzare la capacità di discriminazione tra alcuni colori. In particolari attività professionali l'aspetto dell'immagine colorata e la discriminazione tra i colori possono assumere una notevole importanza.

³¹ Se si pongono davanti ad una sorgente luminosa due filtri di colore complementare questi non faranno passare la luce (sintesi sottrattiva); viceversa se si pongono questi due filtri davanti a due sorgenti luminose orientate verso lo stesso punto, questo punto sarà illuminato da una luce bianca (sintesi additiva). Se le superfici appaiono colorate ciò lo si deve al fatto che sono irradiate da fasci pancromatici, costituiti cioè da tutte le radiazioni dello spettro solare. L'intervento della superficie sulle radiazioni luminose consiste nel variarne la composizione spettrale mediante una riflessione selettiva. Ma anche la composizione spettrale della radiazione luminosa emessa dalla sorgente può alterare il fascio riflesso da una superficie, ed in questo caso si parla di azione selettiva della sorgente luminosa.

2.4.2. PLANCK'S LOCI

Se la funzione di stimolo è costituita dalla radiazione del corpo nero (Legge di Planck) allora possiamo calcolare le coordinate cromatiche per varie temperature di emissione mediante i seguenti passaggi:

$$X = \int_{380nm}^{780nm} w(\lambda) \cdot \bar{X}(\lambda) \cdot d\lambda$$

$$Y = \int_{380nm}^{780nm} w(\lambda) \cdot \bar{Y}(\lambda) \cdot d\lambda$$

$$Z = \int_{380nm}^{780nm} w(\lambda) \cdot \bar{Z}(\lambda) \cdot d\lambda$$

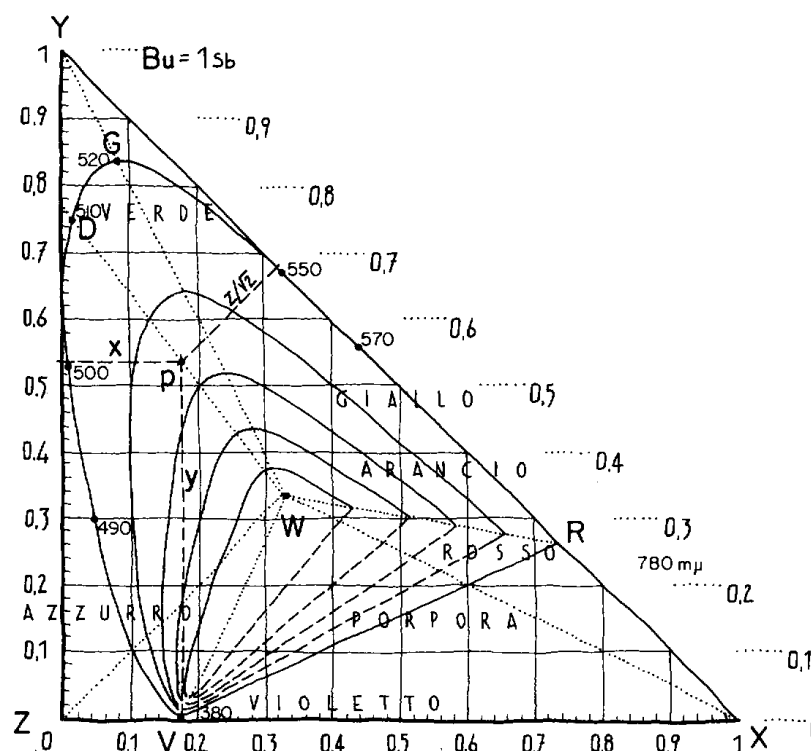


Figura 47: Diagramma cromatico CIE 1931

ove le funzioni $w(\lambda)$ sono la radiazione del corpo nero, legge di Planck:

$$w(\lambda) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \left(\frac{W}{\mu m} \right) \quad (50)$$

ove le costanti valgono:

$$c_1 = 3.742 \cdot 10^8 \quad , \quad c_2 = 1.439 \cdot 10^4$$

Il risultato dei calcoli porta a tracciare la curva (ben visibile in basso a destra del triangolo del colore in Figura 46) detta *Planck's Loci* che rappresenta il luogo delle coordinate cromatiche corrispondenti a ciascuna di emissione del corpo nero. Per gli emettitori radiativi (ad esempio per il filamento di una lampada) si suole indicare il colore di emissione mediante la temperatura del corpo nero corrispondente: **Temperatura dal Colore (TC)**. Il sole, ad esempio, ha una temperatura dal colore di circa 6000 K, mentre il filamento di una lampadina normale ha una TC di circa 2200 K e quello di una lampada allo iodio ha una TC di circa 2500 K.

Per i corpi non radiativi (ad esempio le lampade a luminescenza) si indica la **Temperatura del Colore Correlata (TCC)** come la temperatura del corpo nero che più si avvicina come tinta al colore desiderato. Nel triangolo del colore si hanno alcune linee guida che aiutano ad individuare la temperatura corrispondente. Per le lampade a luminescenza si parla di TCC variabile da 2800 K a 6500 K. In quest'ultimo caso si ha una luce bluastra. Si osservi che a temperatura ambiente il corpo nero apparirà nero, sarà rosso ad 800 K, giallo a 3000K, bianco caldo a 4000K, bianco freddo a 5000K e azzurro a 8000K.

Le sorgenti luminose che la CIE ha selezionato come sorgenti modello sono quelle definite:

- "A" pari a 2854K (incandescenza normale),
- "B" pari a 4870K (sorgente A più un filtro)
- "C" pari a 6770K (sorgente A più un filtro).

Va precisato che la sorgente "B" è un modello che dovrebbe avvicinarsi al calore della luce naturale del mezzogiorno del centro Europa in primavera, mentre il modello "C" dovrebbe imitare la luce delle ore 12 con cielo coperto nella stessa situazione geografica e stagionale³².

L'escursione della temperatura di colore del sole è di 4000K, mentre per il cielo coperto il suo valore è di circa 20000K (da 7000 a 28000K). Tali valori sono di importanza fondamentale nei casi in cui si intende abbinare la luce artificiale a quella naturale³³.

2.4.3. EFFETTO CROMATICO E INDICE DI RESA CROMATICA

Altro parametro importante della visione del colore è l'*effetto cromatico*. L'effetto cromatico di una superficie dipende sia dal suo colore effettivo che dal tipo di sorgente luminosa.

Si definisce *indice di resa cromatica (IRC o CRI Colour Rendering Index)* la misura di una sorgente luminosa di rendere i colori.

Inizialmente la CIE (1948) raccomandò un metodo per specificare le proprietà di resa del colore delle lampade dividendo lo spettro visibile in otto bande e confrontando la qualità della luce contenuta in ciascuna banda con quella contenuta nella banda corrispondente della sorgente di riferimento.

Con la CIE 1965-74 viene introdotto, per la classificazione delle sorgenti luminose, l'indice di resa generale del colore R_a .

In questo metodo l'indice di resa cromatica è dato da un numero che esprime in percentuale il rapporto tra la definizione cromatica di otto colori campioni illuminati da una sorgente qualsiasi e la definizione degli stessi illuminati da una sorgente campione di riferimento CIE.

Tale indice è quindi calcolato come la media aritmetica degli spostamenti di resa colore relativi a ciascuno degli otto colori di prova secondo la seguente formula

$$R_a = 100 - 4,6\Delta E_{a,i} \quad [51]$$

dove $\Delta E_{a,i}$ rappresenta lo spostamento di resa colore relativo ai colori prova. Con valori compresi tra 90 e 100 si ottiene una elevata resa cromatica.

³² Sopra i 5000K la luce artificiale è paragonata a quella naturale.

³³ La miscelazione tra la luce naturale e quella artificiale è sempre possibile attuarla purché la curva spettrale delle lampade si armonizzi con quella della luce naturale. Per fare un esempio, se le ombre presenti in un ambiente non avranno colore unico, significherà che le luci (naturale ed artificiale) non si miscelano in modo coerente; per ovviare a tale inconveniente e compensare quindi l'elevata temperatura di colore della luce naturale si dovranno utilizzare lampade non più fredde di 5000K.

3. GRANDEZZE FOTOMETRICHE DI RIFERIMENTO

In questo capitolo si parlerà di grandezze fotometriche di riferimento (utili per la progettazione dell'illuminazione artificiale) e dei dispositivi maggiormente utilizzati per l'illuminazione, quali le lampade.

La luce è l'energia radiante rilevata dall'osservatore umano attraverso le sensazioni visive che nascono dallo stimolo della retina dell'occhio. Fisicamente è una perturbazione che si propaga nello spazio sotto forma di onde elettromagnetiche.

L'illuminamento in un punto di una superficie, come già detto in precedenza, è il flusso luminoso ricevuto da un elemento infinitamente piccolo di superficie nell'intorno di un punto considerato, diviso per l'area dell'elemento stesso, altrimenti si parla di illuminamento medio o illuminazione media, per cui:

$$E = \frac{d\phi}{dS} \quad [52]$$

espresso in *lux*, (*lumen per metro quadrato*).

Se la sorgente luminosa è puntiforme ed ha l'intensità luminosa di una candela alla distanza di un metro, si distribuisce su una superficie sferica di 1 m^2 l'illuminamento massimo di un lux.

$$E = \frac{I}{r^2} \quad [53]$$

dove:

- I = intensità luminosa;
- r = distanza normale tra la sorgente luminosa e la superficie illuminata.

L'illuminamento è spesso considerato una grandezza di riferimento per l'illuminotecnica e per la progettazione impiantistica. Questa grandezza è facile da misurare, concettualmente semplice e spesso preferita all'intensità e alla luminanza (che è poi la vera grandezza fisiologica di riferimento). Questo ha reso possibile la disponibilità di numerose norme (alcune invero vecchiotte) e tabelle con valori di illuminamento caratteristici per dato *compito visivo*.

La normativa vigente (D.Lgs. 19 settembre 1994 n. 626, art. 10), con riferimento all'illuminazione naturale ed artificiale, così recita: *A meno che non sia richiesto diversamente dalle necessità della lavorazione e salvo che non si tratti di locali sotterranei, i locali devono essere convenientemente illuminati a luce naturale diretta...Per quanto riguarda l'intensità (si fa riferimento al livello di illuminamento medio), ove esigenze tecniche non ostino, devono essere assicurati i valori minimi seguenti:*

<i>per ambienti destinati a deposito di materiali grossi</i>	<i>10 lux</i>
<i>per passaggi, corridoi e scale</i>	<i>20 "</i>
<i>per lavori grossolani</i>	<i>40 "</i>
<i>per lavori di media finezza</i>	<i>100 "</i>
<i>per lavori fini</i>	<i>200 "</i>
<i>per lavori finissimi</i>	<i>300 "</i>

Tabella 4: Valori minimi di illuminazione consigliati

Per lavori di media finezza, fini e finissimi i suddetti valori possono essere conseguiti mediante sistemi di illuminazione localizzata sui singoli posti di lavoro; in tal caso si deve provvedere a che il livello medio di illuminazione generale dell'ambiente non sia inferiore ad un quinto di quello esistente nei posti di lavoro. La tabella seguente illustra l'illuminamento medio di esercizio E_n previsti per i vari tipi di locale adibiti ad uso civile ad uso civile³⁴, tonalità di colore, gruppo di resa del colore e classe di controllo dell'abbagliamento raccomandati per le varie applicazioni dalla norma UNI 10380, la quale mostra valori decisamente superiori rispetto a quelli proposti dalla vigente legislazione nazionale ed a parere dello scrivente più idonei per lo svolgimento delle varie attività all'interno dei locali.

INTERNI CIVILI

Tipo di locale, compito visivo o attività	Illuminazione di esercizio. Valore medio (lx)	Tonalità di colore	Resa di colore: R_a'	Classe di qualità per la limitazione dell'abbagliamento G
ABITAZIONI E ALBERGHI				
zona di conversazione o di passaggio	50-100-150	W	1A	A
zona di lettura	200-300-500	W	1A	A
zona scrittura	300-500-750	W	1A	A
zona dei pasti	100-150-200	W	1A	A
cucina	200-300-500	W	1A	A
bagno, illuminazione generale	50-100-150	W	1A	B
bagno, zona specchio	200-300-500	W	1A	B
camere, illuminazione generale	50-100-150	W		B
camere, zone armadi	200-300-500	W	1A	B

³⁴ Per i valori descritti nella tabella seguente si fa riferimento alla norma italiana *illuminazione di interni con luce artificiale*, UNI 10380, maggio 1994.

camere letti	200-300-500	W	1A	B
camere, stiratura, cucina e rammendo	500-750-1000	W	1A	A
AMBIENTI COMUNI				
aree di passaggio, corridoi	50-100-150	WI	2	D
scale, ascensori	100-150-200	WI	2	D
magazzini e depositi	100-150-200	WI	2	D
AMBIENTI SPORTIVI				
bocce	300-500	I	1B	A
palestre	300-500	I	1B	A
piscine	300-500	I	1B	A
tennis, pallavolo	500-750	I	1B	A
AUDITORIUM				
teatri e sala da concerto	50-100-150	WI	1B	B
Multiuso	150-200-300	WI	1B	B
BIBLIOTECHE				
scaffalature (deposito)	150-200-300	WI	2	C
tavoli da lettura	300-500-750	WI	1B	B
banchi catalogazione e classificazione	200-300-500	WI	1B	B
Legatura	200-300-500	WI	2	B

Tabella 5: Illuminamento, Tonalità del colore, Resa cromatica e Abbagliamento

Tipo di locale, compito visivo o attività	Illuminazione di esercizio (lux medio)	Tonalità di colore	Resa di colore Ra'	Classe qualità per limitazione abbagliamento G
CHIESE				
ambiente generale, banchi	50-100-150	WIC	2	B
altare, pulpito	150-200-300	WIC	2	B
NEGOZI E MAGAZZINI				
aree di circolazione	150-200-300	I	1B	B
esposizione merci	300-500-750	I	1B	B
vetrine	500-750-1000	WIC	1B	B
OSPEDALI				
corsie, illuminazione generale	50-100-150	W	1A	A
corsie, esami	200-300-500	W	1A	A
corsie, lettura	150-200-300	W	1A	A
corsie, circolazione notturna	3-5-10	W	1A	-
locali per esami, illuminazione generale	300-500-750	W	1A	A
locali per esami, ispezioni	750-1000-1500	WI	1A	A
terapie intensive	200-300-500	W	1A	A
chirurgia, illuminazione generale	500-750-1000	I	1A	A

chirurgia, illuminazione localizzata	10000-30000-100000	IC	1A	A
sale autopsia, illuminazione generale	500-750-1000	IC	1A	A
sale autopsia, illuminazione localizzata	5000-10000-15000	IC	1A	A
laboratori e farmacie, illuminazione generale	300-500-750	IC	1A	A
laboratori farmacie, illuminazione localizzata	500-750-1000	IC	1A	A
locale per consulti, illuminazione generale	300-500-750	WI	1A	A
locale per consulti, illuminazione localizzata	500-750-1000	WI	1A	A
SCUOLE				
classe, illuminazione generale	300-500-750	WI	1B	B
classe, lavagna	300-500-750	WI	1B	B
laboratori artistici e scientifici	500-750-1000	WIC	1B	B
aule universitarie, illuminazione generale	300-500-750	WI	1B	B
aule universitarie, lavagna	500-750-1000	WI	1B	B
aule universitarie, banchi per dimostrazioni	500-750-1000	WI	1B	B
laboratori officine e sale per l'istruzione d'arte	300-500-750	WI	1B	B
sale per assemblee	150-200-300	WI	1B	B

Tabella 6: Illuminamento, Tonalità del colore, Resa cromatica e Abbagliamento

Tipo di locale, compito visivo o attività	Illuminazione di esercizio (lux medio)	Tonalità di colore	Resa di colore Ra'	Classe qualità limitazione abbagliamento G
---	--	--------------------	--------------------	--

UFFICI

uffici generici, dattilografia, sale computer	300-500-750	WI	1B	B
uffici per disegnatori e per progettazione	500-750-1000	WI	1B	B
sale per riunioni	300-500-750	WI	1B	B

Tabella 7: Illuminamento, Tonalità del colore, Resa cromatica e Abbagliamento

3.1. L'EMITTANZA LUMINOSA O RADIANZA

L'Emittanza luminosa o radianza rappresenta la densità del flusso luminoso emesso per unità di superficie. L'emittanza luminosa (M) è espressa in lumen/m²

$$M = \frac{d\phi}{dS} \quad [54]$$

Come si nota la formula è la stessa dell'illuminamento ma la superficie considerata è quella emittente e non quella ricevente.

3.2. L'ESPOSIZIONE LUMINOSA

L'esposizione luminosa rappresenta i lumen che in un tempo determinato investono una superficie di area unitaria.

$$H = \int \frac{d\phi}{dS} dt \quad [55]$$

oppure in funzione della quantità di luce l'esposizione luminosa diviene:

$$H = \frac{dQ}{dS} \quad [56]$$

dove Q si definisce quantità di luce ed esprime il prodotto del flusso luminoso per la sua durata:

$$Q = \int \phi dt \quad [57]$$

3.3. COEFFICIENTE DI ASSORBIMENTO

E' indicato con a ed è il rapporto tra flusso luminoso assorbito da una superficie e flusso luminoso incidente.

3.4. COEFFICIENTE DI RIFLESSIONE

E' indicato con r ed è il rapporto tra flusso luminoso riflesso da una superficie e flusso luminoso incidente. Per corpi opachi (non trasparenti) vale la relazione:

$$r = 1 - a$$

3.5. VALORI DI R CONSIGLIATI PER LE SUPERFICI INTERNE DI UNA STANZA

Tipo di superficie	Fattore di riflessione
Soffitti	Minimo 0.6
Pareti laterali	0.3 - 0.8
Pavimenti	0.2 - 0.4

Tabella 8: Fattori di riflessione consigliati

3.6. LE SORGENTI LUMINOSE

Le sorgenti luminose si possono dividere in:

- *Monocromatiche*, quando l'energia luminosa è emessa con una sola lunghezza d'onda o con poche lunghezze comprese in una stretta banda.

- *Eterocromatiche*, quando l'energia è emessa con poche lunghezze d'onda assai nettamente delimitate in una banda dello spettro.
- *Pancromatiche*, quando l'energia è emessa attraverso varie lunghezze che occupano interamente lo spettro; è questo il caso della luce solare.

3.7. CLASSIFICAZIONE DELLE LAMPADE

Storicamente sono nate per prime le lampade ad incandescenza (Edison) e successivamente quelle a scarica nei gas.

Queste ultime raggruppano una grande famiglia di lampade e sono sempre caratterizzate da un fenomeno di emissione fotonica associato ad riassetto elettronico in atomi (che possono essere di Hg, Na, Ar) che vengono ionizzati per urto con particelle elementari o che, per effetto di urti anelastici, spostano elettroni da un livello ad un altro.

Ci sono due tipi di lampade:

Ad incandescenza, con filamento in tungsteno

Queste possono essere:

- a filamento sotto vuoto;
- a filamento con gas inerti (argon);
- a filamento a ciclo di alogeni (iodio, bromo):
 - a tensione di rete;
 - a bassa tensione (6, 12, 24 V);

A scarica in gas

Queste possono essere:

- fluorescenti:
 - tubolari;
 - compatte;
- a vapori di mercurio ad alta pressione;
- a vapori di mercurio ad alta pressione con alogenuri (*metal halide*);
- a vapori di sodio a bassa pressione;
- a vapori di sodio ad alta pressione.

3.8. CARATTERIZZAZIONE DELLE LAMPADE

I principali parametri usati per caratterizzare una lampada sono i seguenti:

- - *Flusso luminoso* [lm]: quantità di luce emessa per unità di tempo.
- - *Efficienza luminosa* [lm/W]: rapporto tra flusso luminoso emesso e potenza elettrica assorbita.
- - *Temperatura di colore* [K]: temperatura di un corpo nero che emette luce dello stesso colore della luce emessa dalla lampada.
- - *Resa cromatica*: indice che indica quanto la lampada è capace di riprodurre fedelmente, in relazione alla luce naturale, i colori degli oggetti illuminati.
- - *Durata media* [h]: numero di ore di funzionamento dopo il quale il 50% delle lampade di quel tipo ha smesso di funzionare.

In generale, per uno stesso tipo di lampada, alte efficienze energetiche si accompagnano a basse rese cromatiche e viceversa, come avviene in generale nelle lampade fluorescenti ove, a causa dello spettro di emissione a righe e dell'effetto di *luminescenza* si raggiungono efficienze elevate ma rese cromatiche basse.

Lampada	Efficienza luminosa lm/W	Temperatura di colore K	Resa cromatica %	Durata media ore
Incandescenza a filamento	10-17	2500	100	1000
Alogena	20-25	3190	100	1500-2000
Fluorescente bianco freddo	65-100	6500	62-98	5000
Fluorescente bianco caldo	62-96	3000	52-95	5000
Vapori di mercurio alta pressione	70-83	5710	50-70	8-10000
Vapori di mercurio con alogenuri	75-80	3720	60-80	5000
Sodio bassa pressione	80-200		< 20	8-10000
Sodio alta pressione	30-120	2500	30-80	6000

Tabella 9: Valori tipici dei parametri caratteristici per vari tipi di lampade

3.8.1. LAMPADE AD INCANDESCENZA

Queste lampade sono le più antiche: un filamento di tungsteno portato alla temperatura di circa 2000 K emette una luce giallo-rossastra.

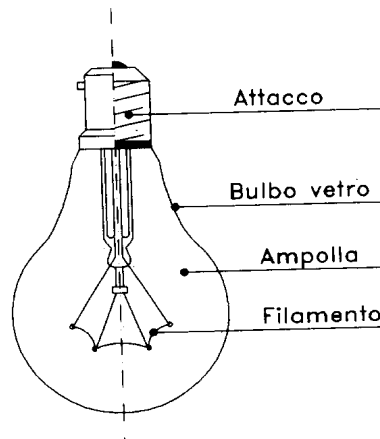


Figura 48: Schema costruttivo di una lampada ad incandescenza

Sono oggi costruite in tre tipologie: GLS, REFLECTOR ed ALOGENE, vedi Figura 49.

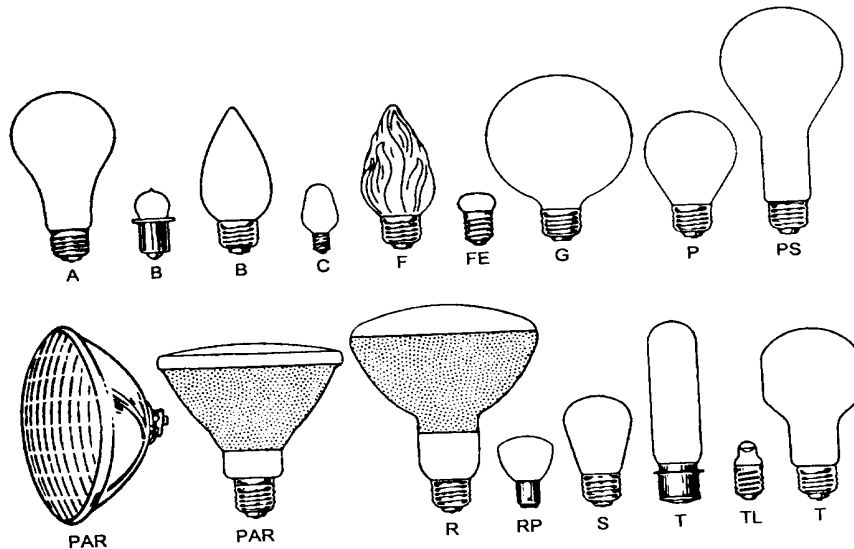


Figura 49: Tipologie di lampade ad incandescenza

Nella seguente tabella si hanno alcune proprietà delle lampade ad incandescenza.

Categoria	Tipo	Potenza assorbita (W)	Tensione di funzionamento (V)	Efficienza specifica (lm/W)	Durata (h)
Incandescenza	GLS	10÷150	220	14	1000
		150÷500	220	18	1000
	REFLECTOR	7÷80	220	14	1000
		80÷300	220	18	2000
	ALOGENE	5÷100	6÷24	18÷26	2000
		15÷150 500÷2000	220÷250 220÷250	18÷20 20÷25	2000

Luminanza media per lampade ad incandescenza tipo GLS o REFLECTOR da 200 a 700 cd/cm² e ad alogeni da 500 a 2.000 cd/cm²

Tabella 10: Caratteristiche delle lampade ad incandescenza

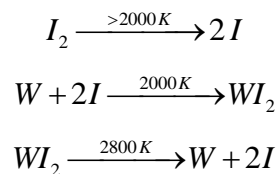
Dalla tabella è possibile calcolare il flusso luminoso nota l'efficienza luminosa e la potenza elettrica assorbita mediante la relazione:

$$\Phi = \eta \cdot W \quad (58)$$

3.8.2. LAMPADE ALOGENE

Nelle lampade ad incandescenza del tipo alogene si pone all'interno delle lampade dello iodio che si associa al tungsteno depositato sul bulbo (più freddo) e, per convezione termica, lo riporta sul filamento (caldo) dove, ad alta temperatura si dissocia.

Il ciclo dello iodio è il seguente:



Il vantaggio che si ottiene è duplice: da un lato lo iodio, mediante il suo ciclo di associazione-dissociazione, ricostituisce il filamento di tungsteno che man mano si assottiglierebbe per sublimazione, dall'altro, proprio per questa nuova possibilità di ripristinare il tungsteno sublimato, è possibile aumentare la temperatura del filamento in modo da innescare la reazione di dissociazione (a 2800 K).

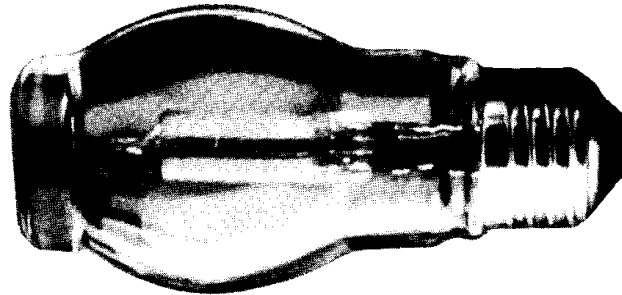


Figura 50: Lampada alogena

Questo secondo effetto porta ad una maggiore temperatura del colore (TC), ad una maggiore radiazione visibile (*lo spettro si sposta verso la zona del visibile*) e quindi l'efficienza luminosa di queste lampade è più elevata rispetto alle lampade normali raggiungendo anche 25 lm/W.

3.8.3. LAMPADE A LUMINESCENZA

In queste lampade si ha una scarica a valanga per effetto degli urti elastici ed anelastici che elettroni ed ioni di segno opposto subiscono nell'accelerazione fra gli elettrodi. L'emissione fotonica è di solito (almeno per lampade a bassa pressione a vapore di mercurio) di bassa lunghezza d'onda, nel campo dell'ultravioletto e quindi non visibile.

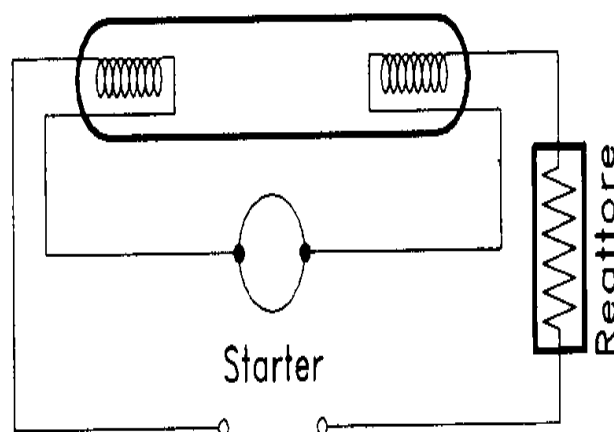


Figura 51: Schema di funzionamento di una lampada a luminescenza

Si utilizzano, pertanto, dei sali di fosforo, detti *fosfori*, che fungono da convertitori di lunghezza d'onda. Essi in pratica assorbono un fotone molto energetico e ne riemettono due o tre di minore energia ma nel visibile. In questo modo si ha l'effetto di *luminescenza* che è alla base di queste lampade.

La curva caratteristica, per un ampio intervallo di tensioni e correnti, è data in Figura 53.

Queste lampade necessitano di un **reattore** di stabilizzazione e di uno **starter** per l'avviamento.



Figura 52: Tipica lampada a luminescenza

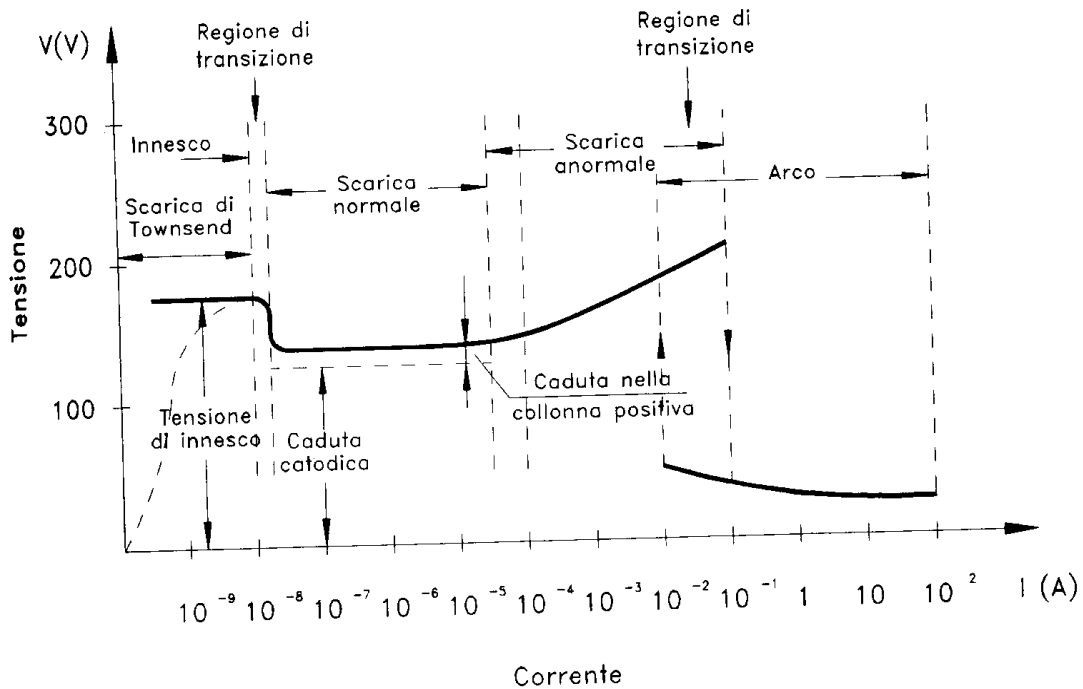


Figura 53: Curva caratteristica di una lampada a luminescenza

Il reattore serve a stabilizzare le lampade nella zona a destra della curva sopra indicata, dove si ha un andamento a pendenza negativa della curva. Si ricorda per una resistenza reale si può sempre definire un rapporto:

$$R = \frac{DV}{I} \quad (59)$$

Ma se la curva ha pendenza negativa allora il valore differenziale della resistenza ohmica è negativo e il componente si comporta come tendenzialmente instabile. Si osservi la Figura 54 che riporta la parte finale della curva caratteristica generale delle lampade a scarica nei gas. In un qualunque punto della curva (formata di due specie di archi con una zona di discontinuità) si può definire la resistenza R in base alla (59).

Essendo la pendenza negativa se ne ricava che ad un aumento della corrente occorrerebbe avere una diminuzione della tensione ai capi. Ciò non risulta possibile perché il generatore, elemento attivo che fornisce potenza, ha un comportamento ohmico e quindi al crescere della corrente fornisce anche una maggiore tensione. E viceversa.

Per bloccare il funzionamento della lampada si inserisce nel circuito una resistenza, nell'ipotesi di alimentazione in corrente continua, e pertanto per avere una caduta nei componenti passivi (lampada e resistenza) pari alla tensione V_0 applicata si deve polarizzare la lampada o nel punto A o nel punto B (unici punti di equilibrio).

Dei due punti evidenziati solo B è stabile: si vede, infatti, come un incremento di corrente porterebbe ad avere una somma delle cadute di tensioni maggiore della tensione disponibile e pertanto si ha una diminuzione della corrente che riporta indietro il sistema. Analogamente si ragiona per una diminuzione (a sinistra di B) della corrente.

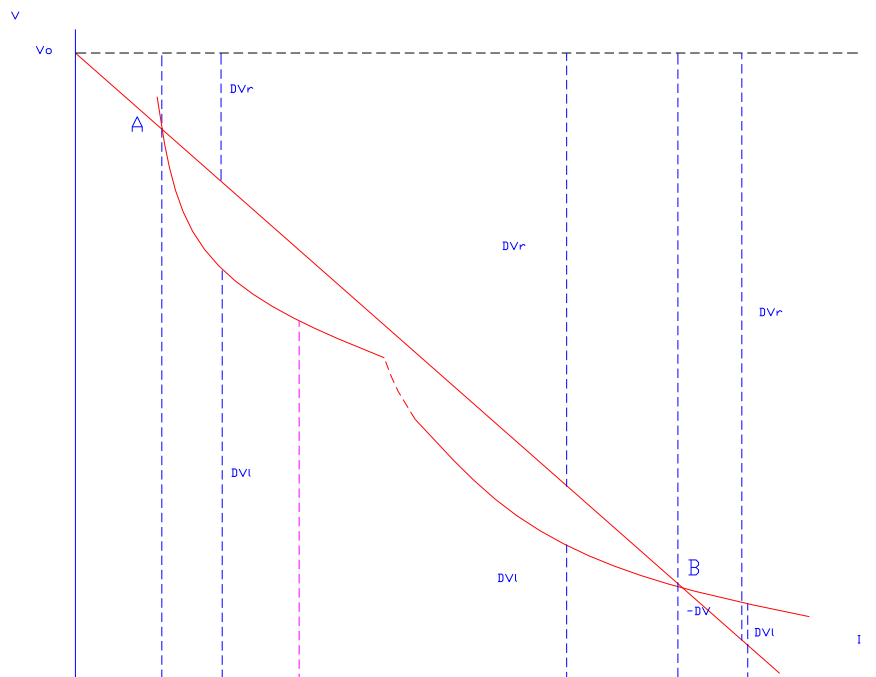


Figura 54: Polarizzazione di una lampada a luminescenza

La *polarizzazione*, quindi, pur stabilizzando la lampada porta ad avere una caduta di tensione supplementare e quindi anche un consumo di energia supplementare che va tenuto in conto nella progettazione degli impianti.

La polarizzazione in corrente alternata viene effettuata con un elemento reattivo, solitamente induttivo, detto **reattore** che non dissipa potenza attiva. Le lampade a luminescenza hanno buona efficienza luminosa, pari a circa 40 lumen/Watt. Le caratteristiche delle lampade commerciali sono riportate nella seguente Tabella 11. Si osservi che questo tipo di lampade non ha una buona resa cromatica a causa della distribuzione dello spettro luminoso ricco di righe nella zona del blu e assente di una componente continua a bassa lunghezza d'onda (rosso).

In **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** si hanno vari esempi di spettri per lampade a luminescenza. Si osservino le righe spettrali ben evidenti e il colore ad esse corrispondente (riportato in sottofondo). La componente continua è dovuta alla presenza di un filamento ad incandescenza. Le lampade a luce combinata, vedi **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** (a luminescenza e ad incandescenza) sono molto utilizzate per illuminazione commerciale poiché associano elevate efficienze e buone rese cromatiche ($R_a > 85$).

Senza la presenza della componente continua del filamento si avrebbe solo uno spettro a righe con valori di resa cromatica inferiore a 80. Nella tabella sono riportate anche le TCC spesso utilizzate come riferimento cromatico. Si osservi come queste sono di gran lunga più elevate di quelle delle lampade ad incandescenza essendo la luce a luminescenza bluastra.

Costruttori*	Prestazioni dei principali tubi fluorescenti 1° generazione - Ø 38 mm					
	T° K	R _a	20 _W 0,6 _m	40 _W 1,2 _m	65 _W 1,5 _m	
P, M	Comfort 27, comfort luxe	2700	95	700 lm	1750 lm	2800 lm
P, M	luce solare 32, incandia	3000	85	850	2100	3250
C	tono caldo	3000	55	1350	3200	
P	chroma solare 33	3000	85	1250	3200	5100
C	optima	3600	75	1100	3000	4900
C	rosa di Francia	3700	80	850	2100	
M	brillante luxe	3800	85	850	2100	3300
M	Aviva	3800	90	800	2000	3200
C	Bianco Z	3900	73	930	2450	3750
P	Brillante 34	4000	85	850	2100	3300
P	Chroma brillante 84	4000	85	1250	3200	5100
C, M, P	Bianco industria	4300	65	1150	3200	5100
M	Harmonia	5000	90	800	2000	3250
C	Luce diurna	5800	84	1000	2450	
M, P	Luce diurna 55	6500	92	800	2000	3300
P	Chroma diurna 86	6500	82	1150	3050	5000

Tubi di 2° generazione - Ø 26 mm

P chroma solare 83 TLD	}	3000	85	18 _W	36 _W	58
C Bianco 83				1400	3350	5300
M prestiflux BRL						
P chroma solare 84 TLD	}	4000	85	1400	3350	5300
C Bianco 84				1400	3350	5300
M prestiflux Incandia						
C Luce diurna 86		6000	85	1350	3200	5100

C : CLAUDE P : PHILIPS M : MAZDA

*Nota: Il riferimento è a tipi commercializzati in Europa nel 1988 non tutti presenti sul mercato italiano.

Tabella 11: Caratteristiche delle lampade a luminescenza



Figura 55: Lampada fluorescente compatta

3.8.4. LAMPADE A LUCE MISCELATA

Le lampade a luce combinata, vedi *Figura 57* (a luminescenza e ad incandescenza) sono molto utilizzate per illuminazione commerciale poiché associano elevate efficienze e buone rese cromatiche ($R_a > 85$, vedi **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). Senza la presenza della componente continua del filamento si avrebbe solo uno spettro a righe con valori di resa

cromatica inferiore a 80. Nella Tabella 11 sono riportate anche le TCC spesso utilizzate come riferimento cromatico. Si osservi come queste sono di gran lunga più elevate di quelle delle lampade ad incandescenza essendo la luce a luminescenza bluastra.

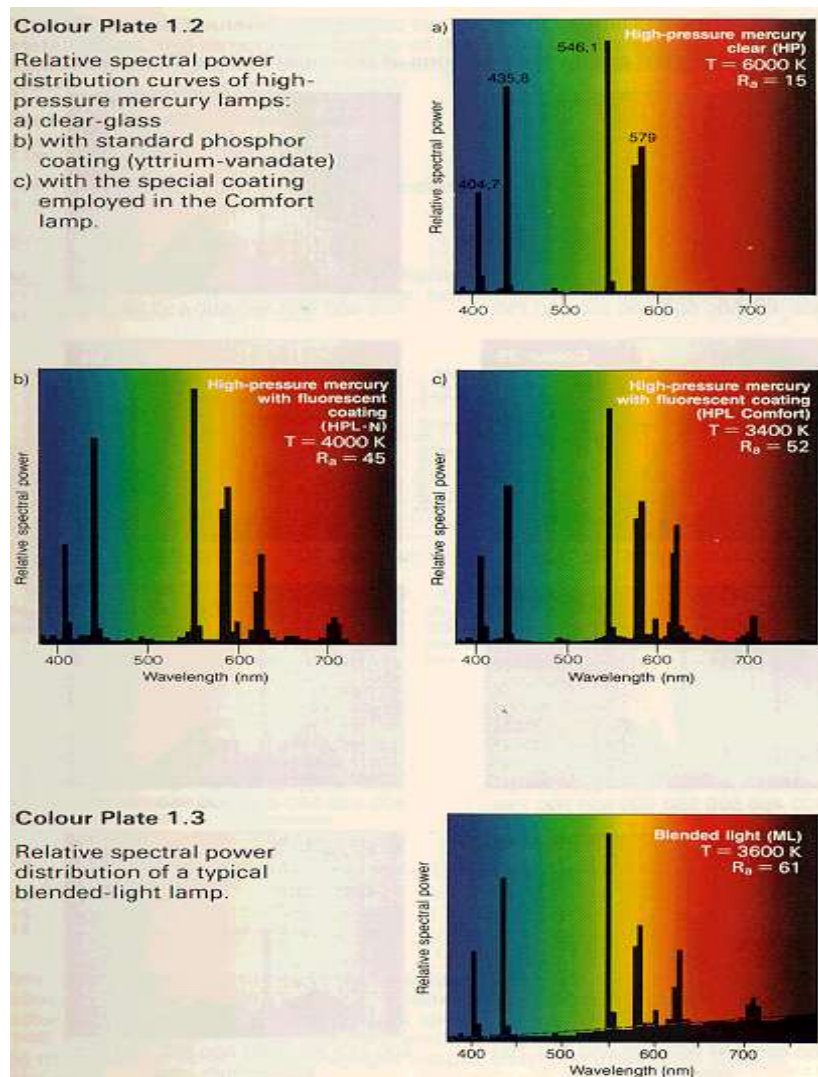


Figura 56: Spettri di lampade a luminescenza



Figura 57: Lampada a luce miscelata

3.8.5. LAMPADA A VAPORE DI MERCURIO AD ALTA PRESSIONE

Queste lampade sono del tipo a bulbo ed hanno una pressione elevata, rispetto a quelle a luminescenza, e tale da dar luogo ad uno spettro continuo per via dell'allargamento delle righe per

effetto *Compton*. Sono utilizzate nell'illuminazione stradale e pubblica in genere. Richiedono sempre un circuito di polarizzazione e di reattori ma compensano la maggiore complessità circuitale con buona efficienza e minore manutenzione.



Figura 58: Lampada a vapore di mercurio ad alta pressione

3.8.6. LAMPADE A VAPORI DI SODIO

Si tratta di lampade che utilizzano ioni di sodio al posto di quelli di mercurio. Sono costruite in modo da avere nello stesso corpo lampada una piccola lampada a vapore di mercurio che serve da innesco, cioè a portare ad alta temperatura il sodio in modo che possa vaporizzare e quindi innescare il proprio funzionamento.

Queste lampade emettono una luce a righe giallastre, come indicato in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** Hanno un'efficienza luminosa elevata (oltre 60 Lumen/Watt) e sono utilizzate molto nell'illuminazione stradale ove si richiede un servizio di illuminazione a basso costo e con un buon indice di contrasto. Queste lampade, infatti, consentono di distinguere bene gli oggetti e quindi sono efficaci per l'illuminazione negli svincoli stradali, in galleria e nei luoghi dove la sicurezza è elemento fondamentale di progetto pur con un'alterazione del colore.



Figura 59: Lampada a vapori di sodio

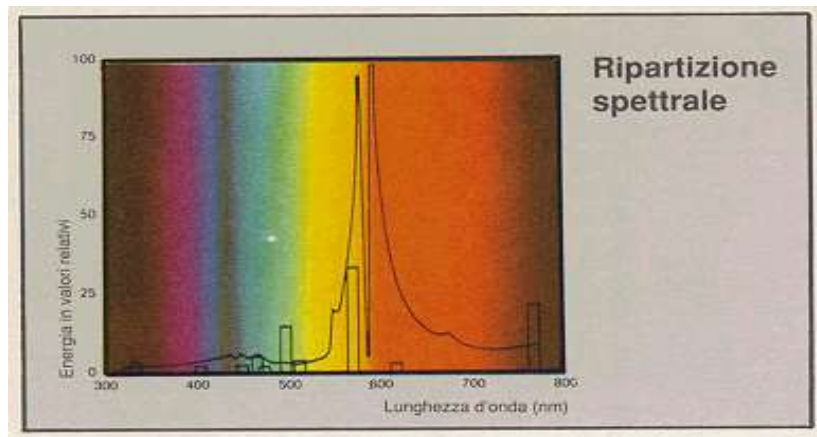


Figura 60: Distribuzione spettrale di lampade al sodio

3.8.7. LAMPADE AD ARGON

Con la stessa filosofia della lampade a scarica nei gas si hanno le lampade ad argon che raggiungono efficienze elevatissime (oltre 120 Lumen/Watt) e che pertanto sono utilizzate soprattutto per l'illuminazione di grandi spazi pubblici.

3.8.8. LAMPADE AD INDUZIONE

Sono le lampade di ultima generazione. Viene sfruttato il principio di ionizzazione senza elettrodi per produrre la scarica nei gas. Si utilizza un alimentatore elettronico ad alta frequenza che produce la ionizzazione tramite un accoppiamento induttivo all'interno della lampada.

Le radiazioni di alta frequenza vengono convertite in radiazioni visibili mediante fosfori posti all'interno della superficie esterna della lampada.

La tipologia costruttiva, senza fili, consente di avere una durata teorica di 60.000 ore, la temperatura di colore varia da 3000 K a 4000 K, la resa cromatica è $Ra=85$ e l'efficienza luminosa raggiunge i 65 Lm/W.

3.9. LAMPADE A LED

Nel 1907 Henry Joseph Round pubblicò una breve descrizione dell'effetto luminoso del diodo. Venti anni dopo Oleg Losev indagò il fenomeno e formulò una teoria in una pubblicazione russa.

I primi diodi ad emissione luminosa erano disponibili solo nel colore rosso. Venivano utilizzati come indicatori nei circuiti elettronici, nei display a sette segmenti e negli optoisolatori. Successivamente ne vennero sviluppati alcuni che emettevano luce gialla e verde e vennero realizzati dispositivi che integravano due LED, generalmente uno rosso e uno verde, nello stesso contenitore permettendo di visualizzare quattro stati (spento, verde, rosso, verde + rosso = giallo) con lo stesso dispositivo. Ora esistono LED i cosiddetti "bicolore" che integrano nello stesso package due diodi LED in antiparallelo, ciascuno di diverso colore, in questo modo per variare la colorazione del LED è sufficiente alimentarlo con polarità opposta. L'unico problema è che LED di colore diverso necessitano di correnti (I_f) diverse, per produrre una determinata intensità luminosa; quindi ad esempio, in un LED bicolore rosso / verde il verde avrà un'intensità luminosa minore di quella del rosso a parità di corrente.

Negli anni novanta vennero realizzati LED con efficienza sempre più alta e in una gamma di colori sempre maggiore fino a quando con la realizzazione di LED a luce blu fu possibile realizzare

dispositivi che potevano generare qualsiasi colore integrando tre diodi di colore rosso, verde e blu. Parallelamente è aumentata la quantità di luce emessa a livelli competitivi con quelli delle comuni lampadine. Nell'illuminotecnica il LED si configura come una tecnologia ad alta efficienza che garantisce un ottimo risparmio energetico.

LED sono un particolare tipo di diodi a giunzione p-n, formati da un sottile strato di materiale semiconduttore. Gli elettroni e le lacune vengono iniettati in una zona di ricombinazione attraverso due regioni del diodo drogate con impurità di tipo diverso, e cioè di tipo n per gli elettroni e p per le lacune.

Quando sono sottoposti ad una tensione diretta per ridurre la barriera di potenziale della giunzione, gli elettroni della banda di conduzione del semiconduttore si ricombinano con le lacune della banda di valenza rilasciando energia sufficiente sotto forma di fotoni. A causa dello spessore ridotto del chip un ragionevole numero di questi fotoni può abbandonarlo ed essere emesso come luce ovvero fotoni ottici. Può essere visto quindi anche come un trasduttore elettro-ottico.

Il colore o frequenza della radiazione emessa è definito dalla distanza in energia tra i livelli energetici di elettroni e lacune e corrisponde tipicamente al valore della banda proibita del semiconduttore in questione. L'esatta scelta dei semiconduttori determina dunque la lunghezza d'onda dell'emissione di picco dei fotoni, l'efficienza nella conversione elettro-ottica e quindi l'intensità luminosa in uscita. I LED possono essere formati da GaAs (arseniuro di gallio), GaP (fosfuro di gallio), GaAsP (fosfuro arseniuro di gallio), SiC (carburo di silicio) e GaInN (nitruro di gallio e indio).

Anche se non è molto noto, i LED colpiti da radiazione luminosa nello spettro visibile, infrarosso o ultravioletto, a seconda del LED utilizzato come ricevitore, producono elettricità esattamente come un modulo fotovoltaico. I LED di colore blu e infrarosso producono tensioni considerevoli. Questa particolarità rende possibile l'applicazione dei LED per sistemi di ricezione di impulsi luminosi. Intorno a questa proprietà sono stati sviluppati molti prodotti industriali come sensori di distanza, sensori di colore, sensori tattili e ricetrasmittitori. Nel campo dell'elettronica di consumo il sistema di comunicazione irDA.

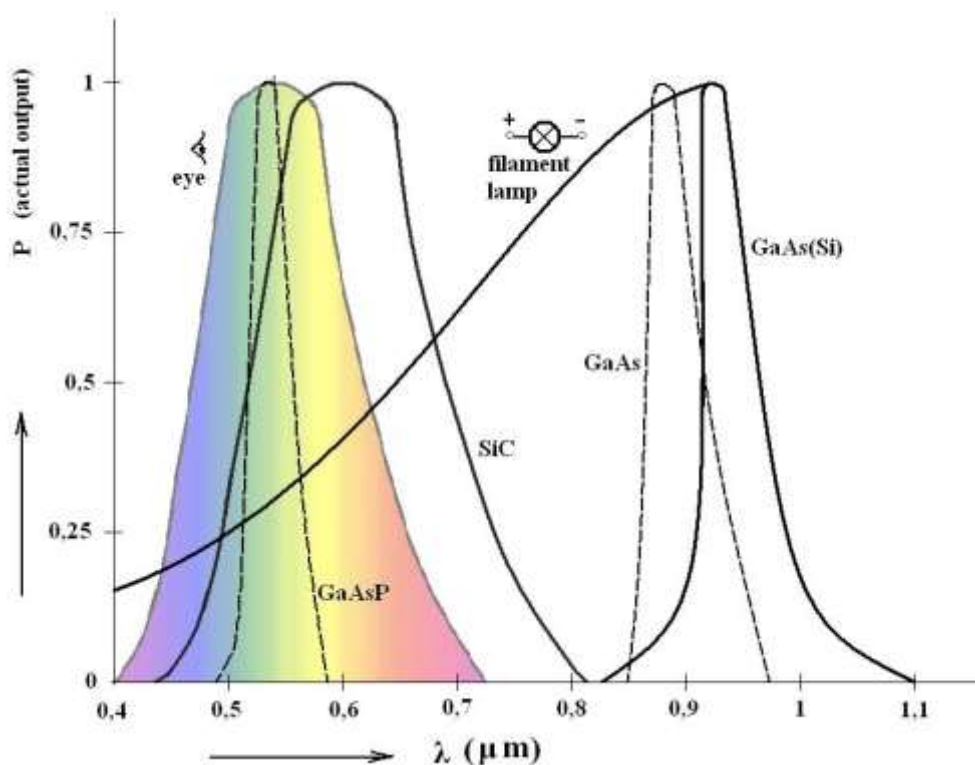


Figura 61: Spettro luminoso dei vari LED

È un buon esempio proprio perché sfrutta appieno questa particolarità. Il LED ha una durata molto variabile a seconda del flusso luminoso, della corrente di lavoro e della temperatura d'esercizio. Il led può avere un'emissione:

- Continua, il led emette costantemente luce.
- Intermittente, il led emette luce a intervalli di tempo regolari, effetto ottenibile con circuiti instabili o con led intermittenti.

Lo spettro luminoso dei led varia molto a seconda del led. Se il led è usato per illuminazione si ha generalmente una buona copertura del suo spettro, che può essere sfruttato anche al 100%; in altre applicazioni esistono led che emettono luce non visibile.

3.9.1. COLORE DELLA LUCE EMESSA DAI LED

A seconda del materiale utilizzato, i LED producono i seguenti colori:

- AlGaAs - rosso ed infrarosso
- GaAlP - verde
- GaAsP - rosso, rosso-arancione, arancione e giallo
- GaN - verde e blu
- GaP - rosso, giallo e verde
- ZnSe - blu
- InGaN - blu-verde, blu
- InGaAlP - rosso-arancione, arancione, giallo e verde
- SiC come substrato - blu
- Diamante (C) - ultravioletto
- Silicio (Si) come substrato - blu (in sviluppo)
- Zaffiro (Al₂O₃) come substrato - blu

La tensione applicata alla giunzione dei LED dipende dalla banda proibita del materiale che a sua volta determina il colore della luce emessa, come riportato nella seguente tabella:

Tipologia LED	Tensione di giunzione V_f (volt)
Colore infrarosso	1,3
Colore rosso	1,8
Colore giallo	1,9
Colore verde	2,0
Colore arancione	2,0
Flash blu/bianco	3,0
Colore Blu	3,5
Colore Ultravioletto	4 ÷ 4,5

Tabella 12: Tensione di giunzione per le tipologie di LED

L'esigenza di disporre di una discreta varietà di tonalità di colore in luce bianca, necessità prevalente nell'illuminazione all'interno degli edifici, ha indotto i costruttori a differenziare sensibilmente questi dispositivi in base alla temperatura di colore, così che sul mercato sono presenti dispositivi selezionati e suddivisi fino a 6 fasce di temperatura, che spaziano da 2700 K (tonalità "calda") a oltre 8000 K (luce "fredda").

3.9.2. EFFICIENZA ED AFFIDABILITÀ

I LED sono particolarmente interessanti per le loro caratteristiche di elevata efficienza luminosa A.U./A e di affidabilità.

I primi LED ad alta efficienza furono studiati dall'ingegnere Alberto Barbieri presso i laboratori dell'università di Cardiff (GB) nel 1995, caratterizzando le ottime proprietà per dispositivi in AlGaInP/GaAs con contatto trasparente di Indio e Stagno (ITO), gettando così le basi per l'alta efficienza.

L'evoluzione dei materiali è stata quindi la chiave per ottenere sorgenti luminose che hanno le caratteristiche per sostituire quasi tutte quelle ad oggi utilizzate.

Nei primi telefoni cellulari erano presenti nel formato più piccolo in commercio per l'illuminazione dei tasti. Attualmente, i più piccoli chip emissivi costituiscono la zona attiva dei LED denominati COB (Chip On Board), minuscole strisce di DIE disposte a matrice direttamente sul substrato del dispositivo, ne è un esempio il dispositivo Cree cxa2590 nella versione a 2700 K, il disco di 19 mm di diametro emette 6000 lumen con resa cromatica 95. Su alcuni modelli di autovetture e ciclomotori di nuova produzione sono presenti in sostituzione delle lampade a filamento per le luci di "posizione" e "stop". Sul mercato sono già presenti dispositivi sostitutivi diretti dei faretti e lampadine alogene, aventi identico standard dimensionale. Per l'illuminazione stradale sono disponibili lampioni analoghi ai tradizionali. La quantità di luce necessaria per ogni applicazione è realizzata con matrici di die in numero vario. Per esempio un dispositivo da 100 watt è realizzato disponendo 100 die da 1 watt in una matrice quadrata 10 X 10. La potenza massima raggiunta attualmente in un singolo dispositivo è di circa un Kilowatt.

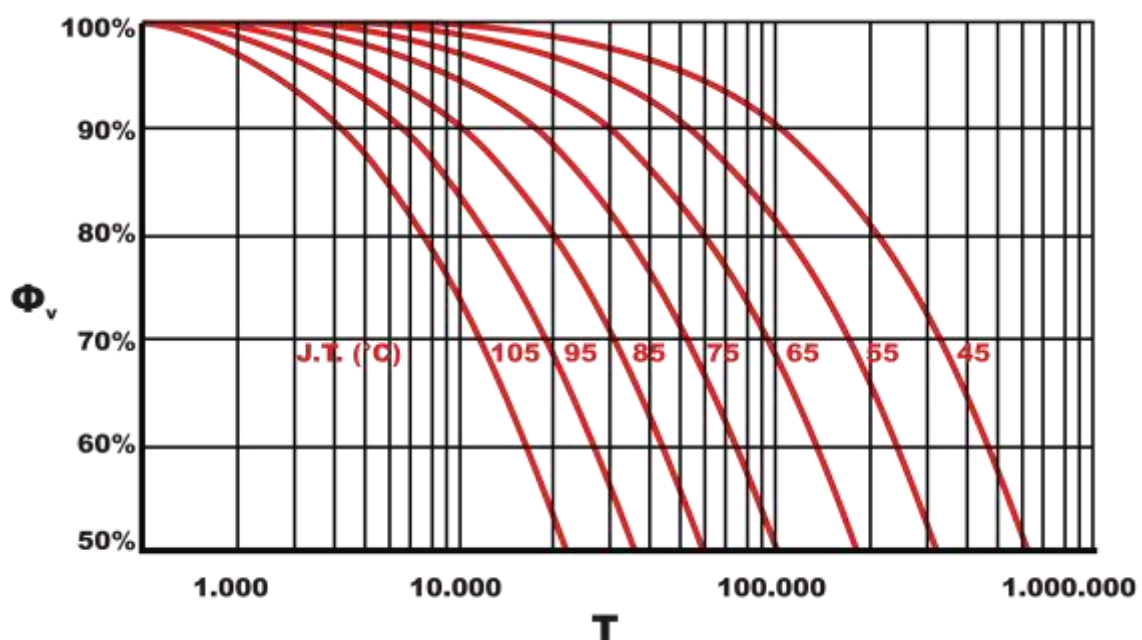


Figura 62: Durata in ore di un LED in base alla temperatura di giunzione ed il flusso luminoso

L'incremento di efficienza è in continuo aumento: il 13 febbraio 2013 il produttore Cree ha annunciato il raggiungimento di 276 lumen per watt in luce bianca, temperatura di colore di 4401 K[5], con il dispositivo Xlamp alimentato a 350 mA.

Un netto miglioramento, quasi una svolta sul piano dell'affidabilità, era già stato introdotto con il dispositivo MT-G, immesso sul mercato il 22 febbraio 2011 come diretto sostituto del faretto alogeno standard MR16. Per la prima volta la caratterizzazione dei parametri di questo LED è effettuata alla temperatura di 85 °C rispetto ai canonici 25 °C e nei successivi dispositivi i principali parametri sono riferiti ad entrambe le temperature.

3.9.3. ALIMENTAZIONE DEI LED

Il modo corretto di alimentare un LED è quello di fornire al dispositivo una corrente costante polarizzata, il cui valore è indicato dal costruttore nel relativo datasheet. Ciò si può ottenere utilizzando un generatore di corrente o più semplicemente ponendo in serie al LED un resistore di valore appropriato, col compito di limitare la corrente che vi scorre. In questo caso la potenza in eccesso viene dissipata in calore nel resistore di limitazione collegato in serie al led.

Questa soluzione, tecnicamente corretta dal punto di vista elettrico, penalizza l'efficienza del sistema e, data la variazione resistiva del sistema secondo la temperatura alla quale lavora, non garantisce con precisione al LED un flusso di corrente corrispondente alle specifiche del costruttore. Il valore di tensione presente ai capi del dispositivo, anch'esso dichiarato come specifica nominale di targa, è diretta conseguenza del valore di corrente fornito.

Allo stato attuale, torce portatili per uso professionale, speleologia, uso subacqueo, militare, o sport agonistico notturno usano LED montati meccanicamente anche a gruppi, con conseguenti correnti di alimentazione che possono raggiungere le decine di ampere. Per esempio il dispositivo singolo monochip con sigla SST-90 può assorbire fino a 9 ampere.

L'informazione più appropriata per l'utilizzo dei LED di potenza si ottiene dai datasheet del costruttore. In particolare il grafico che correla la corrente assorbita con la quantità di luce emessa (lumen), è il migliore aiuto per conoscere le caratteristiche del dispositivo.

Per i LED di tipo flash, per i quali come si è detto la corrente può variare tra 20 e 40 mA, i valori minimo e massimo della resistenza saranno 250 e 500 (valori standard 270 ohm e 470 ohm).

Poiché i LED sopportano una bassa tensione inversa (solo pochi volt), se vengono alimentati a corrente alternata occorre proteggerli ponendovi in parallelo un diodo con polarità invertita rispetto al LED ("antiparallelo"). Non è consigliabile inserire un diodo in serie per due motivi: in primo luogo la tensione di alimentazione dovrebbe essere superiore alla somma delle due tensioni di giunzione. In secondo luogo, nel caso di alimentazione invertita la tensione potrebbe ripartirsi sui due diodi in modo da superare comunque la tensione inversa sopportata dal LED.

In qualche caso si può usare un ponte di quattro diodi per assicurare che una corrente diretta scorra sempre attraverso il LED. In questo caso saranno sempre interessati due diodi e quindi la tensione d'alimentazione dovrà sempre essere superiore al doppio della tensione di giunzione.

Se si vuole alimentare un LED con la tensione di rete senza che il circuito dissipi troppa energia nella resistenza in serie, si può usare un circuito costituito da un condensatore collegato in serie ad una sezione, che consiste nel LED in parallelo ad un diodo di protezione, (con polarità invertita per limitare la tensione inversa) e al tutto seguirà ancora in serie, un resistore di protezione, che serve a limitare la scarica all'accensione. Il valore del resistore sarà un decimo della reattanza del condensatore alla frequenza di rete. Il valore della capacità del condensatore

dipenderà dalla reattanza (impedenza) che lo stesso dovrà presentare alla frequenza di rete per far scorrere la voluta corrente (I_f) nel LED.

La massima quantità di luce che può essere emessa da un LED è limitata essenzialmente dalla massima corrente media sopportabile, che è determinata dalla massima potenza dissipabile dal chip. I recenti dispositivi progettati per impieghi professionali hanno una forma adatta ad accogliere un dissipatore termico, necessario per smaltire il calore prodotto: sono ormai in commercio LED a luce bianca con potenza di 500 watt e oltre e corrente assorbita di 20 ampere [1]. Quando sono richieste potenze più elevate normalmente si tende a non usare correnti continue, ma a sfruttare correnti pulsanti con duty cycle scelto in maniera opportuna. Ciò permette un notevole incremento della corrente e quindi della luce, mentre la corrente media e la potenza dissipata rimangono nei limiti consentiti.

Gli alimentatori commerciali sono caratterizzati da tre parametri principali: potenza in W, corrente fornita in mA su una o più uscite, e tensione di uscita. La tensione di uscita non è fissa, ma è compresa tra un valore minimo e uno massimo, per garantire che la corrente si mantenga costantemente al suo valore nominale.

La tensione fornita dipenderà dal tipo di LED impiegati e dal loro numero. Essendo di norma i LED collegati in serie tra loro, la tensione sarà pari alla somma delle singole tensioni a regime ai capi di ciascun dispositivo. Un esempio pratico: ambiente dotato di 8 faretti con led da 700 mA, il datasheet indica 11.7 volt alla corrente di lavoro, posti in serie, $11.7 \times 8 = 93.6$, per fare accendere in modo corretto gli 8 faretti, occorre un alimentatore da 700 mA che fornisca 93.6 V in uscita mentre se i faretti fossero 7 dovrebbe fornire 81.9 V.

Si comprende quindi la necessità di disporre in uscita all'alimentatore di un range di tensione più ampio possibile, in modo da offrire sufficiente flessibilità nel progetto di illuminazione di ambienti. Nel nostro esempio a potenza di un singolo faretto è data da $700\text{mA} \times 11.7\text{V}$ e la potenza totale è $8.19\text{W} \times 8 = 65.2\text{W}$. Occorre scegliere un alimentatore di questa potenza o leggermente superiore, il range di tensione di uno degli alimentatori commerciali adatto a questo esempio spazia da 64 a 129 volt.

3.9.4. UTILIZZO DEI LED

I LED in questi anni si sono diffusi in tutte le applicazioni in cui serve:

- elevata affidabilità;
- lunga durata;
- elevata efficienza;
- basso consumo.
- Alcuni utilizzi principali sono:
 - telecomandi a infrarossi;
 - indicatori di stato (lampadine spia o standby);
 - retroilluminazione di display LCD;
 - semafori stradali;
 - dispositivi luminosi obbligatori di autovetture e motocicli;
 - lampeggianti dei veicoli d'emergenza di ultima generazione (ambulanze, carabinieri, polizia, ecc.);
 - cartelloni a messaggio variabile;

- Illuminazione;
- comunicazioni ottiche di breve distanza in sostituzione del più costoso laser;
- segnalazione degli ostacoli al volo (installazione su strutture particolarmente elevate, attraverso sistemi di sollevamento in quota di apparecchiature).

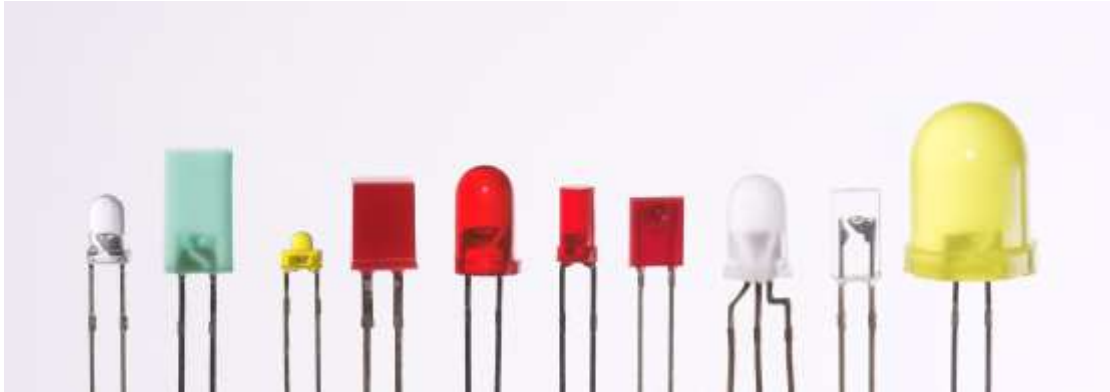


Figura 63: Tipologie di LED commerciali

3.9.5. UTILIZZO DEI LED NELL'ILLUMINAZIONE

I LED sono sempre più utilizzati in ambito illuminotecnico in sostituzione di alcune sorgenti di luce tradizionali. Il loro utilizzo nell'illuminazione domestica, quindi in sostituzione di lampade ad incandescenza, alogene o fluorescenti compatte (comunemente chiamate a risparmio energetico in quanto hanno una resa superiore), è oggi possibile con notevoli risultati, raggiunti grazie alle tecniche innovative sviluppate nel campo.

All'inizio della ricerca l'efficienza luminosa quantità di luce/consumo (lm/W), era stato calcolato nel rapporto minimo di 3 a 1, successivamente è migliorato moltissimo. Il limite dei primi dispositivi adatti ad essere impiegati in questo tipo di applicazione era l'insufficiente quantità di luce emessa (flusso luminoso espresso in lumen).

Questo problema è stato superato con i modelli di ultima generazione, abbinando l'incremento di efficienza alla tecnica di disporre matrici di die nello stesso package collegati tra loro in serie e parallelo o realizzando la matrice direttamente nel substrato del dispositivo. L'efficienza dei dispositivi attuali per uso professionale e civile si attesta oltre i 120 lm/W che però scendono attorno ai 80 lm/W in dispositivi a luce più calda. Per esempio il dispositivo Cree CXA3050 ha $R_a > 90$ e 2700K . Una lampada a incandescenza da 60 W alimentata a 220V , emette un flusso luminoso di circa 650 lumen.

Come termine di paragone basti pensare che una lampada ad incandescenza ha un'efficienza luminosa di circa $10\text{-}19 \text{ lm/W}$, mentre una lampada ad alogeni circa $12\text{-}20 \text{ lm/W}$ ed una fluorescente lineare circa $50\text{-}110 \text{ lm/W}$. Una minore facilità d'impiego nell'illuminazione funzionale rispetto alle lampade tradizionali è costituita dalle caratteristiche di alimentazione e dissipazione, che influiscono fortemente su emissione luminosa e durata nel tempo. Diventa comunque difficile individuare rapporti diretti tra le varie grandezze, tra le quali entra in gioco anche un ulteriore parametro, ovvero l'angolo di emissione del fascio di luce, che può variare in un intervallo compreso tra circa 4 gradi e oltre 120 , modificabile comunque tramite appropriate lenti poste frontalmente.

I produttori di LED sono produttori di semiconduttori, fabbriche di silicio, e le lampadine vengono prevalentemente prodotte da altri fabbricanti, pertanto vi è un certo ritardo tra la data di

immissione sul mercato di un nuovo dispositivo LED e la disponibilità sul mercato di una lampadina che lo utilizzi.

I vantaggi dei LED dal punto di vista illuminotecnico sono:

- durata di funzionamento (i LED ad alta emissione arrivano a circa 50.000 ore con una perdita del flusso luminoso del 10% max);
- costi di manutenzione-sostituzione ridotti;
- elevato rendimento (se paragonato a lampade ad incandescenza e alogene);
- luce pulita perché priva di componenti IR e UV (alta efficienza: nessuna parte dell'energia trasformata in luce è al di fuori dello spettro del visibile);
- facilità di realizzazione di ottiche efficienti di plastica;
- flessibilità di installazione del punto luce;
- possibilità di un forte effetto spot (sorgente quasi puntiforme);
- funzionamento in sicurezza perché a bassissima tensione (normalmente tra i 3 e i 24 Vdc);
- accensione a freddo (fino a -40 °C) senza problemi;
- assenza di mercurio;
- possibilità di creare apparecchi illuminanti di nuova foggia per via dell'impatto dimensionale ridotto;
- possibilità di regolare l'intensità luminosa (solo su alcuni modelli);
- minor calore generato nell'ambiente rispetto ad altre tecnologie per l'illuminazione.

Gli svantaggi sono:

- costi più alti;
- difficoltà nell'ottenere illuminazione diffusa (360°), superata solo recentemente grazie alla tecnologia a filamenti di LED.



Figura 64: LED per illuminazione stradale e ad alta intensità

3.9.6. SELEZIONE DEI LED

In effetti a ben guardare la risposta non è banale, perché negli ultimi tempi sono comparsi numerosi nuovi modelli prodotti dalle diverse case costruttrici. Cerchiamo allora di fare chiarezza

sulla situazione, esaminando i principali parametri su cui ci dobbiamo concentrare prima di acquistare la lampadina a LED.

In particolare, dovremo fare riferimento a:

- – Intensità luminosa;
- – Classe di Efficienza Energetica;
- – Temperatura di colore;
- – Indice di Resa Cromatica;
- – Lampadina non direzionale/direzionale;
- – Vita della lampada;
- – Numero di cicli di accensione/spegnimento ...

Si tratta di molte grandezze e sicuramente all'aumentare delle prestazioni, aumenterà anche il costo della lampadina. Dovremo allora trovare il giusto compromesso fra prestazioni e costi.

Va detto subito che, con l'entrata in vigore del Regolamento UE 1194/2012, a partire dal settembre di quest'anno, le lampadine a LED devono soddisfare specifici requisiti funzionali cui faremo in parte riferimento nel seguito dell'articolo. Molti modelli immessi nel mercato li soddisfacevano già in partenza.

3.9.7. CLASSE DI EFFICIENZA ENERGETICA

Anche il discorso sulla classe di efficienza energetica non è troppo complicato, almeno se ci limitiamo a interpretare il significato delle lettere senza andare ad approfondire come sia calcolato l'indice di efficienza energetica, noto anche come Energy Efficiency Index o EEI, da cui si ricava la classe stessa.

In linea generale, è bene sapere che oggi, per le lampadine in commercio, la classe di efficienza energetica parte dalla A++ per arrivare alla C. Infatti lampadine con efficienza inferiore non possono essere più commercializzate. Nonostante questo, la grafica della etichette riporta ancora le classi al di sotto della C.

Per essere più precisi, dal settembre 2013 ci troviamo due tipi di etichette energetiche, per effetto dell'entrata in vigore delle disposizioni del Regolamento UE 874/2012, che hanno previsto l'introduzione della nuova etichetta energetica per le lampadine entrate in commercio dopo questa data. Ciò significa che ci troviamo di fronte alla coesistenza fra una vecchia etichetta energetica, per le lampadine immesse sul mercato prima del settembre 2013 e una nuova etichetta. Vediamo allora quali sono le principali differenze.

La nuova etichetta ha invece introdotto le classi A++ e A+, per rendere conto del miglioramento in efficienza delle tecnologie di illuminazione occorso negli ultimi anni. Nella nuova etichetta, inoltre, nella parte più alta, contrassegnata con i simboli I e II, vengono indicati il modello e il produttore.

Nella parte bassa troviamo invece una differente modalità di indicazione dei consumi e delle prestazioni della lampadina. A sinistra, vengono indicati sia l'intensità di emissione luminosa (espressa in lumen), sia la potenza consumata, sia la durata nominale della lampadina.

Nella nuova etichetta viene riportato solo il consumo annuo stimato per 1000 h di utilizzo. A pensarci bene questo è del tutto equivalente alla potenza in W riportata nella vecchia etichetta, dato che dividendo 1 kWh per mille ore, si ottiene appunto un W.

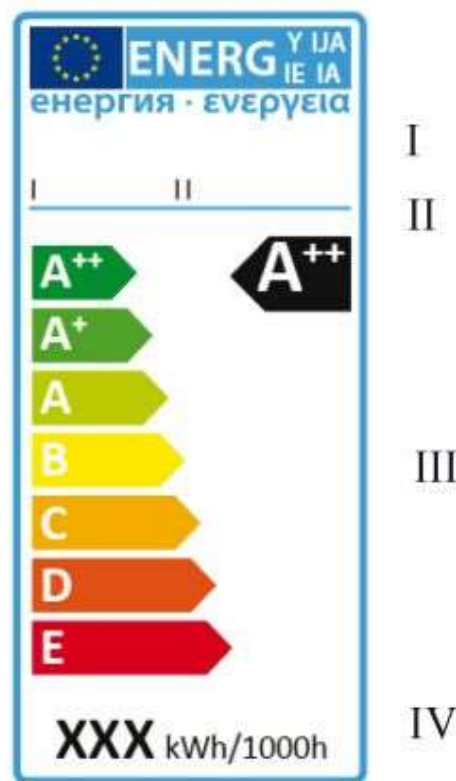


Figura 65: Nuova Etichetta Energetica delle lampadine

Ciò significa che la nuova etichetta riporta meno informazioni (intensità luminosa, vita utile) rispetto a quella vecchia, per cui dovremo andarci a leggere le altre caratteristiche nella confezione del prodotto.

Per quanto riguarda le tecnologie disponibili sul mercato, possiamo riconoscere che:

- – le lampadine alogene (dette anche “a incandescenza migliorata”), sono in classe D o C;
- – le lampadine fluorescenti compatte (*Compact Fluorescent Lamp* o *CFL*), sono in classe B o A;
- – lampadine a LED, sono in classe A, A+ o A++;

Quindi sappiamo già che, quando andremo ad acquistare una lampadina a LED, ci troveremo a scegliere fra le migliori tecnologie disponibili in termini di efficienza luminosa.

3.9.8. INDICE DI RESA CROMATICA PER LE LAMPADE A LED

L’*indice di resa cromatica*, o *Color Rendering Index (CRI)* esprime la capacità di una fonte di illuminazione di restituire i colori “*naturali*” degli oggetti illuminati. Per naturali si vuole indicare come ci appaiono i colori quando sono illuminati da una fonte luminosa di riferimento, che, per semplificare il discorso e rendere l’idea, diciamo che è rappresentata dalla luminosità diffusa offerta dal sole in una giornata di cielo sereno.

A questo proposito, le luci a LED di colore bianco caldo offrono tipicamente un CRI > 80, ritenuto più che adatto in contesti abitativi a rendere bene i colori (anche se non raggiungerà mai i valori di una lampadina a incandescenza, che presenta uno spettro di emissione luminosa molto più “denso” e raggiunge valori di CRI prossimi a 100). Le luci a led a bianco freddo tendono ad avere valori del CRI più bassi.

Inoltre, il nuovo Regolamento UE 1194/2012, ha previsto che, per le nuove lampadine a LED immesse sul mercato e non destinate all'uso esterno, sarà obbligatorio un CRI>80.

Ovviamente, quando compriamo la nostra lampadina a LED per il nostro salotto o per illuminare la tavola da pranzo, dobbiamo fare attenzione che sia una lampadina non direzionale. Una lampada direzionale è una lampada che presenta almeno l'80% dell'emissione luminosa entro un angolo di 120°, viceversa per una non direzionale.

Ciò significa che le lampadine non direzionali consentono una illuminazione più diffusa dell'ambiente circostante.

3.10. APPARECCHI ILLUMINANTI

Le lampade sono raramente utilizzate nude. Esse vengono inserite in opportuni *apparecchi illuminanti* che hanno lo scopo di modificare (anche sensibilmente) *le caratteristiche illuminotecniche delle stesse lampade*.

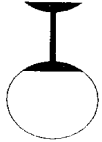
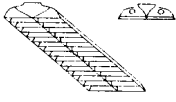
Sfera diffondente per lampada ad incandescenza	CURVA FOTOMETRICA	Riflettore metallico smaltato con alette lampada fluorescente	CURVA FOTOMETRICA
	35 1/2 % ↑ 45 % ↓		23 1/2 % ↑ 57 % ↓
Lampadario ad anelli concentrici con lampada ad incandescenza tipo BOWL	83 % ↑ 3 1/2 % ↓	Apparecchio con illuminazione semidiretta con doppia lampada fluorescente	39 % ↑ 32 % ↓
Riflettore smaltato con lampada ad incandescenza	0 % ↑ 83 1/2 % ↓	Apparecchio come sopra ma con riflettore superiore	6 % ↑ 46 % ↓
Faretto ad incasso con lampada tipo PAR	0 % ↑ 68 1/2 % ↓	Apparecchio a distribuzione bilaterale "batwing" con lampada fluorescente	0 % ↑ 60 % ↓
Apparecchio a fascio largo con lampada a luce fredda	0 % ↑ 53 1/2 % ↓	Plafoniera a quattro lampade fluorescenti con riflettore superiore	0 % ↑ 46 % ↓
Riflettore da interno con lampada ad alta intensità di scarica	1 1/2 % ↑ 77 % ↓	Apparecchio con lampada fluorescente per illuminazione indiretta	66 % ↑ 12 % ↓

Figura 66: Tipologia dei diffusori

Ogni lampada è caratterizzata dal **solido fotometrico** (cioè dalla distribuzione spaziale dei vettori intensità luminosa). *I corpi illuminanti modificano proprio il solido fotometrico delle lampade* in modo da soddisfare le esigenze progettuali per l'impiantistica illuminotecnica.

Ad esempio possono direzionare il flusso luminoso solo in una direzione e con una modesta dispersione angolare (*fari, proiettori*), ovvero possono direzionare il flusso luminoso in più direzioni con limiti angolari precisi (ad esempio i corpi illuminanti per illuminazione stradale hanno angoli di emissione limite fissati dalle norme, detti angoli di *cut-off*).



Figura 67: Corpo illuminante per lampade a luminescenza

I corpi illuminanti possono ospitare più di una lampada e possono anche *filtrare* la radiazione emessa mediante opportuni schermi filtranti. I corpi illuminanti possono avere o non *lenti direzionali* e in alcuni casi (vedi le lampade scialitiche utilizzate negli ospedali) si hanno vetri stratificati a curvatura multipla per ridurre lo spazio occupato. In pratica gli *apparecchi illuminanti* adeguano le lampade alle esigenze dell'illuminazione.

Ciò che non può essere modificata è la natura dello spettro luminoso (*continuo* per le lampade ad incandescenza e *a righe* per le lampade a luminescenza) e di questo si deve tenere conto nella progettazione degli impianti di illuminazione.

3.10.1. TIPOLOGIA DEI DIFFUSORI

I diffusori o corpi illuminanti modificano il solido fotometrico delle lampade che ospitano. Di solito essi orientano il flusso:

- prevalentemente verso il basso;
- prevalentemente verso l'alto;
- in entrambe le direzioni.

In corrispondenza del tipo di solido fotometrico si hanno tre tipologie di illuminazione:

- illuminazione diretta;
- illuminazione indiretta o diffusa;
- illuminazione semidiretta o semi indiretta.

Nelle figura si possono vedere a lato le percentuali di flusso orientato nella varie direzioni al variare del corpo illuminante.

4. IMPIANTO DI ILLUMINAZIONE

In questo capitolo si vedranno alcune metodologie semplificate per il progetto degli impianti di illuminazione a luce artificiale. Si tenga presente che oggi si hanno numerosi programmi di calcolo che consentono di effettuare una progettazione integrale che tiene conto di tutti i parametri geometrici e illuminotecnici disponibili.

Scopo dell'illuminazione artificiale é di rendere visibile all'osservatore quanto lo circonda in condizioni di luce naturale carente o nulla e di favorire il suo compito visivo facilitando la rapidità e l'accuratezza con cui gli oggetti vengono percepiti. Questo requisito si colloca tuttavia all'interno di un'esigenza più generale definibile come comfort o benessere visivo.

Si tratta infatti non solo di assicurare al soggetto una facile e rapida funzione visiva ma anche di rendere complessivamente gradevole e attraente l'ambiente dal punto di vista della illuminazione, ossia di caratterizzare luministicamente il locale e/o i suoi oggetti e procurare all'osservatore una sensazione di soddisfazione e di consenso.

4.1. L'AMBIENTE INTERNO ILLUMINATO ARTIFICIALMENTE

Il comfort stesso, per quanto categoria molto ampia, che riunisce in sé molti requisiti e finalità, non é l'unico obbiettivo della progettazione.

Oltre a questo si impongono ulteriori esigenze quali la flessibilità dell'impianto -perché si possa adattare a esigenze che mutano nel tempo-, la contemporanea fruibilità del locale da parte di soggetti diversi chiamati a compiti visivi diversi, gli effetti che si vogliono creare, l'immagine che si vuole trasmettere, la sicurezza globale, il risparmio energetico, i limiti di spesa etc.

Per soddisfare tutte queste esigenze è necessaria una assennata e ragionevole mediazione, il che rende il lavoro di progettazione illuminotecnica - come del resto quello della progettazione in genere- un'arte oltre che una scienza. Il compito visivo, il tipo di utenza, l'uso del locale, il tono dell'ambiente, condizionano il tipo di scelte da fare.

Per potersi orientare, conviene classificare in due grandi categorie le tipologie impiantistiche: l'illuminazione primaria e l'illuminazione secondaria.

Con l'**illuminazione primaria** si creano i requisiti illuminotecnici essenziali e le buone condizioni di visibilità mediamente in ogni punto del locale. Essa comprende gli :

- *impianti di illuminazione generale* : destinati a fornire luce su aree molto vaste e con un certo grado di uniformità (per es. grandi magazzini, locali pubblici, ambienti industriali etc.). Tali impianti sono dimensionati per il compito visivo più gravoso tra quelli che si svolgono nel locale, realizzati con apparecchi prevalentemente a luce diretta o diretta più diffusa e disposti in file equidistanziate o in maglie regolari. La distribuzione tendenzialmente uniforme della luminanza tende a conferire un carattere freddo e impersonale all'ambiente servito.
- *impianti di illuminazione localizzata* : usati quando si vuole esaltare l'illuminamento sulle aree in cui si svolge il compito visivo. Ciò si ottiene con apparecchi a luce diretta, puntati sulle aree di lavoro e orientati opportunamente in modo da evitare ombre marcate, riflessioni fastidiose e abbagliamento. Gli impianti di illuminazione localizzata solitamente si accompagnano a impianti di illuminazione generale onde assicurare che fuori dalle zone di lavoro l'illuminamento sia non inferiore al 50% di quello richiesto per il compito visivo. Attraverso il gioco delle luminanze così generato, é possibile creare ambienti luministicamente più vari e atmosfere più vive e dinamiche.

All'**illuminazione secondaria** si ricorre quando dalla luce si vuole ottenere qualcosa di più che condizioni di normale visibilità. Viene usata per creare particolari atmosfere, per generare messaggi, promuovere una certa immagine, esaltare un oggetto o un particolare, creare effetti luministici insoliti e drammatici (teatro, vetrine, musei, etc.) esaltare le forme e/o la natura di oggetti o materiali.

Si distinguono le seguenti forme di illuminazione secondaria:

- *Illuminazione d'accento*. É quella mirata ad esaltare la presenza di un oggetto o gruppi di oggetti e richiamarvi l'attenzione dell'osservatore. La illuminazione d'accento é largamente usata nelle vetrine espositive, nei musei, nelle esposizioni etc. Si ottiene con lampade a luce diretta, con fascio luminoso più o meno concentrato e con ottima resa del colore. Il contrasto di luminanza qui é l'effetto cercato e serve a sottolineare la presenza esclusiva dell'oggetto. Nella illuminazione d'accento rientra anche quella a volte citata come *Illuminazione decorativa o artistica*
- *Illuminazione d'effetto*. Interessa prevalentemente i locali chiusi, e quindi l'ambiente nel suo complesso. Consiste nel "disegnare con la luce", creando effetti luministici su qualche parete, per es. proiettandovi strisce o macchie di luce con funzione decorativa, quasi in alternativa ad altri elementi d'arredo, o inondando di luce qualche superficie di colore o natura particolare, che a sua volta rifletta producendo l'effetto coloristico o luministico voluto.
- *Mood Lighting*. Non si tratta di una vera tecnica di illuminazione, ma consiste nel creare con la luce il tono giusto, l'atmosfera adatta alle esigenze del momento. In un edificio residenziale qualche ambiente può per esempio, secondo le circostanze, servire da stanza di rappresentanza o per l'ordinaria vita domestica. In un ristorante, a seconda che sia di giorno o di sera, al fine di creare condizioni di volta in volta adatte a colazioni di lavoro, riunioni conviviali o atmosfere raccolte e intime, si necessita di un livello di illuminamento diverso e di diverso tipo di luce. Il *Mood Lighting* consiste nell'adattare la luce a queste varie circostanze.

· *Illuminazione architettonica* É quella modellata su una struttura o complesso architettonico, al fine di evidenziarne, anche a distanza, le forme e i volumi (più che i colori). L'illuminazione va fatta collocando gli apparecchi fuori dalla vista dell'osservatore e dosando sapientemente il gioco di luci e ombre per esaltare la dimensione spaziale della struttura.

É chiaro che realizzare di volta in volta l'illuminazione più adatta richiede una serie di conoscenze, esperienza, sensibilità, metodologie di analisi, strumenti di calcolo, dati di riferimento che é impossibile trovare tutte insieme in una persona o in un libro. A ciò aggiungi che spesso il problema sconfinava nella pura creazione artistica.

Quello che é possibile fare in questa sede é la presentazione in forma sintetica di alcuni metodi classici per la determinazione del numero di corpi illuminanti, necessari ad assicurare un assegnato livello di illuminamento medio in ambiente, e successivamente alcuni approcci avanzati, tipici del calcolo automatico per la verifica illuminotecnica, in forma più puntuale e rigorosa. Si lascia quindi al progettista il compito della sintesi tra obiettivi da raggiungere, approcci di calcolo adottati, fattibilità tecnico-economica etc.

C'è al più da ricordare che in tema di progettazione illuminotecnica in questo ultimo quarto di secolo molti progressi sono stati fatti. Si é acquisito un patrimonio cospicuo di conoscenze e di esperienze, sia in fatto di tecnologie delle lampade che di filosofia d'impianto; sono stati attivati diversi Organismi nazionali e internazionali per la emanazione di raccomandazioni tecniche intese alla corretta concezione e realizzazione degli impianti; é maturata una conoscenza dei requisiti di base del comfort visivo, a beneficio del progettista che ora può assumere tali requisiti alla base del calcolo o utilizzarli per la verifica delle soluzioni indagate.

E infine la disponibilità di calcolatori a basso costo che non solo hanno consentito maggiore rapidità e precisione di calcolo, ma hanno stimolato nuovi metodi di analisi e possibilità di indagine.

4.2. PROCEDURE DI CALCOLO

I metodi globali sono quelli di più antica formulazione, sono di facile e rapido impiego e adatti al calcolo manuale. Essi consentono di determinare l'illuminamento medio sul piano di lavoro in funzione delle caratteristiche geometriche del locale, delle proprietà riflettenti delle pareti e delle caratteristiche ottiche dei corpi illuminanti. I metodi qui presentati sono sostanzialmente due: il *metodo del fattore di utilizzazione* e il *Basic Method CIE*. Il primo metodo si fonda sulla determinazione del fattore di utilizzazione, definito come rapporto tra il flusso che ricade sul piano di lavoro e quello effettivamente emesso dagli apparecchi.

Il metodo verrà presentato in due versioni: quella più approssimata e rapida ed una più rigorosa. La prima, che presso taluni Autori prende anche il nome di *metodo del flusso totale*, fornisce il coefficiente di utilizzazione sulla base di una classificazione dei corpi illuminanti per grandi categorie, definite solo sulla base di generica somiglianza del solido fotometrico. La seconda é quella più rigorosa e articolata, nota come *Metodo BZ*, proposto dalla IES nel 1971, e caratterizzata dal fatto che i corpi illuminanti vengono classificati con un criterio più razionale e controllabile.

Oggi tuttavia gran parte delle Case costruttrici di apparecchiature illuminotecniche forniscono direttamente i coefficienti di utilizzazione dei singoli apparecchi. In ogni caso con questo metodo é possibile solo ottenere il flusso luminoso complessivamente richiesto per assicurare un assegnato illuminamento sul piano di lavoro o, che é lo stesso, il numero di corpi illuminanti.

Il *Basic Method CIE*, formulato nel 1978, parte invece da una approssimazione più precisa del flusso emesso dall'illuminante e giunge a determinare, per dato numero e tipo di apparecchi, l'illuminamento che compete al piano utile, alle pareti e al soffitto. In alternativa, assegnati questi ultimi, il metodo fornisce il numero di lampade necessarie. Com'è chiaro c'è una successione storica nella formulazione di questi metodi che corrisponde a una progressione nel grado di attendibilità conseguita.

Prima di passare alla enunciazione delle procedure di calcolo nei vari casi, è necessario premettere alcune formulazioni fondamentali.

4.3. METODI DI CALCOLO GLOBALI

Si tratta di metodi che cercano di calcolare il flusso utile mediante considerazioni geometriche globali. Essi si contrappongono ai metodi numerici a *tracciamento di raggi* (*ray tracing*) con i quali si simula il percorso di vari raggi luminosi dalla sorgente al piano di lavoro. Saranno esaminati nel prosieguo.

4.3.1. CALCOLO DEL FLUSSO CIRCOLANTE

Com'è noto, nel caso degli ambienti chiusi, l'illuminamento sul piano di lavoro è dovuto al contributo del flusso luminoso diretto e del flusso riflesso. Per correlare tra loro il flusso luminoso globale, l'illuminamento, e le caratteristiche geometriche e ottiche del locale conviene riferirsi al semplice caso della sfera cava, dotata al suo interno di un corpo illuminante in grado di emettere il flusso globale Φ_o (sfera di Ulbricht). Su ogni elemento di superficie della sfera il flusso totale circolante è dato da :

$$\Phi_{circ.} = \Phi_{dir.} + \Phi_{ind.}$$

Sull'intera superficie interna A_{tot} della sfera il flusso diretto coincide col flusso globale Φ_o emesso:

$$\Phi_{dir} = \Phi_o$$

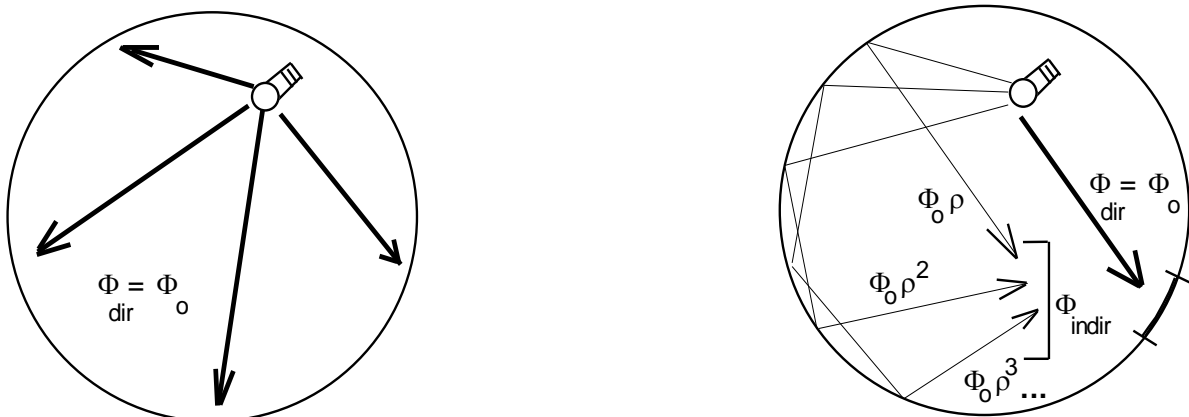


Figura 68: Flusso circolante nella Sfera di Ulbricht

Il flusso indiretto è il risultato di infinite riflessioni pertanto, detta ρ la riflettività, si ha, seguendo quanto già detto in precedenza per la sfera di Ulbricht:

$$\Phi_{ind.} = \Phi_o \rho + \Phi_o \rho^2 + \Phi_o \rho^3 + \Phi_o \rho^4 + \dots$$

$$\Phi_{ind.} = \Phi_o \rho (1 + \rho + \rho^2 + \rho^3 + \dots)$$

Ricordando lo sviluppo in serie geometrica si ha:

$$\Phi_{ind.} = \Phi_o \rho \frac{1}{1 - \rho}$$

per cui:

$$\begin{aligned} \Phi_{circ.} &= \Phi_{dir.} + \Phi_{ind.} = \Phi_o + \Phi_o \rho \frac{1}{1 - \rho} = \\ &= \Phi_o \frac{1}{1 - \rho} \end{aligned}$$

Infine:

$$E = \frac{\Phi_{circ.}}{A_{tot}} = \frac{\Phi_o}{A_{tot}} \frac{1}{1 - \rho}$$

Se la cavità non é sferica la relazione precedente può ancora essere utilizzata purché sussista il concetto di cammino libero medio del raggio luminoso. Ciò accade se nessuna delle superfici dell'ambiente ha dimensione e riflettività molto diversa da quella delle altre. In questo caso allora é lecito parlare di Illuminamento medio \bar{E} e riflettività media $\bar{\rho}$ per cui :

$$\bar{E} = \frac{\Phi_o}{A_{tot}} \frac{1}{1 - \bar{\rho}}$$

Da qui la formula per il calcolo del flusso richiesto per aversi l'illuminamento medio in un ambiente di riflettività media $\bar{\rho}$:

$$\Phi_o = \bar{E} A_{tot} (1 - \bar{\rho}) \quad (60)$$

La stessa espressione poteva ottenersi dal bilancio dell'energia luminosa in ambiente. Il flusso che l'apparecchio deve fornire deve eguagliare quello assorbito. Allora, detti $\alpha_1, \alpha_2, \dots$ gli assorbimenti delle pareti di superficie A_1, A_2, \dots , si ha :

$$\Phi_o = \alpha_1 (\Phi_{inc})_1 + \alpha_2 (\Phi_{inc})_2 + \alpha_3 (\Phi_{inc})_3 + \dots = \alpha_1 E_1 A_1 + \alpha_2 E_2 A_2 + \alpha_3 E_3 A_3 + \dots = \sum_k \alpha_k E_k A_k$$

Se é lecito approssimare l'illuminamento delle varie superfici E_k con un illuminamento medio \bar{E} , allora

$$\Phi_o = \bar{E} \sum_k \alpha_k A_k$$

Introdotta ora l'assorbimento medio

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_k \alpha_k A_k}{\sum_k A_k}$$

e poiché $\bar{\alpha} = 1 - \bar{\rho}$ risulta :

$$\Phi_o = \bar{E} A_{tot} \bar{\alpha} = \bar{E} A_{tot} (1 - \bar{\rho}) \quad (61)$$

che é la (60).

4.3.2. FATTORE DI MANUTENZIONE

La relazione (60) non é direttamente applicabile nei casi pratici perché non tiene conto di alcuni fattori che penalizzano la emissione luminosa. Questi sono attribuibili a:

- 1) guasto delle lampade (*LSF = Lamp Survival Factor*);
- 2) attenuazione del flusso luminoso per effetto dell'invecchiamento della lampada (*LLDF = Lamp Lumen Depreciation Factor*)
- 3) dello sporco delle superfici emittenti (*LMF = Luminaire Maintenance Factor*)
- 4) dello sporco delle superfici riceventi (pareti murarie) (*RSMF = Room Surface Maintenance Factor*).

L'effetto combinato di questi quattro fattori si esprime attraverso il prodotto

$$MF = LLMF \times LSF \times LMF \times RSMF$$

e prende il nome *Fattore di Manutenzione MF (Maintenance Factor)*. I valori raccomandati sono raccolti nelle Tabella 13, Tabella 14 Tabella 15 (da *Philips Lighting Manual, 1993*).

Ore di funzionamento (x1000)		0.1	1	2	4	6	12	18	24
Incandescenti	LLMF	1.00	0.93						
	LSF	1.00	0.50						
Fluorescenti. Trifosfori	LLMF	1.00	0.96	0.94	0.91	0.87	0.84		
	LSF	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.75		
Fluorescenti. Alofosfati.	LLMF	1.00	0.94	0.89	0.83	0.80	0.74		
	LSF	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.75		
Vapori di mercurio	LLMF	1.00	0.97	0.93	0.87	0.80	0.68	0.58	0.52
	LSF	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.88	0.75	0.50
Alogeni. metallici	LLMF	1.00	0.93	0.87	0.78	0.72	0.63	0.52	
	LSF	1.00	0.97	0.95	0.93	0.91	0.71	0.50	
Sodio alta pressione.	LLMF	1.00	0.98	0.96	0.93	0.91	0.87	0.83	0.80
	LSF	1.00	1.00	0.99	0.98	0.96	0.89	0.75	0.50

Tabella 13: Valori raccomandati per LLMF e LSF

Tempo trascorso tra due interventi di manutenzione (Anni)	0	0.5			1.0			2.0			3.0		
		P	N	S	P	N	S	P	N	S	P	N	S
Tipo di Luminaria													
Lampada nuda	1	0.95	0.92	0.88	0.93	0.89	0.83	0.89	0.84	0.78	0.85	0.79	0.73
Riflettore aperto superior.	1	0.95	0.91	0.88	0.90	0.86	0.83	0.84	0.80	0.75	0.79	0.74	0.68
Riflettore chiuso superiormente	1	0.93	0.89	0.83	0.89	0.81	0.72	0.80	0.69	0.59	0.74	0.61	0.52
Lamp. in riflettore chiuso trasparente	1	0.92	0.87	0.83	0.88	0.82	0.77	0.83	0.77	0.71	0.79	0.73	0.65

Lamp. in riflettore antipolvere	1	0.96	0.93	0.91	0.94	0.90	0.86	0.91	0.86	0.81	0.90	0.84	0.79
Flusso indirizzato superiormente	1	0.92	0.89	0.85	0.86	0.81	0.74	0.77	0.66	0.57	0.70	0.55	0.45

(°) P = Pulito; N = Normale ; S =Sporco

Tabella 14: Valori raccomandati per LMF

Tempo trascorso tra due interventi di manutenzione (Anni)		0.5			1.0			2.0			3..0		
	AMB (°)	P	N	S	P	N	S	P	N	S	P	N	
K (*)	Direzione del Flusso												
	Diretto	0.97	0.96	0.95	0.97	0.94	0.93	0.95	0.93	0.90	0.94	0.92	0.88
	Dir./Indiretta	0.94	0.88	0.84	0.90	0.86	0.82	0.87	0.82	0.78	0.84	0.79	0.74
0.7	Indiretto	0.90	0.84	0.80	0.85	0.78	0.73	0.81	0.73	0.66	0.75	0.68	0.59
	Diretto	0.98	0.97	0.96	0.98	0.96	0.95	0.96	0.95	0.94	0.96	0.95	0.94
	Dir./Indiretta	0.95	0.90	0.86	0.92	0.88	0.85	0.89	0.85	0.81	0.86	0.82	0.78
2.5	Indiretto	0.92	0.87	0.83	0.88	0.82	0.77	0.84	0.77	0.70	0.78	0.72	0.64
	Diretto	0.99	0.97	0.96	0.98	0.96	0.95	0.96	0.95	0.94	0.96	0.95	0.94
	Dir./Indiretta	0.95	0.90	0.86	0.92	0.88	0.85	0.89	0.85	0.81	0.86	0.82	0.78
5.0	Indiretto	0.92	0.87	0.83	0.88	0.82	0.77	0.84	0.77	0.70	0.78	0.72	0.64

(°) P = Pulito ; N =Normale ; S =Sporco

(*) $K = a b / h_m / (a+b)$ con a, b =dimensioni in pianta del locale ; h_m altezza di montaggio

Tabella 15:Valori raccomandati per RSMF

4.3.3. COEFFICIENTI DI RIFLESSIONE

Da misure globali dei coefficienti di rinvio eseguite impiegando luce bianca, si possono ricavare i valori raccolti nella Tabella 16 (Parolini - Paribeni, 1977) Tali dati sono utilizzabili per la luce diurna e per le sorgenti a incandescenza, ma possono perdere di attendibilità nel caso di illuminazione con lampade del tipo a scarica.

Intonaco comune bianco (latte di calce o simile)	0.8
Intonaco comune o carta molto chiara (avorio, giallo, grigio)	0.7
Intonaco comune o carta molto chiara (grigio perla, avorio, rosa chiaro)	0.6-0.5
Intonaco comune o carta di colore medio (verdino, azzurro, beige)	0.5-0.3
Intonaco comune o carta di colore scuro (verde oliva, rosso)	0.3-0.1
Pavimenti in tinta chiara	0.6-0.4
Pavimenti in tinta scura	0.2-0.1
Alluminio	0.8-0.9
Vernice bianca	0.5
Smalto bianco	0.6
Plastica chiara	0.55

Tabella 16: Coefficienti di riflessione per vari materiali di rivestimento delle pareti

4.3.4. METODO DEL FATTORE DI UTILIZZAZIONE

Ai fini del calcolo del flusso che la lampada deve emettere affinché sul piano di lavoro si abbia un assegnato illuminamento, é opportuno suddividere lo spazio che circonda il corpo emittente nelle 4 zone di emissione evidenziate in Figura 69. La zona 1 é interessata dal flusso diretto la cui efficacia dipende dall'altezza di montaggio h_m ; le altre zone emettono per riflessione, quindi la porzione di flusso che ne proviene dipende sia dalla riflettività delle pareti che dalle rispettive superfici. Si intuisce pertanto che il flusso luminoso sul piano utile é legato ai seguenti parametri:

- *Tipo di corpo illuminante* (solido fotometrico, armatura etc. ...);
- *Geometria del locale* ($a \times b$);
- *Altezza di montaggio* rispetto al piano utile h_m ;
- *Riflettività delle pareti*.

Il parametro che esprime questo legame é il *Fattore di Utilizzazione* definito come:

$$F_u = \frac{\text{Flusso luminoso incidente sul piano utile}}{\text{Flusso totale installato}}$$

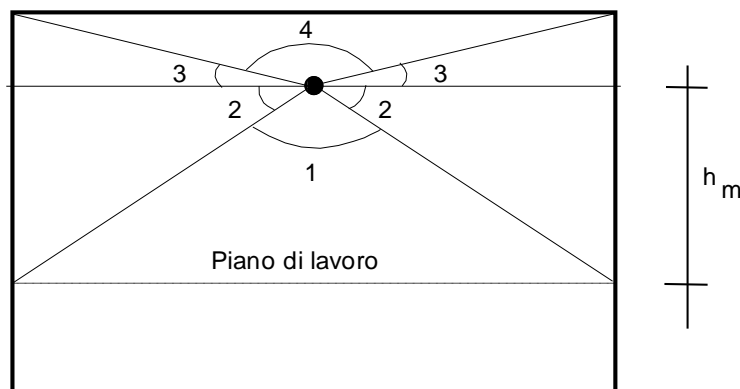


Figura 69: Sezione di riferimento del locale

Esso si deduce da apposite tabelle, come si dirà in seguito, in funzione dei parametri su menzionati. In particolare la geometria del locale e l'altezza di montaggio si possono compendiare nell'*indice del locale K* che va calcolato in base alle relazioni seguenti :

$$K = \frac{a b}{h_m (a + b)} \quad (62)$$

Il flusso richiesto si calcola infine dalla formula:

$$\Phi_u = \frac{\bar{E} A}{F_u MF} \quad (63)$$

dove :

\bar{E} = Illuminamento medio (lux)

A = Superficie del piano di lavoro ($a b$)

MF = Fattore di manutenzione

Il numero delle lampade si determina ovviamente dal rapporto: $N = \Phi_u / \Phi_{lamp}$, (Φ_{lamp} = Flusso della singola lampada).

La distribuzione delle lampade nel locale deve essere il più possibile uniforme.


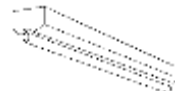
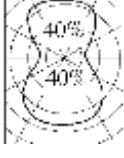
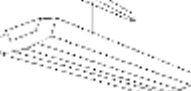
A tal proposito la CIE raccomanda che tra l'indice K del locale e il numero M di lampade in direzione longitudinale ed N in direzione trasversale, ci siano le corrispondenze espresse dalla Tabella 17.

Tabella 17: Valori di M e di N

Ka	0.6	0.8	1.0	1.25	1.50	2	2.5	3	4	5
M	2	2	3	3	4	4	5	6	8	10
N	1	2	2	3	3	4	4	4	5	6

Infine i valori del coefficiente di utilizzazione F_U in relazione al tipo di corpo illuminante, sono dati in Tabella 18 (da Sacchi - Cagliaris, 1990).

In essa vengono pure indicati, in intervalli discreti, i fattori di riflessione delle pareti (10%, 30%, 50%) e del soffitto (30%, 50%, 75%) e tra i quali é lecito interpolare; il fattore di manutenzione ($b =$ pulizia frequente, $m =$ mediocre, $n =$ scarsa) per ogni categoria di apparecchio, l'indice del locale ($A \div J$), e la relazione tra distanza minima (d) degli apparecchi tra loro e l'altezza ($h = h_m$) di montaggio.

Curva Fotometrica	Indice del locale	Fattore di utilizzazione								Fattore di manutenzione		
		b	m	n								
Illuminazione semidiretta $d = 1,1h$ 	0,50-0,70	0,28	0,22	0,18	0,26	0,21	0,18	0,20	0,17	Plafoniera nuda o con coppa diffondente  0,80 0,70 0,60		
	0,70-0,90	0,35	0,29	0,25	0,33	0,27	0,24	0,26	0,24			
	0,90-1,12	0,39	0,33	0,30	0,37	0,32	0,28	0,30	0,27			
	1,12-1,38	0,45	0,38	0,33	0,40	0,36	0,32	0,33	0,30			
	1,38-1,75	0,49	0,42	0,37	0,43	0,39	0,34	0,37	0,33			
	1,75-2,25	0,56	0,50	0,44	0,49	0,44	0,40	0,42	0,38			
	2,25-2,75	0,60	0,55	0,50	0,53	0,48	0,44	0,47	0,44			
	2,75-3,50	0,64	0,55	0,54	0,56	0,51	0,47	0,50	0,47			
	3,50-4,50	0,68	0,62	0,55	0,61	0,56	0,53	0,54	0,52			
4,50-6,00	0,70	0,65	0,62	0,65	0,62	0,60	0,55	0,57				
Illuminazione mista $d = 1,1h$ 	0,50-0,70	0,26	0,23	0,21	0,23	0,21	0,19	0,19	0,17	Diffusore  0,75 0,70 0,65		
	0,70-0,90	0,32	0,29	0,27	0,28	0,26	0,24	0,23	0,21			
	0,90-1,12	0,37	0,33	0,31	0,31	0,29	0,27	0,26	0,24			
	1,12-1,38	0,40	0,36	0,34	0,34	0,31	0,30	0,28	0,26			
	1,38-1,75	0,42	0,39	0,36	0,36	0,33	0,32	0,30	0,28			
	1,75-2,25	0,46	0,43	0,40	0,41	0,38	0,35	0,32	0,30			
	2,25-2,75	0,50	0,46	0,43	0,44	0,40	0,39	0,34	0,33			
	2,75-3,50	0,52	0,48	0,45	0,46	0,44	0,41	0,37	0,36			
	3,50-4,50	0,55	0,52	0,49	0,48	0,46	0,45	0,39	0,38			
4,50-6,00	0,57	0,54	0,51	0,49	0,47	0,46	0,42	0,41				
Illuminazione diretta $d = h$	0,50-0,70	0,35	0,32	0,28	0,37	0,32	0,28	0,31	0,28	Riflettore a fascio largo		
	0,70-0,90	0,46	0,42	0,38	0,46	0,41	0,38	0,41	0,38			



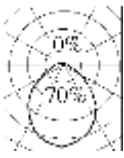

 Illuminazione diretta $d = 0,9h$	0,90-1,12	0,50	0,46	0,43	0,50	0,46	0,43	0,46	0,43	 0,75 0,65 0,55 Riflettore a fascio medio		
	1,12-1,38	0,54	0,50	0,48	0,53	0,50	0,47	0,49	0,47			
	1,38-1,75	0,58	0,54	0,51	0,56	0,53	0,50	0,52	0,50			
	1,75-2,25	0,62	0,55	0,56	0,60	0,58	0,56	0,55	0,56			
	2,25-2,75	0,67	0,64	0,61	0,65	0,63	0,61	0,62	0,61			
	2,75-3,50	0,69	0,66	0,63	0,67	0,65	0,63	0,64	0,62			
	3,50-4,50	0,72	0,70	0,67	0,70	0,68	0,66	0,67	0,66			
	4,50-6,00	0,74	0,71	0,69	0,72	0,70	0,68	0,65	0,67			
		0,50-0,70	0,35	0,32	0,30	0,35	0,32	0,30	0,32		0,30	 0,75 0,65 0,55
		0,70-0,90	0,43	0,39	0,37	0,42	0,39	0,37	0,39		0,37	
0,90-1,12		0,48	0,45	0,42	0,47	0,44	0,42	0,43	0,41			
1,12-1,38		0,53	0,50	0,47	0,52	0,49	0,47	0,48	0,46			
1,38-1,75		0,57	0,53	0,50	0,55	0,52	0,50	0,52	0,50			
1,75-2,25		0,61	0,57	0,55	0,55	0,57	0,54	0,56	0,54			
2,25-2,75		0,64	0,61	0,55	0,62	0,60	0,55	0,55	0,57			
2,75-3,50		0,66	0,63	0,61	0,63	0,61	0,60	0,61	0,55			
3,50-4,50		0,68	0,66	0,63	0,66	0,64	0,63	0,63	0,62			
4,50-6,00		0,69	0,67	0,66	0,67	0,66	0,64	0,65	0,63			

Tabella 18: Fattori di Utilizzazione

4.4. IL COMPORTAMENTO DEI CORPI COLPITI DA RADIAZIONI LUMINOSE

I corpi colpiti da radiazioni luminose, reagiscono mediante la *trasmissione*, la *riflessione* e l'*assorbimento*. Si parla di *trasmissione* quando i corpi (trasparenti) lasciano passare parte della radiazione incidente.

Si chiama *fattore di trasmissione* il rapporto tra la luce trasmessa e quella incidente. La *riflessione* avviene in modo speculare o diffuso a seconda della asperità.

Si chiama coefficiente di riflessione della superficie il rapporto tra il flusso riemesso da una superficie ed il flusso incidente sulla stessa.

$$cr = \frac{\phi_r}{\phi_i} \quad [64]$$

quando la superficie riflettente presenta una scabrosità contenuta entro limiti di grandezza paragonabili a quelli delle onde incidenti (10^{-3} - 10^{-4} mm per luce visibile) si verifica la riflessione speculare.

Se le asperità superano i limiti in precedenza descritti, si verificano varie riflessioni e quindi un effetto di diffusione dell'energia luminosa, in ogni direzione, con conseguente splendore uniforme della superficie illuminata.

L'*assorbimento* è il fenomeno complementare ai due precedenti nel caso in cui i corpi illuminati non trasmettono né riflettono l'energia incidente, bensì l'assorbono.

4.5. DISTANZA MINIMA TRA GLI APPARECCHI, D

La distanza tra corpi e pareti si pone pari a $d/2$, ove d è la distanza fra lampade.

L'illuminamento necessario sul piano di lavoro può essere fornito in parte (ad es. 30-50%) dagli apparecchi a soffitto (*illuminazione generale*) e parte da apparecchi collocati vicino all'utente, fuori del volume d'offesa (*illuminazione locale*), vedi Figura 79.

Tipo di corpo	d
A	$1.1 h$
B	$1.1 h$
C	h
D	$0.9 h$

Tabella 19: Distanza fra apparecchi illuminanti

5. IL BENESSERE VISIVO E LA PROGETTAZIONE ILLUMINOTECNICA

La psicofisica della visione contribuisce molto al benessere visivo e pertanto la progettazione illuminotecnica ne deve tenere conto. Questo è ancor più vero nel caso di illuminazione di musei e/o nel caso di illuminazioni per attività lavorative impegnative.

L'analisi e la valutazione del grado di illuminazione, di tipo naturale, che si vuole ottenere in uno specifico ambiente (abitazione, ufficio, industria, scuola, ospedale, etc.), per una perfetta visione, assume primaria importanza in fase progettuale essendo ad essa legata il corretto svolgimento delle attività lavorative.

Infatti, la maggior parte delle informazioni necessarie per lo svolgimento di una attività lavorativa sono di tipo visivo per cui, le modalità di illuminazione del *compito visivo* devono essere attentamente valutate al fine di garantire il comfort visivo dell'operatore.

Per raggiungere tale obiettivo è indispensabile:

- realizzare un ambiente luminoso idoneo a soddisfare le esigenze fisiopsicologiche dell'operatore assicurando sempre, ove possibile, il ricorso all'illuminazione naturale;
- rendere ottimale la percezione delle informazioni visive, per assicurare buone condizioni di lavoro ed una prestazione visiva veloce e precisa.

La norma italiana UNI 10530 del febbraio 1997 dal titolo *Principi di ergonomia della visione (sistemi di lavoro e illuminazione)* con riferimento ai principali obiettivi dell'ergonomia della visione nell'ambito dei sistemi di lavoro afferma che *l'assenza del benessere visivo dipende in gran parte dalle caratteristiche del compito visivo più che da altri*³⁵. Nella Figura 70 sono riportati i parametri che influenzano la prestazione lavorativa in un assegnato ambiente visivo, suddivisi in relazione al compito visivo, alle capacità visive del soggetto e alle caratteristiche dell'ambiente.

³⁵ Temperatura, ventilazione, etc.

Sempre con riferimento alla UNI10530, la condizione generale di benessere visivo può essere conseguita attraverso numerose combinazioni dei fattori che influenzano la prestazione visiva; eventuali carenze relative ad uno o più fattori possono essere parzialmente compensate da un opportuno incremento degli altri.

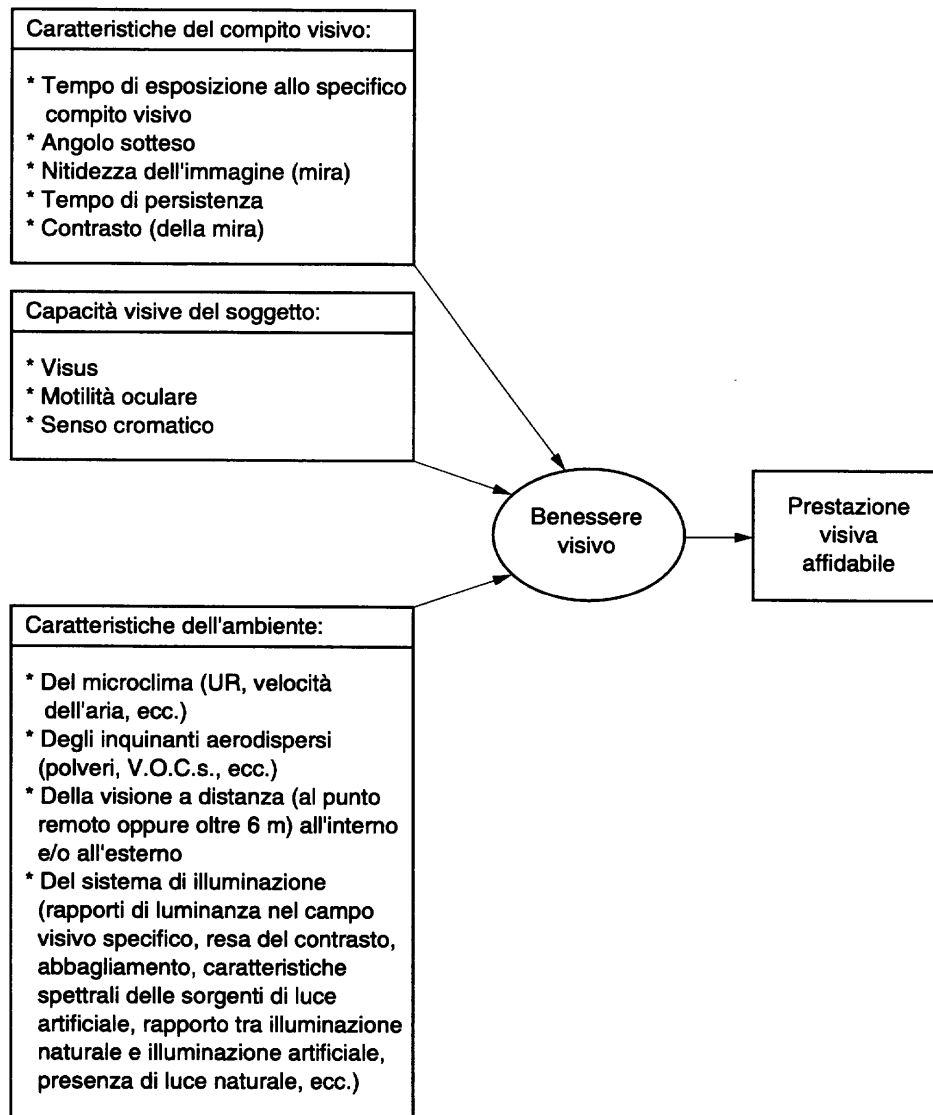


Figura 70: Compito visivo e prestazione visiva

In base alle superiori premesse la progettazione degli interni non deve mirare esclusivamente al raggiungimento di un illuminamento uniforme del piano di lavoro e quindi dell'ambiente, ma deve garantire una corretta visibilità del compito visivo dipendente dal contrasto percepito dall'operatore, dallo stato di adattamento dell'operatore, dalla presenza di fenomeni di abbagliamento e di riflessione, da eventuali ostruzioni e dalla procedura di svolgimento del compito visivo. La fase progettuale dovrà sempre essere preceduta da uno studio dettagliato dello spazio fisico e delle caratteristiche funzionali ad esso connesse, indispensabili per la definizione, in termini di prestazioni, dell'ambiente luminoso e degli indici significativi per la sua valutazione, ed in particolare dovrà prendere in considerazione quanto segue:

- la corretta dimensione degli ambienti;
- le finitura, colore e caratteristiche di riflessione delle superfici;

- le dimensioni e caratteristiche di trasmissione delle superfici vetrate;
- la dimensione e caratterizzazione di eventuali schermi;
- la definizione delle classi di utenza;
- la definizione delle attività svolte nell'ambiente;
- il profilo di occupazione dell'ambiente.

5.1. I PARAMETRI CHE INFLUENZANO LA PRESTAZIONE VISIVA

La progettazione illuminotecnica³⁶, come in precedenza citato, mira al raggiungimento del comfort visivo dell'operatore o fruitore di un determinato ambiente mediante uno studio in termini di prestazione dello spazio fisico e delle caratteristiche funzionali ad esso connesse. A tal proposito la norma UNI10530 al punto 4 così recita:

La natura del sistema visivo dell'operatore è determinante nella progettazione dell'ambiente visivo, la cui efficacia è misurata in termini di prestazione visiva. Per valutare una prestazione visiva è necessario esaminare le interazioni tra sistema visivo e caratteristiche del compito da svolgere nell'ambiente. La prestazione visiva deve quindi essere analizzata sulla base di tutti i fattori che la influenzano. Il termine "prestazione visiva" è utilizzato per esprimere la capacità di rilevazione e l'attitudine a reagire manifestate da un individuo quando i dettagli del "compito visivo" entrano nel "campo visivo". Tale attitudine può essere valutata in termini di velocità, precisione e accuratezza della percezione. La prestazione visiva dipende:

- - dalle caratteristiche proprie del compito visivo da svolgere (dimensioni, forma, posizione, colore e fattore di riflessione del dettaglio osservato e del fondo);
- - dalle condizioni d'illuminazione.

³⁶ Citeremo alcune definizioni tratte dalla norma UNI10530 indispensabili per una rapida comprensione degli argomenti di seguito descritti:

intorno del compito visivo: *Insieme dello spazio che può essere visto da una posizione precisata quando si muovano la testa e gli occhi.*

sistema di lavoro: *Combinazione di persone ed attrezzature che interagiscono nel processo di lavoro, per effettuare il compito di lavoro, nello spazio di lavoro, all'interno dell'ambiente di lavoro, sotto le condizioni imposte dal compito di lavoro.*

piano di lavoro: *Piano sul quale è svolto il compito visivo.*

piano di lavoro di riferimento: *Piano orizzontale sul quale è calcolato l'illuminamento medio nella fase di progetto. Se non altrimenti indicato, il piano di lavoro di riferimento è assunto ad una altezza di 0,85 m sopra il suolo; per le scrivanie, per esempio, l'altezza secondo le UNI 7368 e UNI 9095 e di 0,72 m.*

illuminazione generale: *Illuminazione progettata per illuminare una intera area approssimativamente in modo uniforme.*

illuminazione localizzata: *Illuminazione progettata per un interno al fine di ottenere anche una maggiore illuminazione sopra una o più parti del locale.*

illuminazione locale: *Illuminazione per uno specifico compito visivo complementare e controllabile separatamente dalla illuminazione generale.*

fattore di utilizzazione: *Rapporto tra il flusso luminoso che incide sul piano di lavoro e il flusso luminoso totale emesso dalle lampade.*

E' inoltre influenzata da altri fenomeni quali l'abbagliamento, la mancanza d'uniformità dell'illuminazione, la natura dello sfondo e, più in generale, dal modo in cui è concepito lo spazio di lavoro. I parametri da prendere in considerazione per una corretta percezione visiva sono:

<i>luminanza</i>
<i>contrasto</i>
<i>dimensione, forma e caratteristiche della superficie</i>
<i>colore</i>
<i>movimento e tempo necessario per la visione</i>
<i>posizione dell'immagine sulla retina</i>

Tabella 20: Parametri per una corretta percezione visiva

Nei capitoli seguenti definiremo i parametri che influenzano la prestazione visiva ed i rimedi da attuare per attenuarne gli effetti indesiderati.

5.2. L'ILLUMINAMENTO DEL COMPITO VISIVO

Le condizioni di illuminazione dell'ambiente visivo influiscono sulle funzioni visive fisiologiche (prestazione visiva), su quelle psicologiche (benessere) e, di conseguenza, possono contribuire alla prestazione, alla sicurezza, al benessere ed al senso di soddisfazione dell'uomo nel proprio ambiente.

Lo svolgimento di un compito visivo diviene più agevole all'aumentare della luminanza a partire da una soglia definita dalla sensibilità dell'occhio al contrasto³⁷. In condizioni normali, un aumento dell'illuminamento induce un miglioramento della prestazione visiva inizialmente molto rapido (da 0 a 100 lux) e che va successivamente riducendosi fino ad annullarsi. La prestazione visiva relativa ad un lavoro di precisione e/o a debole contrasto può essere in parte migliorata mediante elevati livelli di luminanza, mentre l'esecuzione di compiti visivi su superfici di dimensioni rilevanti o a forte contrasto può essere effettuata in modo confortevole anche con livelli di luminanza non elevati.

In generale si rileva che l'occhio è lento ed incerto nella percezione degli oggetti e dei colori particolari in condizione di scarsa illuminazione; crescendo l'illuminazione da 1 fino a 100 lux, l'occhio umano acquista una maggior velocità di percezione.

Aumentando l'illuminazione oltre i 100 lux, si ha sempre un vantaggio per la visione, ma l'incremento è minore. Da notare che verso i 100 lux anche le persone astigmatiche vedono come le persone normali, e ciò è molto importante se si pensa che circa il 50% della popolazione mondiale ha gli occhi astigmatici.

Per fare un esempio se calcoliamo infatti che per svolgere una determinata attività per cui sono richiesti 500 lux, occorrono n ore lavorative, per svolgere lo stesso lavoro a 150 lux le ore di mano d'opera aumenteranno del 15-30%.

Con la riduzione dei livelli di illuminamento, i danni dovuti a scarso rendimento si identificano nell'aumento degli errori, delle pause inconsce, nell'insorgere di malattie anche di tipo psicosomatico e dei casi di incidenti ed infortuni.

³⁷ Vedi capitolo 2.2 Principi della VISIONE

Appare evidente come un lavoro prolungato svolto in condizioni di illuminamento non appropriate (debole illuminamento, mancanza di uniformità, abbagliamento fastidioso ecc.) determina un inevitabile affaticamento visivo.

Tale affaticamento interessa il sistema nervoso centrale, in relazione allo sforzo richiesto per interpretare segnali ambigui o non sufficientemente nitidi; ed il sistema muscolare per lo sforzo di mantenere una postura non corretta adottata al fine di ridurre la distanza dal compito visivo, oppure per evitare di essere distratti o di essere disturbati da riflessi fastidiosi.

Riguardo i requisiti illuminotecnici degli ambienti l'illuminazione mediante luce naturale od artificiale deve fornire le condizioni ottimali per lo svolgimento del compito visivo richiesto anche quando si distoglie lo sguardo dal compito o per riposo o per una variazione del compito stesso. Situazioni particolari possono richiedere requisiti specifici.

L'impressione visiva di un interno è influenzata dall'aspetto delle seguenti superfici nel campo visivo:

- a) oggetti visivi principali: per esempio i compiti, i visi delle persone e gli arredi;*
- b) grandi superfici all'interno dell'ambiente: pareti, soffitti, pavimenti, finestre (di notte) e superfici di arredi e macchinari;*
- c) sorgenti di luce: apparecchi di illuminazione e finestre (di giorno).*

In un sistema di lavoro, il campo visivo dell'operatore è diverso a seconda che egli sia concentrato sul compito o che guardi lontano; se ne deduce come l'illuminazione del compito e quella dell'ambiente devono essere distinte al fine di evitare:

- distrazione ed adattamento sfavorevole e situazioni di disagio visivo durante lo svolgimento del compito;
- di conseguenza l'illuminazione deve:
- incrementare la prestazione visiva³⁸; e contribuire a migliorarne le condizioni ambientali.

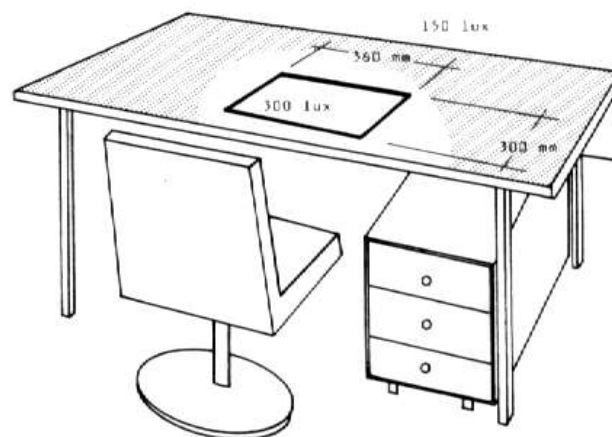


Figura 71: Esempio di corretta illuminazione: lo studio

³⁸ Ai fini del compito visivo sono fattori generalmente rilevanti i contrasti di luminanza e i contrasti cromatici; questi ultimi possono essere impiegati per migliorare la prestazione visiva, soprattutto quando i contrasti di luminanza sono contenuti

Importante diviene quindi lo studio ergofoalmico del posto di lavoro per cui è necessario mantenere all'interno del "campo visivo professionale" dell'operatore, la presenza di valori contenuti dei rapporti di luminanza, in particolare nell'area della visione distinta. Occorre poi evitare il continuo ed intenso lavoro di dilatazione-costrizione pupillare e di adattamento retinico, che possono provocare stati di affaticamento e di irritazione oculare.

Bisogna progettare l'ambiente in modo da permettere al fruitore di osservare durante il lavoro anche immagini poste a distanza maggiore di 6 m, in modo da ottenere un rilasciamento, e perciò un riposo, delle strutture che regolano l'accomodazione e la convergenza, intensamente attivate nella visione ravvicinata.

L'illuminazione di un ambiente deve essere appropriata all'attività che dovrà svolgersi al suo interno il quale deve risultare *visivamente piacevole e privo di abbagliamento*. Gli obiettivi da perseguire, mediante l'appropriata illuminazione dell'ambiente, includono la necessità di:

· ottenere una adeguata luminosità dello spazio in modo che si possano percepire con chiarezza gli oggetti all'interno
· garantire condizioni di sicurezza e di facilità di movimento all'interno dell'ambiente stesso
· favorire la concentrazione dell'osservatore sull'area del compito visivo
· prevedere aree di luminanza (leggermente) inferiore a quella delle aree relative al compito visivo per consentire un adeguato riposo della vista
· determinare un buon modellato soprattutto dei visi ed ammorbidire le ombre dure mediante un appropriato equilibrio tra luce direzionale e diffusa
· rendere naturali i colori delle persone e degli arredi dell'interno mediante l'impiego di sorgenti di luce con buone caratteristiche di resa del colore; ed inoltre adeguare le caratteristiche delle sorgenti di luce artificiale al livello di illuminamento
· ottenere una piacevole varietà di luminanze e di colori per contribuire al benessere degli occupanti ed alla riduzione dello stress da lavoro (per la definizione di stress da lavoro, vedere ISO 6385); una soluzione è quella di prevedere, nell'ambiente visivo, aree di luminanza diversa, rispetto alla media, poste fuori del campo di osservazione del compito visivo;
· favorire in linea di massima la pulizia mediante la scelta di colori chiari

I valori di illuminamento consigliati per differenti compiti ed attività, necessari per ottenere soddisfacenti prestazioni visive ed il raggiungimento delle condizioni di benessere, definiti in relazione alle esigenze visive del compito ed alla capacità visiva dei soggetti sono riportati nella tabella seguente.

Tipo di area, compito o attività	Intervallo di illuminamento (lux)		
Aree esterne di circolazione e lavoro	20	30	50
Aree di circolazione, semplice orientamento o brevi visite temporanee	50	100	150
Locali non usati con continuità per scopi di lavoro	100	150	200
Compiti con semplici requisiti visivi	200	300	500
Compiti con requisiti visivi medi	300	500	750
Compiti con requisiti visivi di precisione	500	750	1000

Compiti con requisiti visivi difficili	750	1000	1500
Compiti con requisiti visivi speciali	1000	1500	2000
Svolgimento di compiti visivi molto precisi			>2000

Tabella 21: Illuminamenti consigliati

Per ogni tipo di compito o attività sono riportati tre valori (per una descrizione più dettagliata dei livelli di illuminamento consigliati si fa riferimento alle tabelle proposte nel capitolo 4.6: L'illuminamento).

I valori più elevati possono essere assunti a riferimento:

- in presenza di modesti valori del fattore di riflessione o di contrasto;
- quando gli errori commessi nell'esecuzione del compito comportano conseguenze rilevanti;
- quando la prestazione visiva è critica;
- nei casi in cui la precisione o una maggiore produttività rivestono grande importanza;
- quando la capacità visiva del soggetto lo renda necessario.

Particolare attenzione bisogna porre, in fase progettazione, sulla qualità riflettenti dei materiali di rivestimento degli ambienti allo scopo di evitare che le luminanze delle singole superfici risultino eccessivamente diverse tra loro.

In generale si identificano tre zone distinte: la prima è quella propria del campo visivo interessato, la seconda indica una zona immediatamente prossima alla prima e la terza è l'intorno generale che può rientrare nel campo visivo.

Per ottenere un comfort visivo, la prima zona non deve superare una luminanza di 200 cd/m^2 (i valori raccomandati sono compresi tra 40 e 120 cd/m^2). L'area adiacente (zona) da 1 a $1/3$ del valore del campo visivo specifico (minimo $1/5$).

L'area generale (zona 3) da $1/5$ a 5 volte il campo visivo specifico (minimo da $1/10$ a 10 volte).

Bisogna inoltre considerare i seguenti apporti di luminanza:

tra compito visivo ed immediati intorni, quali le superfici di un banco o di una scrivania;
tra soffitto, pareti e pavimento;
tra apparecchi di illuminazione e finestra

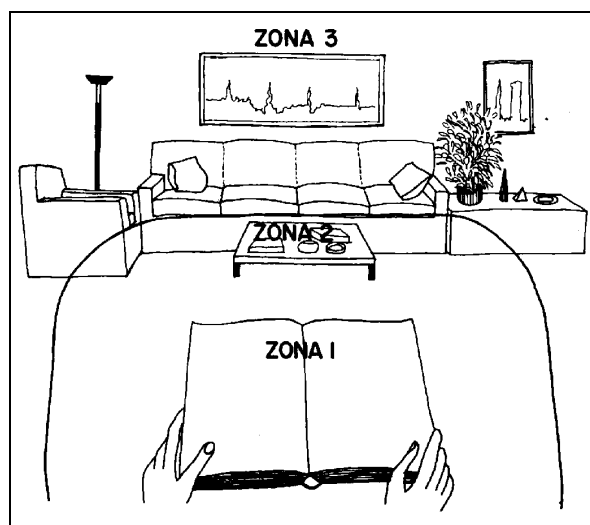


Figura 72: Identificazione delle zone in rapporto alla luminanza

I valori di riflessione raccomandati per le superfici interne degli ambienti sono riportati nella tabella seguente:

<i>Superficie</i>	<i>Potere riflettente</i>
Soffitto	60/90%
Pareti	35/60%
Pavimenti	15/35%
Arredi	25/45%
Rivestimenti, tendaggi	45/85%

Tabella 22: Poteri riflettenti delle pareti

5.3. IL CONTRASTO

Ove possibile, il compito e l'illuminazione devono essere progettati al fine di fornire un contrasto ottimale.

La sensibilità al contrasto aumenta, entro certi limiti, con la luminanza; essa è anche influenzata dal gradiente di luminanza o colore al contorno tra due zone adiacenti. Risulta ridotta quando si hanno variazioni molto forti di luminanza e di colore nel campo visivo che circonda l'immagine da osservare.

Per esempio, se una sorgente di luce intensa si trova nel campo visivo, la presenza di condizioni di abbagliamento debilitante ad essa connesse può provocare una riduzione apparente del contrasto.

Una riduzione del contrasto si può verificare anche quando si distoglie lo sguardo dal compito visivo per dirigerlo verso una zona più illuminata, poiché si verifica una variazione rapida dell'adattamento dell'occhio (adattamento transitorio).

Se a causa di riflessioni dovute a superfici di elevata luminanza³⁹ il contrasto può essere ridotto un'appropriata diffusione dell'illuminazione all'interno di un ambiente, per esempio per riflessione sul soffitto e/o sulle pareti, può attenuare la riduzione del contrasto.

³⁹ Tale condizione produce una sorta di velo che impedisce o disturba la visione (da cui il termine riflessioni di velo).

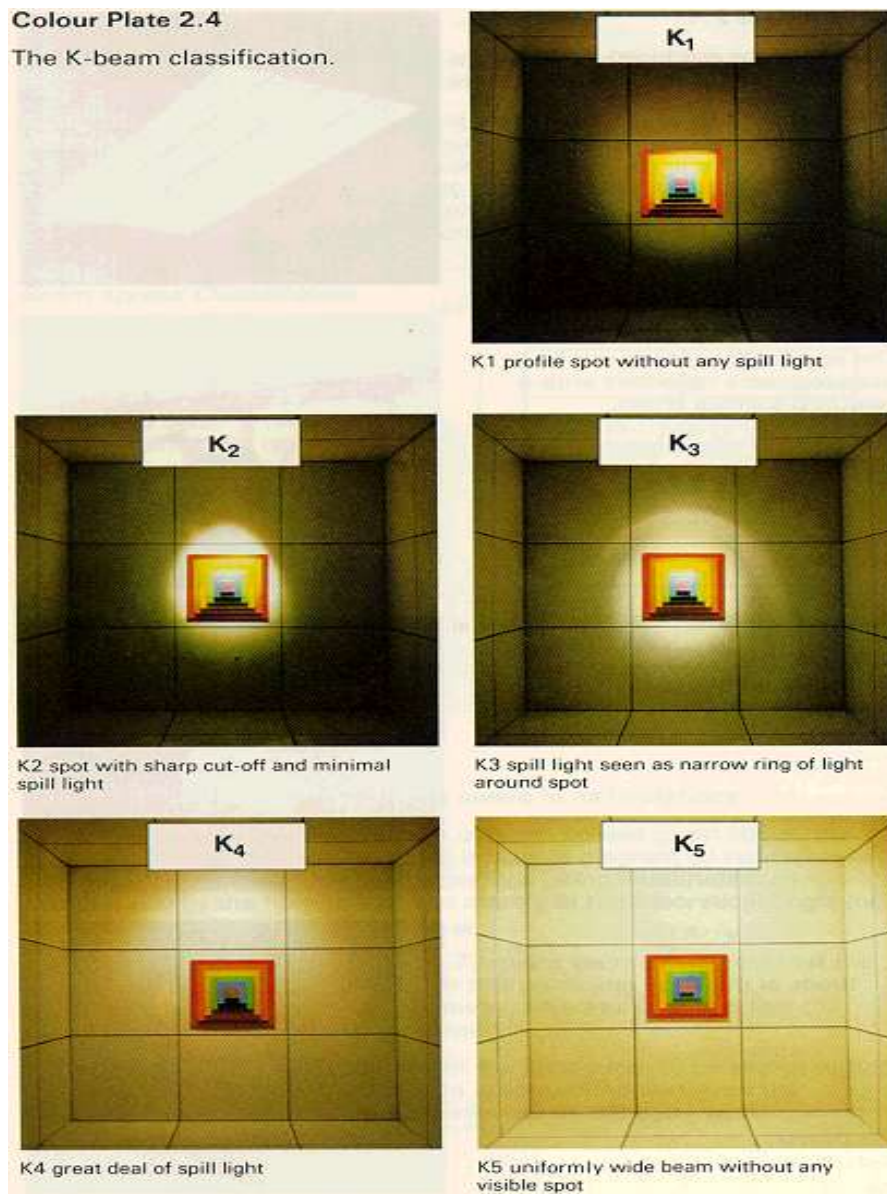


Figura 73: Influenza del contrasto

5.4. L'ABBAGLIAMENTO

Valori elevati del fattore di riflessione delle superfici in presenza di sorgenti ad elevata luminanza ed anche alla presenza di superfici con riflessione di tipo speculare come nel caso di metallo lucidato, possono essere causa di fenomeni di abbagliamento fastidioso e/o debilitante i quali determinano una inevitabile riduzione del comfort visivo con conseguente senso di disagio del fruitore, che tende ad aumentare con il tempo ed a costituire un fattore di affaticamento.

Normalmente la luminanza dello sfondo determina il livello generale dell'adattamento dell'occhio; quando la sorgente luminosa è di grandi dimensioni, come per esempio una finestra, si deve tener conto dell'effetto della luminanza della sorgente sul livello di adattamento.

Particolare attenzione bisogna porre riguardo l'abbagliamento debilitante che interviene abitualmente quando una sorgente di debole luminanza ma di appropriata superficie (o una piccola sorgente di elevata luminanza) è percepibile nell'intorno prossimo del compito visivo.

Un esempio è rappresentato dalla difficoltà che si incontra nella lettura di immagini a bassa luminanza poste di fronte o in prossimità di una finestra.

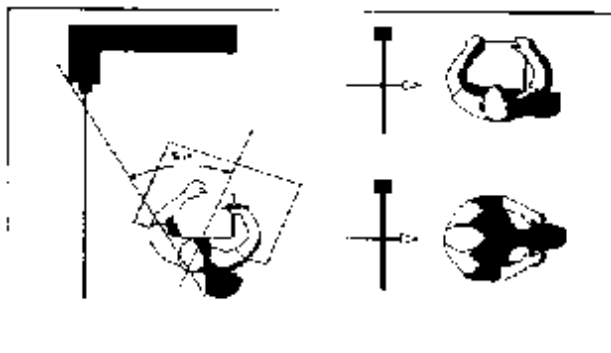


Figura 74: Posizioni per evitare l'abbagliamento

Come è chiaramente visibile dalla precedente immagine una corretta posizione del posto di lavoro rispetto alla superficie vetrata di una finestra, nel caso di illuminazione esclusivamente naturale, può ridurre i problemi inerenti all'abbagliamento ed alle ombre.

5.5. LA PSICOLOGIA DEL COLORE

Il colore è un attributo della luce che contribuisce all'osservazione ed alla percezione dell'ambiente. Tra gli attributi della luce esso è notoriamente il più utile per identificare rapidamente e agevolmente gli oggetti situati nello spazio di lavoro. Nella progettazione illuminotecnica bisogna tener conto degli effetti psicologici del colore; negli ambienti con colori forti e saturi, la luce calda aumenta la forza del colore (il caso della luce naturale), mentre le luci fredde, smorzano i colori caldi e creano senso di spaziosità. In ogni caso sarà sempre utile in fase progettuale utilizzare colori con buona capacità di riflessione, sia per un risparmio energetico che per un addolcimento delle ombre provocate sia dalla luce proveniente dalle finestre che da quella artificiale.

Colore	Fattore di rifl. (%)
Bianco	70/85%
Grigio chiaro	45/65%
Grigio	25/40%
Grigio scuro	10/20%
Nero	5%
Giallo	65/75%
Bruno giallastro	30/50%
Marrone scuro	10/25%
Verde chiaro	30/55%
Verde scuro	10/25%
Rosa	45/60%
Rosso chiaro	25/35%
Rosso scuro	10/20%
Celeste	30/55%
Blu	10/25%

Tabella 23: Fattori di riflessione dei colori

Per quanto concerne lo studio cromatico delle superfici è possibile rifarsi ad uno studio condotto da *Maurice Deribere* e dalla *National Chemical & Manufacturing Company*, che si basa sulla scelta dei colori in base all'orientamento, alla posizione delle finestre ed al numero delle finestre stesse del locale preso in considerazione⁴⁰. Il procedimento è il seguente: determinare l'orientamento delle finestre se queste si trovano su di un solo lato del locale. Se il locale ha le finestre su più lati, si determina l'esposizione con un compromesso: per finestre su pareti adiacenti si esegue una media fra le due direzioni (es. con finestre sul lato sud e sul lato ovest, l'esposizione sarà sud-ovest). Se invece le finestre si trovano su lati opposti o su tre lati, si sceglie il sud come esposizione anche se la parete sud non presenta aperture. Tutte le combinazioni possibili possono essere per semplicità rappresentate nel diagramma e nella tabella seguente:

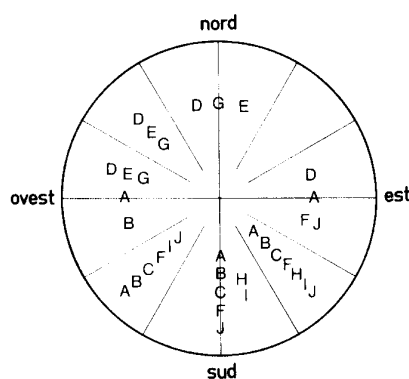


Figura 75: Combinazione dei colori in funzione dell'esposizione delle finestre

SCHEMA DELLE DOMINANTI		
	Soffitto	Pareti
A	Bianco	Verdemare, avorio
B	Bianco	Verde salvia chiaro, avorio
C	Bianco	Grigio, verde salvia, grigio freddo
D	Bianco	Crema, beige, avorio scuro
E	Bianco	Grigio caldo, beige caldo
F	Bianco	Avorio scuro, azzurro
G	Bianco	Avorio, beige, grigio caldo
H	Bianco	Grigio rosato, beige rosato, verde salvia, grigio caldo
I	Bianco	Grigio, verde salvia, avorio
L	Bianco	Giallo, verde mare chiaro e scuro, avorio

Tabella 24: Schema delle dominanti

⁴⁰ Tale sistema nasce da uno studio condotto per la scelta cromatica delle dominanti cromatiche in aule scolastiche ed è stato progettato tenendo in considerazione il sistema percettivo degli studenti. I buoni risultati ottenuti hanno esteso l'uso di questo tipo di progettazione cromatica, con le dovute modificazioni, a tutto il mondo del lavoro.

5.5.1. LA PSICOLOGIA DEL COLORE NEL LAVORO

Per un corretto svolgimento delle attività lavorative occorre valutare attentamente la *sensazione del colore*; spesso si cerca con lo sguardo un colore o inconsciamente ci si sofferma su una tinta che ci coinvolge con il suo potere evocativo. La sensazione del colore dovrà essere presa in considerazione nella progettazione di tutti gli ambienti ed in particolare per quelli destinati ad attività lavorative di qualunque genere. In particolare negli uffici, è indispensabile che i soffitti non incombano spiacevolmente e non appesantiscano l'atmosfera in modo da produrre senso di schiacciamento o di limitatezza dell'aria respirabile per chi svolge un'attività, come è anche necessario che gli stessi non producano all'inverso una situazione di fuga da uno spazio in cui non si riesce a definire una propria dimensione di lavoro indispensabile per una corretta concentrazione.



Figura 76: Influenza del colore delle pareti

Sarà quindi corretto, negli ambienti lavorativi, l'uso di colori chiari che contribuiscono a dare respiro ed equilibranti proporzioni, mentre i particolari dell'arredamento, gli oggetti e gli spazi di raccordo, di transito e i servizi riusciranno più confortevoli se si useranno colori caldi che, nei limiti di un potere riflettente adeguato, avvicinano le superfici e ne rendono più piacevole l'uso quotidiano.

Per l'attività intellettuale che si svolge in tutti i livelli negli uffici si deve privilegiare la possibilità di una serena, distesa, producente concentrazione da cui sia bandita ogni possibilità di

affaticamento fisico e mentale ed ogni forma di aggressività che potrebbe condurre a lungo andare a pericolose nevrosi.

In base alle superiori premesse l'occhio non lo si deve considerare esclusivamente come un semplice apparecchio di ricezione a servizio del cervello ma i suoi processi fotochimici assumono un ruolo primario nella regolazione biochimica dell'intero organismo e della psiche in particolare. Esiste, infatti, una via di comunicazione nervosa, fino ad oggi assai poco considerata e non connessa con la capacità visiva, che va direttamente dall'occhio a quella porzione di cervello chiamata ipotalamo e che controlla l'ipofisi. L'ipofisi e l'ipotalamo esercitano una azione congiunta di controllo quasi completo di tutte le altre ghiandole endocrine (tiroide, gonadi, surrenali).

Dell'aspetto cromatico delle superfici se ne occupa anche la norma UNI 10530 la quale, così recita a riguardo: *In particolari attività professionali l'aspetto dell'immagine colorata e la discriminazione tra i colori possono assumere una notevole importanza.*

Occorre quindi per un corretto svolgimento delle attività lavorative valutare attentamente la *sensazione del colore*; spesso si cerca con lo sguardo un colore o inconsciamente ci si sofferma su una tinta che ci coinvolge con il suo potere evocativo. La sensazione del colore dovrà essere presa in considerazione nella progettazione di tutti gli ambienti ed in particolare per quelli destinati ad attività lavorative di qualunque genere. In particolare negli uffici, è indispensabile che i soffitti non incombano spiacevolmente e non appesantiscano l'atmosfera in modo da produrre senso di schiacciamento o di limitatezza dell'aria respirabile per chi svolge un'attività, come è anche necessario che gli stessi non producano all'inverso una situazione di fuga da uno spazio in cui non si riesce a definire una propria dimensione di lavoro indispensabile per una corretta concentrazione.

Sarà quindi corretto, negli ambienti lavorativi, l'uso di colori chiari che contribuiscono a dare respiro ed equilibranti proporzioni, mentre i particolari dell'arredamento, gli oggetti e gli spazi di raccordo, di transito e i servizi riusciranno più confortevoli se si useranno colori caldi che, nei limiti di un potere riflettente adeguato, avvicinano le superfici e ne rendono più piacevole l'uso quotidiano.

Per l'attività intellettuale che si svolge in tutti i livelli negli uffici si deve privilegiare la possibilità di una serena, distesa, producente concentrazione da cui sia bandita ogni possibilità di affaticamento fisico e mentale ed ogni forma di aggressività che potrebbe condurre a lungo andare a pericolose nevrosi.



Figura 77: Interrelazione colori/emotività

In base alle superiori premesse l'occhio non lo si deve considerare esclusivamente come un semplice apparecchio di ricezione a servizio del cervello ma i suoi processi fotochimici assumono un ruolo primario nella regolazione biochimica dell'intero organismo e della psiche in particolare.

Esiste infatti una via di comunicazione nervosa, fino ad oggi assai poco considerata e non connessa con la capacità visiva, che va direttamente dall'occhio a quella porzione di cervello chiamata *ipotalamo* e che controlla l'*ipofisi*. L'ipofisi e l'ipotalamo esercitano una azione congiunta di controllo quasi completo di tutte le altre ghiandole endocrine (tiroide, gonadi, surrenali).

Ne consegue che: *L'ipotalamo è in grado di controllare direttamente, oppure indirettamente tramite l'ipofisi, un ampio ventaglio di funzioni dell'organismo di cui oggi si sa che sono condizionate dalla percezione della luce.*

Tra tali funzioni annoveriamo: la crescita e il metabolismo, la regolazione dell'equilibrio idrico e della temperatura, i livelli di glucosio, le funzioni sessuali e riproduttive.

Inoltre controlla anche altre funzioni vitali come l'appetito, l'alternarsi dello stato di veglia e di sonno, certi aspetti comportamentali come la paura, l'ira, le pulsioni sessuali e l'equilibrio tra le due componenti del sistema nervoso autonomo: il simpatico e il parasimpatico.

Gli effetti che la luce ha sull'uomo, sono testimoniati da numerosi documenti molti dei quali antichi (da *Plinio* a *Jonh Ott* sino agli studi di *Fritz Hollwich*) e da recenti esperimenti mediante i quali è stato possibile dimostrare che nella luce solare le radiazioni dominanti variano al variare delle ore della giornata⁴¹ influenzando in maniera differente sull'organismo.

Chi conosce, anche solo minimamente, l'azione dei singoli colori sulla nostra persona, non può fare a meno di notare che le radiazioni solari accompagnano la nostra giornata in modo assai mirabile.

La natura infatti, ci fornisce per esempio, radiazioni indaco che favoriscono l'azione mentale all'aurora; radiazioni che vanno dal giallo al rosso, quindi sempre più stimolanti per la nostra attività fisica, col trascorrere delle ore della giornata; ed infine radiazioni violette, ad azione equilibrante sul nostro tono neuro-muscolare, nella prima parte della notte, cioè nel momento in cui inizia il riposo. A conclusione di questo capitolo dedicato al cromatismo della luce aggiungiamo alcuni cenni sull'effetto dei colori sulla sfera fisica ed emotiva al fine di giungere ad una corretta scelta di un colore per un corretto svolgimento di qualsivoglia attività lavorativa.

Bianco	Essendo la sintesi di tutte le radiazioni dello spettro è però un colore molto stimolante che facilmente può risultare irritante.
Nero	Può essere definito come l'assenza di ogni radiazione riflessa e secondo alcuni studiosi rappresenta la scissione dell'IO e può perciò portare alla depressione totale.
Rosso	E' il colore più caldo dello spettro luminoso scatenando nell'organismo uno stato di tensione.
Arancione	Tale colore determina ottimismo ed entusiasmo ed ha un effetto equilibratore negli stati depressivi con conseguente sensazione di benessere.
Giallo	Tale colore rinforza i nervi ed esercita quindi un'azione benefica sul cervello aumentandone le capacità percettive. Esso evoca inoltre gioia, spensieratezza, allegria, successo.
Verde	E' il colore della vita, dell'equilibrio e può essere definito come armonizzatore, rinfrescante, rigeneratore e calmante ed è indicato in tutti i casi di disturbi attentivi da iperattività o da interferenze emozionali importanti; aiuta quindi a

⁴¹ Blu al mattino presto, gialle a mezzogiorno, rosse alla sera. Le radiazioni verdi predominano tra il mattino e mezzogiorno, mentre le radiazioni arancione sono più abbondanti tra mezzogiorno e la sera. Infine è all'aurora che vi è una maggiore quantità di raggi indaco mentre all'inizio della notte si riscontrano le radiazioni violette perché in questo momento esiste nell'atmosfera notturna una mescolanza uguale di raggi blu del mattino e di raggi rossi della sera.

liberarsi dei problemi mentali od emozionali importanti.

- Blu** E' un colore ad effetto distendente e rilassante soprattutto sui muscoli, riduce quindi tensioni e spasmi a livello muscolare. Un blu acceso può però provocare stanchezza e depressione.
- Viola** E' il colore con la maggior frequenza d'onda quindi è il più carico di energia e risulta eccellente per moderare l'irritabilità, la collera, e tutte le emozioni violente e permette di diminuire l'angoscia e la paura. Deve essere usato in tutti quei casi nei quali sia necessario stimolare una maggiore concentrazione attenta sia a livello di attenzione selettiva che a livello di attenzione prolungata.
- Indaco** Cromaticamente è una combinazione di blu e di viola. E' il colore dell'energia intensa in senso cosmico. L'energia contenuta in questo colore è infatti di capitale importanza per lo sviluppo della vita. L'indaco è un colore rinfrescante e astringente ed un efficace tonico muscolare. Stimola l'acutezza dei cinque sensi e l'intuizione mentre calma l'eccitazione mentale. Si è inoltre scoperto che l'indaco sembra avere, unico tra tutti i colori, un effetto filtrante sulla radiatività.

Tabella 25: Effetti psicologici del colore

5.6. VOLUME DI OFFESA

Le superfici (ad esempio carta e inchiostro) solo raramente sono perfettamente diffondenti. Spesso sono piuttosto di tipo diffondente-speculare presentano cioè una intensità maggiore in direzione speculare rispetto ai raggi incidenti.

Questo riduce il contrasto, e quindi la prestazione visiva, per un osservatore posto specularmente rispetto alla sorgente (*velo luminoso*). Si introduce allora il concetto di *volume d'offesa*, definito come il volume che comprende tutte le direzioni speculari a quelle di osservazione dell'area di lavoro, o di osservazione.

Per evitare la perdita di prestazione dovuta al *velo luminoso*, è opportuno che tutte le sorgenti luminose siano collocate al di fuori di questo volume specie in presenza di superfici con elevato comportamento speculare.

Nelle figure seguenti sono mostrate due esempi di corretta disposizione e scelta degli apparecchi illuminanti. L'apparecchio A della Figura 79 presenta una curva fotometrica asimmetrica, in modo da ridurre le perdite di flusso luminoso attraverso la finestra; l'apparecchio B presenta una curva simmetrica (ad "ali di pipistrello") e attenua le ombre causate dal corpo A.

Non ci sono sorgenti di luce nel volume d'offesa.

5.6.1. POSIZIONE DELL'APPARECCHIO ILLUMINANTE

La posizione del corpo luminoso può determinare effetti dannosi o indesiderabili di abbagliamento visivo.

Di ciò si deve tenere conto nel considerare l'**ergonomia** dei posti di lavoro.

L'illuminazione localizzata può dare luogo ad **abbagliamento per contrasto** qualora l'illuminazione del fondo non sia adeguata.

Per il posizionamento dei corpi luminosi si usano le **curve di Sollner**. In Tabella 26 si ha la classificazione della **qualità visiva**.

Classe di qualità	Tipo di compito o attività
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	per interni dove le persone non sono ubicate in una posizione di lavoro precisa ma si spostano da un posto all'altro esplicando compiti che richiedono prestazioni visive modeste

Tabella 26: Classe di qualità visiva

Con riferimento alla Figura 81, scelto un valore di illuminamento nella riga corrispondente alla qualità visiva desiderata, proseguendo verso il basso nei diagrammi di Figura 82 o di Figura 83, a seconda del tipo di apparecchio illuminante, si ottiene una linea guida che riporta l'**angolo limite di abbagliamento** al variare della luminanza dell'apparecchio illuminante.

I Costruttori di corpi illuminanti forniscono i diagrammi si *Sollner* per la loro produzione.

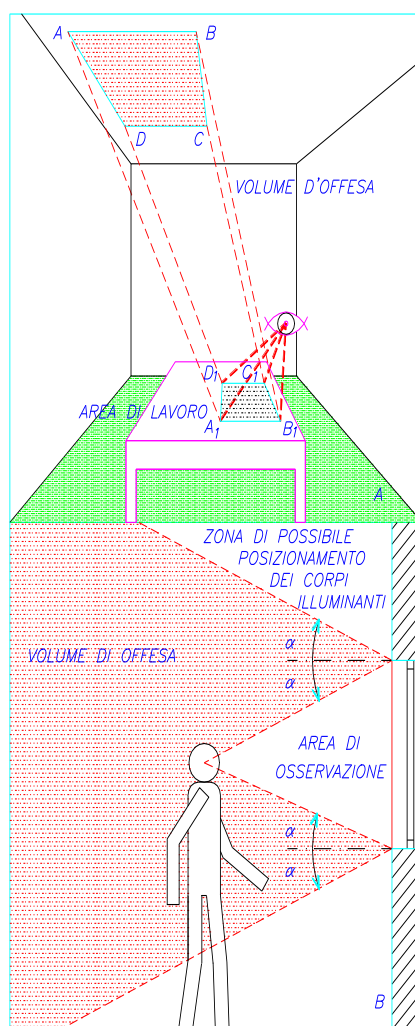


Figura 78: Volume di offesa

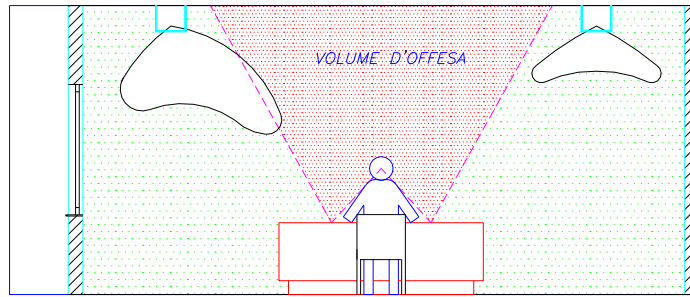
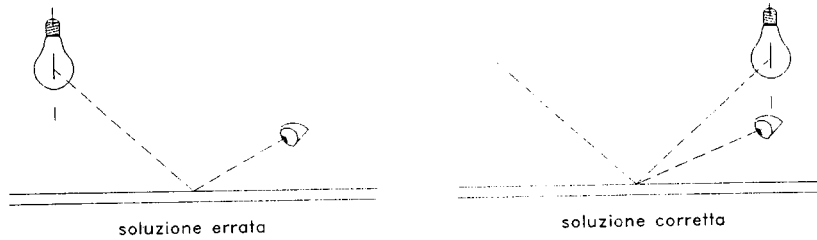
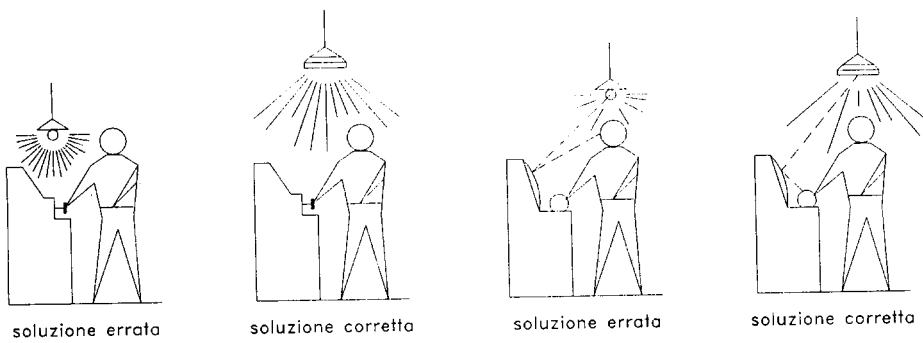


Figura 79: Volume di offesa in un posto di lavoro

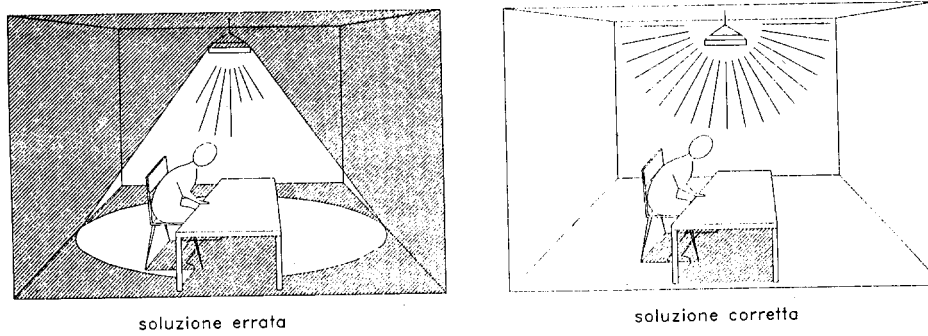


Abbagliamento da luce riflessa



Abbagliamento diretto

Abbagliamento da luce riflessa



Contrasti di luminanza

Figura 80: Corretta posizione dell'apparecchio illuminante

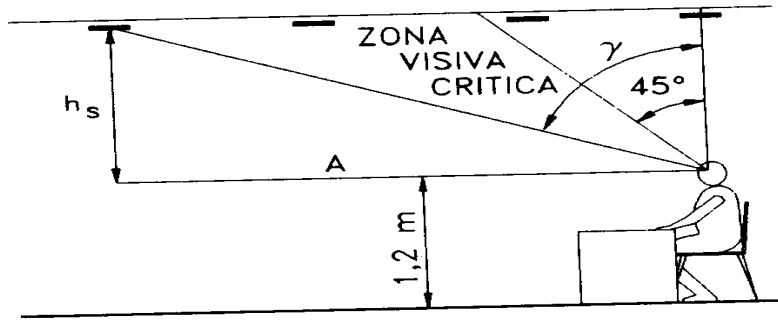


Figura 81: Definizione di angolo di abbagliamento

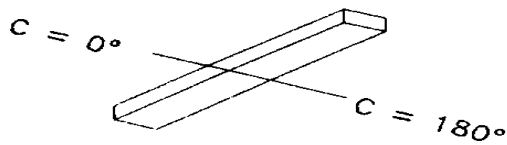
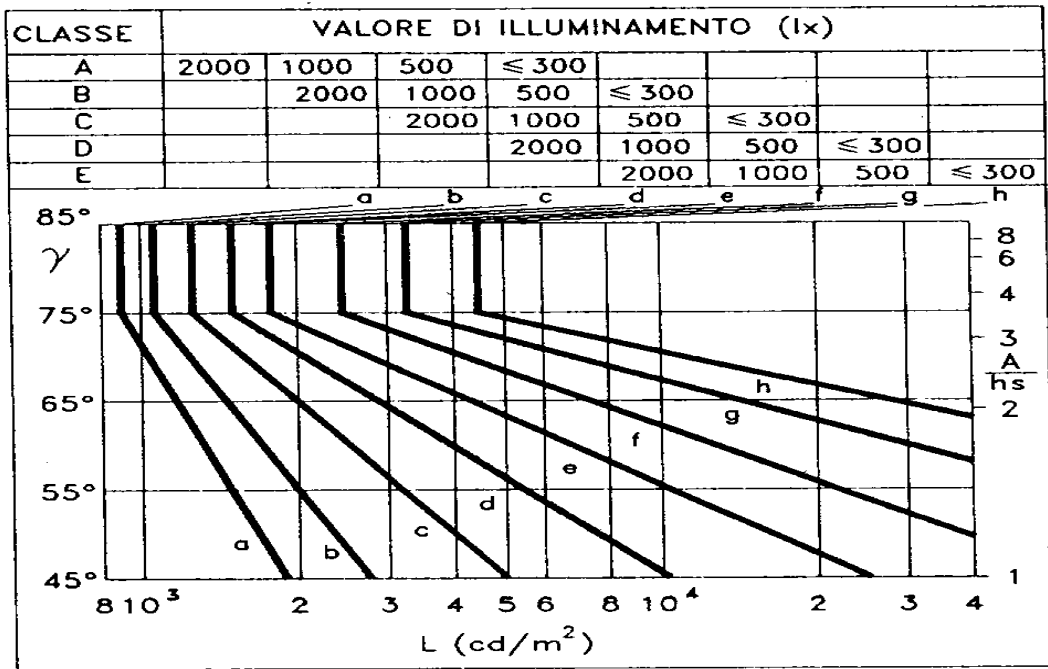


Figura 82: Curve di luminanza A: apparecchi senza bordo luminoso.

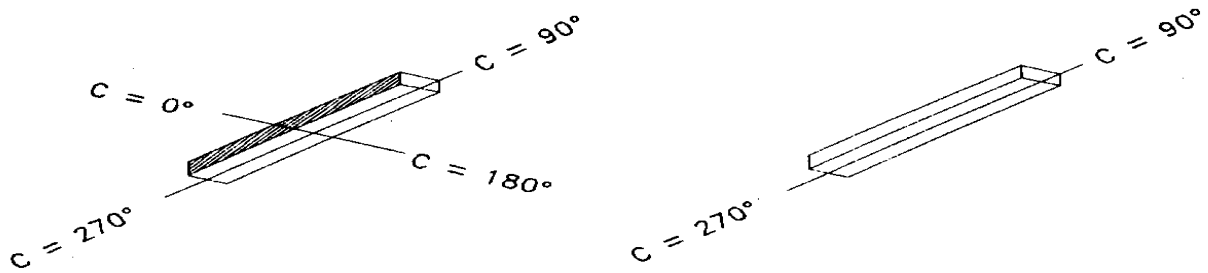
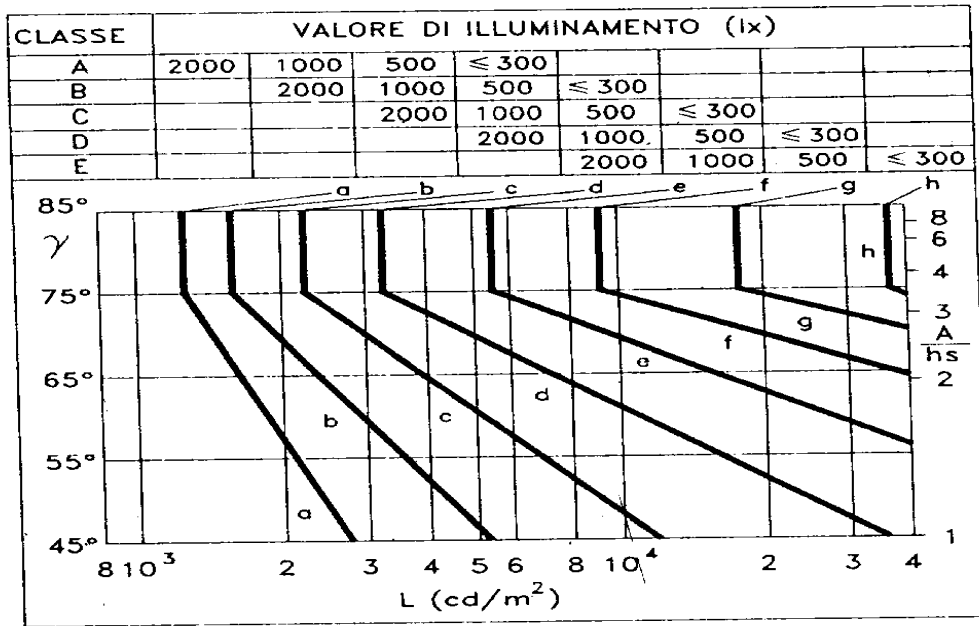


Figura 83: Curve di luminanza B: apparecchi con bordo luminoso

6. ILLUMINAZIONE NATURALE

Oltre all'illuminazione artificiale assume grande importanza anche l'illuminazione naturale. Questa, infatti, influenza sia la buona visione diurna che i consumi energetici degli edifici. Una insufficiente illuminazione naturale richiede l'accensione dell'illuminazione artificiale con conseguenti incrementi dei consumi energetici. Le norme richiedono una verifica dell'illuminazione naturale mediante il calcolo del *Fattore di Luce Diurna (FLD)* che può essere effettuato in più modi. Nel prosieguo si vedrà il metodo BRS.

Anche l'illuminazione naturale contribuisce al comfort visivo e anzi si può dire che tutta l'illuminazione artificiale tende all'optimum dato dalla luce solare.

Essa costituisce una fonte luminosa di straordinaria potenza con la più alta ricchezza cromatica possibile tanto che tutto l'apparato visivo dell'Uomo si è, nei millenni, sviluppato attorno alla maggiore sorgente di luce disponibile, quella solare.

6.1. ILLUMINAMENTO INTERNO DOVUTO ALLA VOLTA CELESTE

Il flusso luminoso totale che raggiunge un punto di una superficie all'interno di un ambiente è il risultato di tre contributi, vedi Figura 84:

- a. il flusso che arriva sul punto direttamente dal cielo (*componente cielo*);
- b. il flusso che arriva sul punto per effetto di riflessioni da parte di superfici poste all'esterno (*componente riflessa esterna*);
- c. il flusso che arriva sul punto per effetto di riflessioni da parte di superfici poste all'interno (*componente riflessa interna*).

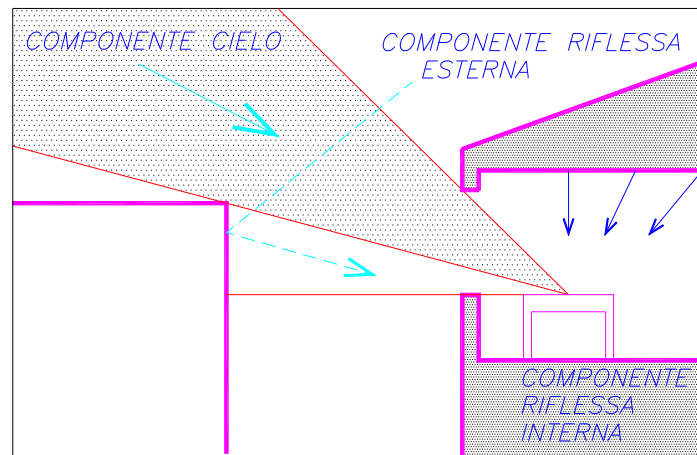


Figura 84: Le componenti fondamentali dell'illuminazione naturale

6.2. FATTORE DI LUCE DIURNA (O DAYLIGHT FACTOR), DF

Il fattore di luce diurna in un punto appartenente ad una superficie interna è definito come il rapporto tra l'illuminamento in quel punto, dovuto ad una distribuzione di luminanza del cielo nota o assegnata, e l'illuminamento su superficie orizzontale esterna in assenza di ostruzioni, prodotto dalla volta celeste con la stessa distribuzione di luminanza.

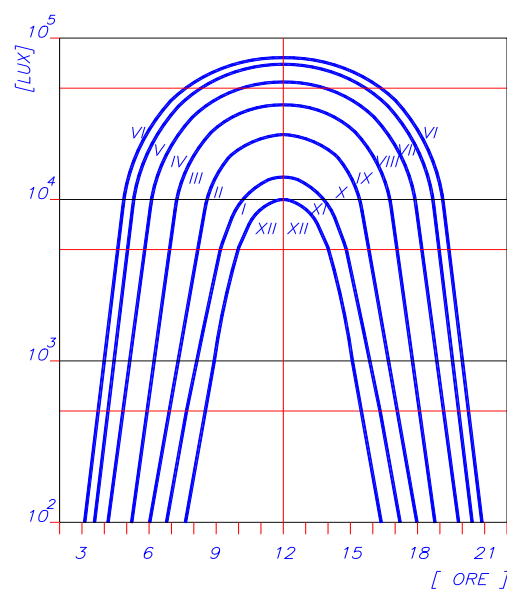


Figura 85: Livelli di illuminamento in diverse ore del giorno

Per entrambi gli illuminamenti si esclude la componente solare diretta. Per quanto riguarda l'illuminamento esterno, la Figura 85 riporta i valori dell'illuminamento naturale all'aperto prodotto dalla volta celeste con cielo sereno in funzione dell'ora del giorno, e dei mesi.

6.3. CALCOLO DEL FATTORE DI LUCE DIURNA

Trattandosi di un rapporto, si può ipotizzare che, in prima approssimazione il valore di D in un dato punto dipenda solo dalla *configurazione* e non dalle condizioni di luce esterna (al variare di questa, varierà circa allo stesso modo l'illuminamento interno). Per configurazione deve intendersi: le dimensioni e la posizione delle pareti ed i loro coefficienti di riflessione; la forma, posizione e dimensioni delle aperture ed i coefficienti di trasmissione delle superfici vetrate; forma, posizione e dimensioni delle occlusioni esterne, e coefficienti di riflessione delle superfici che li costituiscono. In definitiva D dipende fortemente dalle scelte progettuali.

TIPO DI AMBIENTE		D MINIMI (%)
Edifici in generale	Ingressi	1
Uffici e studi	Generale	2
Banche	Banconi, aree pubbliche	2
Aeroporti e stazioni	Banchi di accettazione, aree per dogana, immigrazione	2
	Aree di transito	1
Sale da concerto e da riunione	Corridoi	0.5
	Atrii, auditorium	1
	Scale	1
Chiese	Navate	1
	Pulpito, coro	1.5
	Altare	3-6
	Sagrestie	2
Biblioteche	Scaffali	1
	Aree di lettura	1
Musei e gallerie	Generale	1
Scuole e università	Sale di riunione e aule	2
	Aule per arte	4
	Banchi di laboratorio	3
	Uffici	1
Ospedali	Sale di attesa e ricevimento	2
	Corsie	1
	Farmacie	3
	Camere operatorie	2
	Laboratori	3
Edifici sportivi	Generale	2
Piscine	Superficie della vasca	2
	Zone adiacenti alla vasca	1

Tabella 27: Valori minimi consigliati per il fattore di luce diurna

Esistono vari metodi per il calcolo, più o meno accurato, di D , ai quali si rimanda:

- - quando è richiesta una maggiore precisione, oppure in presenza di geometrie di aperture piuttosto complesse o su piani non verticali: Diagrammi di Waldram (BRS, British Standard Institution); Goniometri del British Research Establishment.
- - strumenti più semplici: Metodo tabulare del British Research Establishment; Diagrammi puntinati (Lynes, 1968; Turner 1969); Diagrammi di Pleijel.

Il metodo del fattore di luce diurna è stato sviluppato assumendo i modelli di cielo C.I.E. *coperto* o *uniforme* a luminanza uniforme: in quest'ultimo caso il fattore non dipende né dall'ora del giorno, né dal periodo dell'anno. Ciò non significa che l'illuminamento sia costante al variare del tempo, ma che è costante il rapporto tra illuminamento interno ed esterno. Più recentemente sono state proposte estensioni del metodo anche a condizioni di cielo differenti, come la distribuzione *clear* e *average*, che rappresenta una media di distribuzioni di cielo reali. La verifica dell'illuminazione diurna consiste nel calcolare, in percentuale, il valore dell'illuminamento diurno in un punto rispetto a quello provocato dal cielo coperto. Si definiscono due tipi di cielo:

- cielo internazionale
- cielo uniforme standard.

Nel primo caso la luminanza varia secondo la relazione:

$$B_{\alpha} = B_0 \frac{1 + 2 \sin \alpha}{3}$$

ove B_0 è la luminanza del cielo allo Zenith e a l'angolo di elevazione del punto del cielo considerato rispetto all'orizzonte. Nel secondo caso la luminanza del cielo si suppone costante, qualunque sia l'angolo considerato. In questo caso l'illuminamento prodotto si considera pari a 5000 lux. Detto DF il *daylight factor*, definito come rapporto fra l'illuminamento in un punto interno e quello del cielo coperto, questo è dato dalla somma di tre fattori:

$$DF = SC + CRE + CRI$$

ove:

- SC è la componente cielo;
- CRE è il componente di riflessione esterno;
- CRI è il componente di riflessione interno.

Ciascuno di questi fattori è sempre inteso in termini percentuali rispetto all'illuminazione con cielo coperto. Per una buona illuminazione diurna deve essere $DF > 4$.

6.3.1. CALCOLO DELLA COMPONENTE CIELO

La componente cielo, SC, è definita come rapporto percentuale fra l'illuminamento dovuto ad una apertura sul punto desiderato per effetto della radiazione solare diffusa e l'illuminamento ottenuto con cielo internazionale. Se il riferimento è il cielo standard a luminanza costante si definisce allo stesso modo il fattore cielo, SF.

Entrambi i componenti dipendono dal tipo di cielo considerato (internazionale o standard) dai rapporti B/d e H/d fra la base della semi apertura e la distanza del punto P (valutata normalmente alla finestra) e fra l'altezza dell'apertura e la medesima distanza.

Il metodo BRS per il calcolo del DF fornisce due tabelle (una per ciascun tipo di cielo) che fornisce SC o SF in funzione dei due rapporti B/d e H/d . Qualora il vetro considerato sia doppio è bene ridurre del 15% il valore individuato nelle tabelle. Se l'apertura ha un'ostruzione esterna che limita l'illuminamento solare allora si applica lo stesso metodo una volta per tutta la finestra ottenendo SC1 ed una seconda volta per la parte di finestra oscurata ottenendo SC2. Il valore finale è dato dalla differenza: $SC = SC1 - SC2$.

I riferimenti per il calcolo di SC e SF sono dati in Figura 86. Se è presente l'ostruzione esterna allora si calcola la Componente di riflessione esterna, CRE, utilizzando ancora le due tabelle già descritte per SC e SF ed individuando CRE mediante B/d e a (angolo di ostruzione). CRE va sommato a SC (o SF a seconda del cielo considerato).

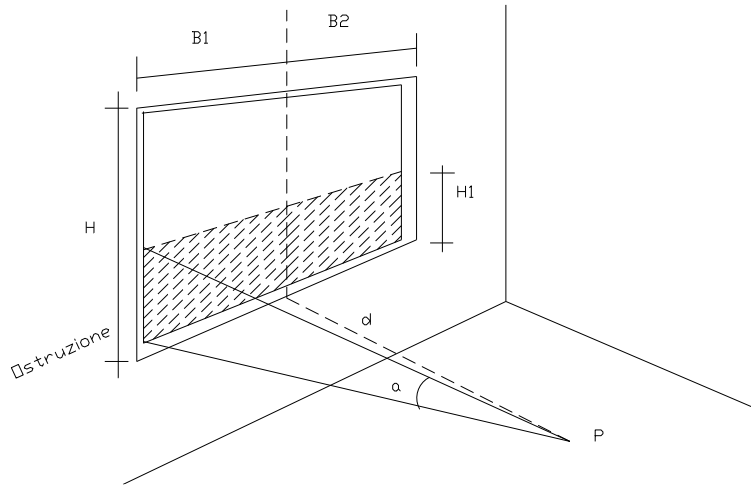


Figura 86: Parametri geometri per il calcolo della componente cielo con il metodo BRS

Cielo uniforme. Componente cielo ($D_s\%$)

...	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°
5,0	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°
4,0	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°
3,5	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°
3,0	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°
2,8	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°
2,6	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	12,0	13,1	69°
2,4	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°
2,2	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°
2,0	1,1	2,3	3,2	4,2	5,1	6,0	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°
1,9	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°
1,8	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°
1,7	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°
1,6	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°
1,5	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°
1,4	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°
1,3	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°
1,2	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°
1,1	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°
1,0	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	6,2	6,3	6,4	6,5	6,5	45°
0,9	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	5,5	5,6	5,6	5,7	5,7	42°
0,8	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°
0,7	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°
0,6	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°
0,5	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°
0,4	0,21	0,43	0,59	0,80	0,91	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4	1,4	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,7	1,7	22°
0,3	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°
0,2	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°
0,1	0,01	0,02	0,04	0,07	0,09	0,11	0,12	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,17	1,17	0,17	0,18	0,18	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°

Tabella 28: Calcolo dello SC per cielo uniforme

Cielo internazionale. Componente cielo ($D_s\%$)

...	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	69°
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	5,5	5,6	5,6	5,7	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	4,8	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	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	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°

Tabella 29: Calcolo del SC per cielo internazionale

6.3.2. CALCOLO DELLA COMPONENTE DI RIFLESSIONE INTERNA

La componente di riflessione interna, CRI, è definita, sempre in termini percentuali, come rapporto dell'illuminamento prodotto dalle riflessioni interne della luce diurna su una superficie e l'illuminamento del cielo coperto (internazionale o standard).

Essa dipende dai fattori di riflessione del pavimento, r_p , e delle pareti, r_w , e dal rapporto fra superficie vetrata e superficie del pavimento o anche della percentuale di superficie vetrata rispetto a quella del pavimento.

Il metodo BRS fornisce una tabella nella quale, mediante i suddetti parametri, si individua CRI (valore minimo). Nell'ultima riga in basso si ha un fattore di correzione che deve essere applicato al valore sopra individuato per ottenere il valore medio nella stanza.

CRI va sommato alle altre componenti (SC e CRE) per ottenere il DF.

Illuminazione laterale componente riflessione interna (D_i %)

$\frac{A_{\text{vetro}}}{A_{\text{pavim.}}}$	% vetro pavim.	r % pavimento											
		10				20				40			
		r % pareti											
		20	40	60	80	20	40	60	80	20	40	60	80
1:50	2	–	–	0,1	0,2	–	0,1	0,1	0,2	–	0,1	0,2	0,2
1:20	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
1:14	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
1:10	10	0,1	0,2	0,4	0,7	0,2	0,3	0,3	0,9	0,3	0,5	0,8	1,2
1:6,7	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
1:5	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
1:4	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
1:3,3	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
1:2,9	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
1:2,5	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
1:2,2	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
1:2	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		x1,9	x1,5	x1,3	x1,2	x1,8	x1,4	x1,3	x1,2	x1,6	x1,4	x1,2	x1,1

Tabella 30: Calcolo del CRI con il metodo BRS

6.3.3. CALCOLO DEL DAYLIGHT FACTOR, DF

Il calcolo del DF può essere schematizzato nelle seguenti fasi:

$$DF = SC + CRE + CRI$$

- SC si calcolano i rapporti B/d ed H/d della semifinestra e, scelto il tipo di cielo (Internazionale o Standard), si legge nella tabella corrispondente il valore di SC.
- CRE nel caso di presenza di ostruzione esterna si calcola SC sottraendo dal valore per la finestra intera quello relativo alla ostruzione. Quindi si calcola, sempre con la medesima tabella, il valore di CRE utilizzando il rapporto B/d e l'angolo α con il quale il punto di verifica P sottende l'ostruzione.
- CRI si utilizza un'apposita tabella nella quale occorre conoscere il fattori di riflessione del pavimento e delle pareti e il rapporto fra superficie vetrata e quella del pavimento (o anche in valore percentuale). Nel caso di lucernari (illuminamento dall'alto) si trascura CRE e si calcola SC mediante la relazione:

$$SC = \frac{A_{\text{vetro}}}{A_{\text{pavimento}}} \cdot u \cdot 100$$

ove u è funzione della pendenza del vetro secondo la Tabella 31:

Angolo inclinazione	u
30°	0,30
60°	0,20
90°	0,15

Tabella 31: Fattori di utilizzazione al variare degli angoli della copertura

Per l'illuminazione dall'alto la CRI si calcola con una nuova tabella nella quale, oltre ai parametri sopra indicati, entra anche la pendenza della apertura.

6.4. DIMENSIONAMENTO DELLE SUPERFICI VETRATE

Dalla lettura del D.M. del 5.7.1975 (punto 5) potrebbe sembrare che il vincolo a carattere illuminotecnico per la progettazione degli ambienti sia esclusivamente il rapporto area apertura area pavimento fissato non inferiore ad 1/8.

Così facendo si rischierebbe di ignorare del tutto il fatto che la finestra deve essere determinata anche sulla base della necessità di realizzare un comfort visivo del fruitore. Alcuni dati sperimentali mettono infatti in rilievo la correlazione esistente tra la dimensione della superficie vetrata ed il grado di soddisfazione espresso dagli occupanti.

A tal proposito la norma UNI 10530 al punto 5.6.2 individua un valore per la larghezza delle finestre negli ambienti di lavoro che dovrà risultare pari alla metà circa della larghezza della parete ed inoltre il senso di soddisfazione correlato alla visione dell'esterno può essere perseguito mediante superfici vetrate di estensione compresa fra 1/5 ed 1/3 della parete stessa.

Così facendo le dimensioni delle finestre, nel caso in cui non vi siano ostruzioni, assicurano una adeguata luminosità all'interno durante il giorno ma per ambienti dove la profondità è approssimativamente 2 o 3 volte l'altezza della finestra.

La legislazione vigente sul settore dell'illuminazione naturale degli interni non dà nessuna informazione sulla forma e sulla dimensione dell'ambiente in funzione della superficie vetrata per ottenere un livello di illuminamento uniforme nell'ambiente nonostante questo sia un dato fondamentale per il raggiungimento del comfort interno.

Se si considerano infatti ambienti aventi forma rettangolare, dimensione media di una stanza, dalla tabella seguente si evince come diminuendo l'altezza della superficie vetrata, mantenendo costante la larghezza della stessa e la distribuzione della luminanza del cielo, si ottiene una conseguente riduzione dell'illuminamento in corrispondenza del fondo della stanza.

Per un predimensionamento della superficie vetrata potrebbero utilizzarsi gli studi condotti da *Vaughn Bradshaw*, con qualche opportuno accorgimento, il quale consiglia per una buona distribuzione della luce diurna in una stanza l'altezza della finestra più quella del davanzale non inferiore alla metà della dimensione in profondità dell'ambiente.

Se l'altezza della finestra ha un ruolo fondamentale sulla quantità di luce disponibile all'interno dell'ambiente, la posizione della superficie vetrata è importante per la qualità luminosa dell'interno considerato: le finestre poste in alto, finestra a nastro, come pure i lucernari, sono maggiormente consigliabili per lo svolgimento di compiti visivi orizzontali (es. lettura); *in questi casi la provenienza dall'alto della luce solare migliora sia il livello di illuminamento orizzontale che i rapporti di illuminazione nel campo visivo, riducendo la radianza delle superfici verticali che fanno da sfondo. Viceversa le finestre verticali poste in basso, oltre ad illuminare in misura minore l'ambiente, sono più indicati per compiti visivi verticali.*

Cerchiamo a questo punto di comprendere quali siano le principali integrazioni alle scarse disposizioni nazionali contenute nelle leggi e nei decreti dei Regolamenti Comunali Edilizi in riferimento alle dimensioni delle superfici vetrate.

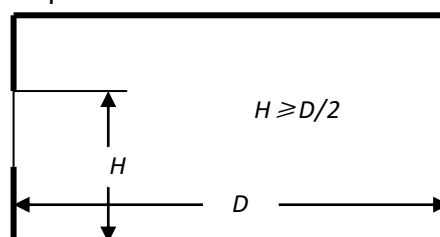


Figura 87: Rapporto altezza profondità consigliato da Vaughn

Dall'analisi dei più rappresentativi dei 105 Regolamenti Edilizi si riscontra come questi assumano come parametro di riferimento il rapporto Sf/Sp ed inoltre vengono proposti in alcuni casi valori di tale rapporto più restrittivi del limite imposto dalla normativa nazionale, altri invece sono meno vincolanti come appare chiaramente dalla tabella seguente.

Tale differenze sono imputabili o ad un non risolto contrasto tra le fonti legislative o il più delle volte a fattori quali:

Posizionamento del locale rispetto al piano di riferimento stradale

LOCALITA'	RAPPORTO Sf/Sp	POSIZIONE ALTIMETRICA DEL LOCALE
Bergamo	Sf/Sp \geq 1/7 Sf/Sp \geq 1/8 Sf/Sp \geq 1/10 Sf/Sp \geq 1/12	Al piano interrato Al piano terra Ai piani superiori Al piano sottotetto
Varese	Sf/Sp \geq 1/6 Sf/Sp \geq 1/10	Al piano terra Ai piani superiori
Trento	Sf/Sp \geq 1/8 Sf/Sp \geq 1/10	Al piano terra Ai piani superiori
Belluno	Sf/Sp \geq 1/8 Sf/Sp \geq 1/10 Sf/Sp \geq 1/12	Al piano terra Ai piani superiori All'ultimo piano di edifici con almeno 3 piani
Pordenone	Sf/Sp \geq 1/8 Sf/Sp \geq 1/10	Al piano terra Ai piani superiori
Piacenza	Sf/Sp \geq 1/7 Sf/Sp \geq 1/8	Nei locali abitabili ricavati nei seminterrati In tutti gli altri casi
Perugia	Sf/Sp \geq 1/8 Sf/Sp \geq 1/9 Sf/Sp \geq 1/10 Sf/Sp \geq 1/12	Nei locali seminterrati abitabili Al piano terra Ai piani superiori Nel piano sottotetto abitabile

Tabella 32: Valori Sf/Sp per posizione altimetrica in alcuni comuni italiani

Caratteristiche geometriche degli ambienti

LOCALITA'	RAPPORTO Sf/Sp	ALTEZZA DEL LOCALE
Potenza	Sf/Sp \geq 1/6 Sf/Sp \geq 1/8	2,8 m \leq H \leq 3,0 m H \geq 3,0 m
V. Valentia	Sf/Sp \geq 1/6 Sf/Sp \geq 1/8	2,8 m \leq H \leq 3,0 m H \geq 3,0 m
Enna	Sf/Sp \geq 1/8 Sf/Sp \geq 1/10	2,8 m \leq H \leq 3,0 m H \geq 3,0 m

Tabella 33: Valori Sf/Sp per altezza dei locali in alcuni comuni italiani

Destinazione d'uso dell'ambiente

LOCALITA'	RAPPORTO Sf/Sp	DESTINAZIONE D'USO
Brindisi	Sf/Sp \geq 1/8 Sf/Sp \geq 1/10	In tutti gli altri casi Solo per edifici rurali

Tabella 34: Valori Sf/Sp per destinazione d'uso in alcuni comuni italiani

Presenza di sporgenze o aggetti:

LOCALITA'	RAPPORTO Sf/Sp	TIPOLOGIA AGGETTO
Bologna	Sf/Sp \geq 1/8 Sf/Sp \geq 1/16	Nel caso di edifici di nuova costruzione. Per parti apribili sotto porticati il rapporto Sf/Sp dovrà essere calcolato facendo riferimento alla superficie del pavimento dell'ambiente interessato più quello dell'intero porticato prospiciente all'ambiente stesso. Per le parti apribili sotto balconi con aggetto >1,30m le dimensioni dovranno essere proporzionalmente maggiori dei minimi prescritti, secondo la progressione di 0,06 m ² ogni 0,05 m di ulteriore aggetto e fino ad uno sporto massimo del balcone di 2,00m. La profondità massima dei vani, misurata perpendicolarmente al piano della parete finestrata e deve essere <2,5 volte l'altezza dei vani stessi.
Siracusa	Sf/Sp \geq 1/6 Sf/Sp \geq 1/7 Sf/Sp \geq 1/8	Per sporgenze sopra la finestra di larghezza compresa tra 2,5 e 3,5 m. Per sporgenza sopra la finestra di larghezza compresa tra 1,5 e 2,5 m. Per sporgenza sopra la finestra di larghezza \leq 1,5 m.

Tabella 35: Valori Sf/Sp per tipologia dell'aggetto in alcuni comuni italiani

Il valore minimo della superficie finestrata variano, con riferimento ai Regolamenti Edilizi Comunali, da un minimo di 0,6 m² ad un massimo di 2,0 m².

Tali differenze non dipendono spesso dalle diverse caratteristiche geografiche del sito (altitudine, latitudine, etc.), ma sono nella maggior parte dei casi casuali; ad esempio in città molto vicine tra loro, come Napoli, Caserta, Salerno i Regolamenti Edilizi impongono valori sensibilmente diversi: da un minimo di 1,0 m² ad un massimo di 2,0 m², come più chiaramente visibile dalla Tabella 36.

Un altro aspetto singolare è la prescrizione di medesimi valori di Sf per realtà differenti come Trieste e Taranto.

Si è riscontrato inoltre, in alcuni casi, la variazione del valore minimo della superficie finestrata all'interno dello stesso Regolamento Edilizio; ad esempio quello di Trento propone valori diversi per gli edifici di fondovalle e di montagna, quello di Pavia per gli edifici rurali e di città, quello di Perugia per i locali posti nei seminterrati abitabili, al piano terra e ai piani superiori.

LOCALITA'	DIMENSIONE MINIMA FINESTRA (m ²)	NOTE
Trento	0,8 1,2	Per le zone di montagna Per le zone di fondovalle
Perugia	1,0 1,2	Nel sottotetto abitabile Nel piano terra e nei piani superiori

	1,4	Nel piano seminterrato reso abitabile
Caserta	1,2	Nelle case rurali
Brindisi	1,3	
Alessandria	1,4	
Bergamo	1,5	Nel caso di ambienti con una sola finestra
Teramo	1,5	Nei piani superiori
Arezzo, Matera, Reggio Calabria	1,5	
Varese	1,5 1,8	Nei piani superiori Al piano terra
Pavia	1,5 2,0	Una sola finestra in edifici rurali Nel caso di ambienti con una sola finestra
Pescara	1,6	Nel caso di ambienti con una sola finestra

Tabella 36: Dimensioni minime finestre in alcuni comuni italiani

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. D. FACONTI, S. PIARDI: "La qualità ambientale degli edifici", MAGGIOLI Editore, 1998
2. A. SACCHI, G. CAGLIERIS: "Fisica Tecnica - Acustica e Illuminotecnica", UTET, Torino
3. AA.VV.: Manuale di Progettazione edilizia, HOEPLI, 1995
4. AA.VV.: Il Nuovo Manuale dell'Architetto", Ed. MANCOSU,
5. G. CAMMARATA, A. FICHERA, L. MARLETTA: "C.N.R. - Manuale sulla qualità Fisico-Tecnica dell'ambiente costruito" - Progetto Finalizzato edilizia 1994, vol. II: Simulazione, Capitolo CII
6. G. CAMMARATA: "Il comfort luminoso", Dispense per il Corso di Master in Ergonomia, Catania 1999-2000
7. AGHEMO C. AZZOLINO, Il progetto dell'elemento di involucro esterno opaco, CELID, Torino, 1996;
8. AGHEMO C. AZZOLINO, Illuminazione naturale, metodi ed esempi di calcolo, CELID, Torino, 1995;
9. ARGAN G. C., La storia dell'arte italiana, Sansoni, Firenze, 1975;
10. BAKER N., FANCHIOTTI A., STEEMERS K., Daylighting in Architecture, A European Reference Book, Commission of the Communities Directorate-General XII for Science Research and Development; James & James, 1993;
11. BIANCHI F., L'architettura della luce, Edizioni Kappa, Roma, 1991;
12. BIANCHI F., PULCINI, Manuale di Illuminotecnica, La nuova Italia, 1995;
13. BIASIOTTI, S. BIASIOTTI, Termologia e gestione degli edifici, EPC, 1995;
14. CHIOLINI P., Il contributo dell'illuminazione naturale negli edifici per l'industria, Tamburini Editore, Milano, 1966;
15. CODEGONE C., Problemi di illuminazione, V. Giorgio, 1950;
16. FORCOLINI G., Illuminazione di interni, Hoepli, 1988;
17. HOCHBERG J. E. "Psicologia della percezione", A. Martello e Giunti, 1975;
18. GOETHE J. W., "La teoria dei colori", Il Saggiatore, Milano, 1979;
19. GREGORY R.L., Occhio e cervello la psicologia del vedere, Casa editrice il Saggiatore, Milano, 1966;
20. LONGO P., La cromoterapia applicata alle disabilità attentive: cromoterapia in classe, UPSEL, Torino, 1993;
21. MAIONE M., La visione e suoi meccanismi, Editrice Maccari, Parma, 1985;
22. MANZONI L., La luce, progetto scienza filosofia, Reggiani Editore, Milano, 1991;
23. PAROLINI M. PARIBENI, Tecnica dell'illuminazione, UTET, Torino, 1977;
24. RONCH V., Storia della luce da Euclide a Einstein, Laterza, Bari, 1983;
25. ROSSINI D. SEGRÈ, Tecnologia Edilizia, Hoepli, Milano, 1972;
26. TORRICELLI SALA SECCHI, La luce del giorno, Alinea, 1995;
27. G. LEONE: Tesi di dottorato su: "Illuminazione Naturale e sue problematiche", Palermo 1999
28. AA. VV: Manuale di Progettazione Edilizia, Hoepli;
29. AA. VV.: Nuovo Manuale dell'Architetto, MANCOSU Editore
30. PHILIPS LIGHTING: Lighting Manual, 1993
31. *Manuale di Progettazione Edilizia*, Hoepli.

INDICE GENERALE

1.	<u>UNITÀ DI MISURA ILLUMINOTECNICHE</u>	4
1.1.	GRANDEZZE SOGGETTIVE E GRANDEZZE OGGETTIVE	6
1.1.1.	FLUSSO LUMINOSO	7
1.1.2.	INTENSITÀ LUMINOSA	8
1.1.3.	LUMINANZA	10
1.1.4.	ILLUMINAMENTO	10
1.1.5.	RADIANZA	12
1.2.	LA SFERA DI ULBRICHT	13
1.2.1.	MISURA DEL FLUSSO LUMINOSO CON LA SFERA DI ULBRICHT	13
1.3.	METODI DI MISURA DELLE GRANDEZZE ILLUMINOTECNICHE	14
1.3.1.	MISURA DEL FLUSSO CON IL LUXOMETRO	14
1.3.2.	IL BANCO FOTOMETRICO	15
1.3.3.	CALCOLO DEL FLUSSO CON IL METODO IEC	16
1.3.4.	CALCOLO DELL'ILLUMINAMENTO FRA SUPERFICI	17
1.3.5.	ILLUMINAMENTO IN UN PUNTO DA SUPERFICIE ESTESA	18
1.3.6.	ILLUMINAMENTO DA UNA SORGENTE LINEARE	19
2.	<u>LA STORIA DELLA TEORIA DELLA LUCE</u>	20
2.1.	FISIOLOGIA DELL'OCCHIO	24
2.2.	PRINCIPI DELLA VISIONE	26
2.2.1.	L'ADATTAMENTO VISIVO	30
2.2.2.	L'ACCOMODAMENTO	31
2.2.3.	IL CONTRASTO	31
2.2.4.	LA BRILLANZA	33
2.2.5.	L'ABBAGLIAMENTO VISIVO	35
2.2.6.	FATTORE DI RESA DEL CONTRASTO	36
2.2.7.	L'ACUITA' VISIVA	37
2.2.8.	OGGETTI IN MOVIMENTO E TEMPO NECESSARIO PER LA VISIONE	39
2.2.9.	POSIZIONE DELL'IMMAGINE SULLA RETINA	40
2.3.	IL SENSO MORFOLOGICO	40
2.4.	IL COLORE	42
2.4.1.	COLORIMETRIA	44
2.4.2.	<i>PLANCK'S LOCI</i>	48
2.4.3.	EFFETTO CROMATICO E INDICE DI RESA CROMATICA	49
3.	<u>GRANDEZZE FOTOMETRICHE DI RIFERIMENTO</u>	50
3.1.	L'EMITTANZA LUMINOSA O RADIANZA	53
3.2.	L'ESPOSIZIONE LUMINOSA	54
3.3.	COEFFICIENTE DI ASSORBIMENTO	54
3.4.	COEFFICIENTE DI RIFLESSIONE	54
3.5.	VALORI DI R CONSIGLIATI PER LE SUPERFICI INTERNE DI UNA STANZA	54
3.6.	LE SORGENTI LUMINOSE	54
3.7.	CLASSIFICAZIONE DELLE LAMPADE	55
3.8.	CARATTERIZZAZIONE DELLE LAMPADE	55
3.8.1.	LAMPADE AD INCANDESCENZA	56
3.8.2.	LAMPADE ALOGENE	57
3.8.3.	LAMPADE A LUMINESCENZA	58

3.8.4.	LAMPADINE A LUCE MISCELATA	61
3.8.5.	LAMPADA A VAPORE DI MERCURIO AD ALTA PRESSIONE	62
3.8.6.	LAMPADINE A VAPORI DI SODIO	63
3.8.7.	LAMPADINE AD ARGON	64
3.8.8.	LAMPADINE AD INDUZIONE	64
3.9.	LAMPADINE A LED	64
3.9.1.	COLORE DELLA LUCE EMESSA DAI LED	66
3.9.2.	EFFICIENZA ED AFFIDABILITÀ	67
3.9.3.	ALIMENTAZIONE DEI LED	68
3.9.4.	UTILIZZO DEI LED	69
3.9.5.	UTILIZZO DEI LED NELL'ILLUMINAZIONE	70
3.9.6.	SELEZIONE DEI LED	71
3.9.7.	CLASSE DI EFFICIENZA ENERGETICA	72
3.9.8.	INDICE DI RESA CROMATICA PER LE LAMPADINE A LED	73
3.10.	APPARECCHI ILLUMINANTI	74
3.10.1.	TIPOLOGIA DEI DIFFUSORI	75
4.	IMPIANTO DI ILLUMINAZIONE	76
4.1.	L'AMBIENTE INTERNO ILLUMINATO ARTIFICIALMENTE	76
4.2.	PROCEDURE DI CALCOLO	78
4.3.	METODI DI CALCOLO GLOBALI	79
4.3.1.	CALCOLO DEL FLUSSO CIRCOLANTE	79
4.3.2.	FATTORE DI MANUTENZIONE	81
4.3.3.	COEFFICIENTI DI RIFLESSIONE	82
4.3.4.	METODO DEL FATTORE DI UTILIZZAZIONE	83
4.4.	IL COMPORTAMENTO DEI CORPI COLPITI DA RADIAZIONI LUMINOSE	85
4.5.	DISTANZA MINIMA TRA GLI APPARECCHI, D	86
5.	IL BENESSERE VISIVO E LA PROGETTAZIONE ILLUMINOTECNICA	87
5.1.	I PARAMETRI CHE INFLUENZANO LA PRESTAZIONE VISIVA	89
5.2.	L'ILLUMINAMENTO DEL COMPITO VISIVO	90
5.3.	IL CONTRASTO	94
5.4.	L'ABBAGLIAMENTO	95
5.5.	LA PSICOLOGIA DEL COLORE	96
5.5.1.	LA PSICOLOGIA DEL COLORE NEL LAVORO	98
5.6.	VOLUME DI OFFESA	101
5.6.1.	POSIZIONE DELL'APPARECCHIO ILLUMINANTE	101
6.	ILLUMINAZIONE NATURALE	106
6.1.	ILLUMINAMENTO INTERNO DOVUTO ALLA VOLTA CELESTE	106
6.2.	FATTORE DI LUCE DIURNA (O DAYLIGHT FACTOR), DF	107
6.3.	CALCOLO DEL FATTORE DI LUCE DIURNA	108
6.3.1.	CALCOLO DELLA COMPONENTE CIELO	109
6.3.2.	CALCOLO DELLA COMPONENTE DI RIFLESSIONE INTERNA	111
6.3.3.	CALCOLO DEL DAYLIGHT FACTOR, DF	112
6.4.	DIMENSIONAMENTO DELLE SUPERFICI VETRATE	113
	Posizionamento del locale rispetto al piano di riferimento stradale	114
	Caratteristiche geometriche degli ambienti	114
	Destinazione d'uso dell'ambiente	115
	Presenza di sporgenze o aggetti	115

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: “Donna che cuce alla luce della lampada” (1828) di Georg Friedrich Kersting	1
Figura 2: Vista della Terra nelle ore notturne e delle zone più illuminate	2
Figura 3: Distribuzione spettrale delle onde elettromagnetiche.	5
Figura 4: Radiazione solare fuori dell’atmosfera e al suolo	5
Figura 5: Curve di visibilità relativa fotopica e scotopica	6
Figura 6: Tipi di sorgenti luminose	7
Figura 7: Significato di Flusso Luminoso	8
Figura 8: Relazione fra intensità ed angolo solido	9
Figura 9: Intensità per corpi lambertiani	9
Figura 10: Sorgenti puntiformi	10
Figura 11: Luminanza per corpi lambertiani	11
Figura 12: relazione fra flusso ed Intensità	11
Figura 13: Luminanza per superfici trasparenti	12
Figura 14: Luminanza per superfici lambertiane	12
Figura 15: Distribuzione interna del flusso nella sfera di Ulbricht	13
Figura 16: Sfera di Ulbricht	14
Figura 17: Schema di un luxometro a cellula fotovoltaica	14
Figura 18: Tipologia di filtri per le celle fotovoltaiche	15
Figura 19: Banco fotometrico	15
Figura 20: Solido fotometrico e sua sezione in piano	16
Figura 21: Sezioni per il metodo IEC	16
Figura 22: Calcolo del flusso con il metodo IEC	16
Figura 23: Illuminamento fra due superfici	17
Figura 24: Scambio radiativo fra superfici	18
Figura 25: Illuminamento da una superficie in un punto	19
Figura 26: Ritratti di Christopher Huygens, (da ignoto) e di Isaac Newton, (ritratto da C. Jervas)	21
Figura 27: Anatomia dell’occhio umano e dei recettori retinici: coni e bastoncelli	24
Figura 28: Illuminamento in lux di una superficie per diverse situazioni	27
Figura 29: Sensibilità relativa dell’occhio alle varie lunghezze d’onda	28
Figura 30: Livello della visibilità al variare dell’illuminamento relativo	29
Figura 31: Curva di adattamento visivo dei coni e dei bastoncelli	30
Figura 32: Contrasto luminoso	32
Figura 33: La Griglia di Hermann	33
Figura 34: Esempi di brillantezza	34
Figura 35: Le Bande di Mach	34
Figura 36: Acuità visiva	38
Figura 37: Acuità visiva in funzione della luminanza	39
Figura 38: Posizione dell’immagine ed acuità visiva	40
Figura 39: Legge della vicinanza	41

Figura 40: Legge della somiglianza	41
Figura 41: Legge della chiusura	41
Figura 42: Esempi di illusione ottica	42
Figura 43: Spettro della luce visibile	43
Figura 44: Sintesi additiva e sottrattiva dei colori	44
Figura 45: Componenti cromatiche X, Y e Z della CIE	45
Figura 46: Il triangolo del colore	47
Figura 47: Diagramma cromatico CIE 1931	48
Figura 48: Schema costruttivo di una lampada ad incandescenza	56
Figura 49: Tipologie di lampade ad incandescenza	57
Figura 50: Lampada alogena	58
Figura 51: Schema di funzionamento di una lampada a luminescenza	58
Figura 52: Tipica lampada a luminescenza	59
Figura 53: Curva caratteristica di una lampada a luminescenza	59
Figura 54: Polarizzazione di una lampada a luminescenza	60
Figura 55: Lampada fluorescente compatta	61
<i>Figura 56: Spettri di lampade a luminescenza</i>	62
<i>Figura 57: Lampada a luce miscelata</i>	62
Figura 58: Lampada a vapore di mercurio ad alta pressione	63
Figura 59: Lampada a vapori di sodio	63
Figura 60: Distribuzione spettrale di lampade al sodio	64
Figura 61: Spettro luminoso dei vari LED	65
Figura 62: Durata in ore di un LED in base alla temperatura di giunzione ed il flusso luminoso	67
Figura 63: Tipologie di LED commerciali	70
Figura 64: LED per illuminazione stradale e ad alta intensità	71
Figura 65: Nuova Etichetta Energetica delle lampadine	73
Figura 66: Tipologia dei diffusori	74
Figura 67: Corpo illuminante per lampade a luminescenza	75
Figura 68: Flusso circolante nella Sfera di Ulbricht	79
Figura 69: Sezione di riferimento del locale	83
Figura 70: Compito visivo e prestazione visiva	88
Figura 71: Esempio di corretta illuminazione: lo studio	91
Figura 72: Identificazione delle zone in rapporto alla luminanza	93
Figura 73: Influenza del contrasto	95
Figura 74: Posizioni per evitare l'abbagliamento	96
Figura 75: Combinazione dei colori in funzione dell'esposizione delle finestre	97
Figura 76: Influenza del colore delle pareti	98
Figura 77: Interrelazione colori/emotività	99
Figura 78: Volume di offesa	102
Figura 79: Volume di offesa in un posto di lavoro	103
Figura 80: Corretta posizione dell'apparecchio illuminante	103
Figura 81: Definizione di angolo di abbagliamento	104
Figura 82: Curve di luminanza A: apparecchi senza bordo luminoso.	104

Figura 83: Curve di luminanza B: apparecchi con bordo luminoso	105
Figura 84: Le componenti fondamentali dell'illuminazione naturale	107
Figura 85: Livelli di illuminamento in diverse ore del giorno	107
Figura 86: Parametri geometri per il calcolo della componente cielo con il metodo BRS	110
Figura 87: Rapporto altezza profondità consigliato da Vaughn	113

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: Tipologia della visione	28
Tabella 2: Valori dell'indice di abbagliamento	36
Tabella 3: Valori frequenziali delle componenti cromatiche	45
Tabella 4: Valori minimi di illuminazione consigliati	51
Tabella 5: Illuminamento, Tonalità del colore, Resa cromatica e Abbagliamento	52
Tabella 6: Illuminamento, Tonalità del colore, Resa cromatica e Abbagliamento	53
Tabella 7: Illuminamento, Tonalità del colore, Resa cromatica e Abbagliamento	53
Tabella 8: Fattori di riflessione consigliati	54
Tabella 9: Valori tipici dei parametri caratteristici per vari tipi di lampade	56
Tabella 10: Caratteristiche delle lampade ad incandescenza	57
Tabella 11: Caratteristiche delle lampade a luminescenza	61
Tabella 12: Tensione di giunzione per le tipologie di LED	66
Tabella 13: Valori raccomandati per LLMF e LSF	81
Tabella 14: Valori raccomandati per LMF	82
Tabella 15: Valori raccomandati per RSMF	82
Tabella 16: Coefficienti di riflessione per vari materiali di rivestimento delle pareti	82
Tabella 17: Valori di M e di N	84
Tabella 18: Fattori di Utilizzazione	85
Tabella 19: Distanza fra apparecchi illuminanti	86
Tabella 20: Parametri per una corretta percezione visiva	90
Tabella 21: Illuminamenti consigliati	93
Tabella 22: Poteri riflettenti delle pareti	94
Tabella 23: Fattori di riflessione dei colori	96
Tabella 24: Schema delle dominanti	97
Tabella 25: Effetti psicologici del colore	101
Tabella 26: Classe di qualità visiva	102
Tabella 27: Valori minimi consigliati per il fattore di luce diurna	108
Tabella 28: Calcolo dello SC per cielo uniforme	110
Tabella 29: Calcolo del SC per cielo internazionale	111
Tabella 30: Calcolo del CRI con il metodo BRS	112
Tabella 31: Fattori di utilizzazione al variare degli angoli della copertura	112
Tabella 32: Valori Sf/Sp per posizione altimetrica in alcuni comuni italiani	114
Tabella 33: Valori Sf/Sp per altezza dei locali in alcuni comuni italiani	114
Tabella 34: Valori Sf/Sp per destinazione d'uso in alcuni comuni italiani	115
Tabella 35: Valori Sf/Sp per tipologia dell'oggetto in alcuni comuni italiani	115
Tabella 36: Dimensioni minime finestre in alcuni comuni italiani	116