



APPUNTI DI TEORIA

5. PROGETTO DEI SISTEMI DI ILLUMINAZIONE

5.1 Requisiti dell'illuminazione di interni

Illuminare un locale, o più in generale un *compito visivo* (cioè una superficie sulla quale viene svolta un'attività visiva), significa non solo indirizzare verso quella superficie un determinato flusso luminoso, ma anche creare le condizioni di illuminazione affinché tale attività venga effettuata nel modo più efficiente e più confortevole, senza conseguenze negative per altri che ne potessero essere influenzati.

Per ottenere tali risultati, nel progetto di un impianto di illuminazione devono essere presi in considerazione i seguenti fattori:

- il livello di illuminamento medio e la sua uniformità sul compito visivo;
- l'equilibrio delle luminanze nel campo visivo (contrasto fra luminanza del compito visivo e luminanza delle altre superfici presenti nel campo visivo);
- la limitazione dell'abbagliamento, con riferimento sia al fastidio (*discomfort glare*), sia alla riduzione della capacità visiva (*disability glare*);
- la resa del contrasto e la direzionalità della luce;
- il colore della luce e la resa cromatica;
- l'efficienza energetica del sistema di illuminazione;
- l'integrazione della luce artificiale con quella naturale;
- l'integrazione dell'impianto con l'architettura;
- l'economicità dell'impianto.

La norma UNI 10380 "Illuminazione di interni con luce artificiale" stabilisce (per i vari tipi di locale, compito visivo, o attività) i valori raccomandati dei principali parametri di progetto illuminotecnica.



Si riporta di seguito un esempio tratto dalla norma sopra citata:

Tipo di locale, compito visivo o attività	Illuminamento medio E_m (lx) [1]	Gradazione di colore [2]	Gruppo di resa del colore [3]	Classe di limitazione dell'abbagliamento [4]
Aree di passaggio e corridoi	50-100-150	W,I	3	E
Uffici generici	300-500-750	W,I	1B	B
Assemblaggio materiale elettronico	500-750-1000	I,C	2	B

Note:

- [1] Per l'illuminamento medio sul compito visivo E_m vengono generalmente forniti tre valori: si utilizza il valore intermedio nei casi normali; il valore massimo quando il compito visivo richiede grande attenzione e grande velocità di percezione o quando il contrasto di luminanza è ridotto; il valore minimo quando il compito visivo deve essere eseguito solo occasionalmente o quando il contrasto è elevato
- [2] La gradazione di colore indica la tonalità della luce della lampada in funzione della Temperatura correlata di colore CCT , secondo il seguente schema:

Sigla	Tonalità luce	CCT (K)
W	calda	< 3300
I	neutra	3300 – 5300
C	fredda	> 5300

- [3] I gruppi di resa del colore vengono stabiliti in base al valore di indice di resa cromatica R_a :

Gruppo di resa del colore	R_a
1A	> 90
1B	80 – 90
2	60 – 80
3	40 – 60
4	20 – 40

- [4] Sono previste cinque classi di limitazione dell'abbagliamento, in funzione della difficoltà del compito visivo: dalla più severa (classe A) alla meno severa (classe E); il metodo delle curve limite CIE permette di stabilire, per ciascuna delle suddette classi ed in funzione dell'illuminamento richiesto sul piano di lavoro, il valore massimo di luminanza che devono presentare gli apparecchi di illuminazione nella direzione dell'osservatore.



5.2 Progetto dell'illuminazione artificiale di interni

Faremo riferimento essenzialmente al calcolo di un sistema di illuminazione generale, ovvero finalizzato a realizzare un livello di illuminazione sostanzialmente uniforme su tutto il piano di lavoro. L'obiettivo del calcolo è determinare il numero e la posizione degli apparecchi di illuminazione necessari per ottenere il valore di illuminamento medio stabilito.

Metodo del flusso totale

E' il metodo di calcolo più semplice, in quanto non permette di determinare la distribuzione spaziale dell'illuminamento, ma fa riferimento solo al livello di illuminamento medio E_m sul piano di lavoro di area A . Esso si applica solo ad ambienti di forma regolare, tipicamente parallelepipeda.

Il flusso luminoso utile che complessivamente raggiunge il piano di lavoro, direttamente o attraverso la riflessione delle varie superfici, è:

$$\Phi_u = AE_m$$

Esso è legato al flusso totale emesso dai corpi illuminati dalla formula:

$$\Phi_t = \frac{AE_m}{u} D$$

dove u è il *coefficiente di utilizzazione* e D il *fattore di deprezzamento* (tipicamente assunto pari a 1,25) che tiene conto del decadimento nel tempo delle prestazioni dell'impianto. Il coefficiente di utilizzazione dipende sia dal tipo di apparecchi illuminanti impiegati, sia dalle caratteristiche geometriche dell'ambiente e dai coefficienti di riflessione delle superfici che delimitano il locale. Nei manuali di progettazione o nei cataloghi delle case costruttrici sono reperibili delle tabelle per il calcolo di u in funzione dell'*indice del locale*, i , e del valor medio del *coefficiente di riflessione* delle pareti verticali, r_w , del soffitto, r_c , e del pavimento r_f . L'indice del locale è dato dall'espressione:

$$i = \frac{ab}{h(a+b)} \text{ nel caso di illuminazione diretta}$$

$$i = \frac{ab}{H(a+b)} \text{ nel caso di illuminazione indiretta}$$

dove:

a, b = dimensioni in pianta del locale;

h = altezza di montaggio del corpo illuminante (rispetto al piano di lavoro)

H = altezza del soffitto (rispetto al piano di lavoro)



Dividendo il flusso totale per il flusso Φ' emesso da un apparecchio, si determina il numero N di apparecchi di illuminazione necessari per ottenere il livello di illuminamento medio richiesto:

$$N = \frac{\Phi_t}{\Phi'} = \frac{AE_m D}{\Phi' u}$$

La distribuzione degli apparecchi dovrà essere tale da garantire un fattore di uniformità (E_{min}/E_{medio}) pari ad almeno 0,8 e da evitare fenomeni di abbagliamento in relazione alla distribuzione dei posti di lavoro.

Aspetti energetici dell'illuminazione artificiale

La potenza elettrica P_{el} assorbita da un impianto costituito da N apparecchi di illuminazione, di rendimento ottico η_{ottico} , equipaggiati ciascuno con n lampade di efficienza ε_l e potenza unitaria P'_{el} , è data dalla relazione:

$$P_{el} = nNP'_{el} = \frac{N\Phi'}{\varepsilon_l\eta_{ottico}} = \frac{\Phi_t}{\varepsilon_l\eta_{ottico}}$$

da cui, introducendo il coefficiente di utilizzazione:

$$P_{el} = \frac{AE_m D}{\varepsilon_l\eta_{ottico} u}$$

Si può a questo punto introdurre l'efficienza globale dell'impianto (*installed efficacy*), ε_g , data dal rapporto fra illuminamento medio sul piano di lavoro e potenza installata per unità di area:

$$\varepsilon_g = \frac{E_m}{P_{el}/A} = \frac{\varepsilon_l\eta_{ottico} u}{D}$$

Si segnala l'importanza tecnica del parametro "potenza installata per unità di area": interessa infatti l'impiantista elettrico, in quanto parametro sintetico per il dimensionamento delle linee di alimentazione e dei quadri con le relative protezioni, ed interessa anche il progettista termotecnico, in quanto la potenza assorbita dall'impianto di illuminazione costituisce un termine importante del carico termico dell'impianto di condizionamento dell'aria.



Valori obiettivo dell'efficienza globale sono riportati nella tabella che segue:

Applicazione	Indice del locale	Gruppo di resa del colore			
		1B	2	3	4
Edifici industriali di grande altezza	1		18-29	14-23	21-45
	2		23-37	18-29	27-55
	5		27-43	20-32	32-60
Edifici industriali di altezza normale	1	14-23	14-23	14-23	19-31
	2	18-29	18-29	18-29	23-37
	5	20-32	20-32	20-32	26-42
Edifici commerciali	1	14-19	14-19	14-19	
	2	18-27	18-27	18-27	
	5	20-30	20-30	20-30	

Occorre infine precisare che un valore elevato di efficienza globale non è condizione sufficiente per ottenere una elevata prestazione energetica dell'impianto. Quest'ultima richiede infatti che la quantità di luce artificiale prodotta possa essere regolata in base alle effettive richieste, tenendo conto delle variazioni nelle condizioni di occupazione degli spazi e di disponibilità di luce naturale.

Un primo accorgimento per migliorare la regolazione dell'impianto consiste nel realizzare linee di alimentazione, con relativi interruttori, distinte per gruppi di apparecchi di illuminazione, in modo da poter accendere o spegnere selettivamente singoli settori dell'impianto. Il livello successivo prevede l'adozione di sistemi di regolazione continua del flusso luminoso (*dimmers*), che possono essere collegati a rilevatori di presenza o sensori di luce naturale, ed eventualmente inseriti in sistemi complessi di supervisione degli impianti. Questi ultimi rientrano nella vasta categoria di sistemi di *building automation* e permettono, fra l'altro, di programmare gli orari di accensione e spegnimento degli impianti.

5.3 Illuminazione naturale di interni

L'illuminazione naturale è fortemente desiderabile per vari motivi, non ultimi la sua intrinseca efficienza energetica ed il fatto che all'illuminazione naturale si associa quasi sempre la possibilità di visione del panorama circostante.

Il sole invia al confine esterno dell'atmosfera terrestre un flusso di radiazione elettromagnetica mediamente pari a 1353 W/m^2 , di cui il 45% circa compreso nell'intervallo visibile. Lo spettro di tale radiazione è assimilabile a quello di un corpo nero a 5700 K e presenta quindi il massimo proprio al centro dell'intervallo del visibile.



Nell'attraversare l'atmosfera la radiazione solare subisce fenomeni di riflessione, rifrazione, assorbimento e dispersione che ne modificano significativamente le caratteristiche.

E' utile considerare la radiazione che incide su una superficie a livello suolo come somma di tre componenti:

- La *radiazione diretta* è quella che raggiunge la superficie avendo subito solo la rifrazione ed il parziale assorbimento da parte dell'atmosfera; è presente solo quando il cielo è sereno e se la superficie ricevente "vede" il disco solare. Può essere calcolata con relazioni trigonometriche, ampiamente documentate in letteratura, in funzione delle coordinate della superficie ricevente e della posizione del sole.
- La *radiazione diffusa* è quella che scaturisce dalla dispersione dei raggi solari; proviene da tutta la volta celeste ed è presente anche quando il cielo è coperto. In prima approssimazione si può rappresentare la volta celeste come una superficie emisferica, con una distribuzione di luminanza nota e che presenta simmetria di rotazione (questo significa che una parete verticale riceve lo stesso flusso di radiazione diffusa indipendentemente dall'orientamento).
- La *radiazione riflessa* è quella che incide sulla superficie dopo aver subito una o più riflessioni da parte del terreno e delle facciate degli edifici.

Dal punto di vista illuminotecnico la radiazione diretta riveste scarso interesse; essa è infatti troppo intensa e concentrata e deve quindi essere opportunamente schermata per evitare l'abbagliamento: le finestre più efficaci dal punto di vista della luce naturale sono quindi tipicamente quelle esposte a nord.

Alla luce naturale può essere assegnato un valore di "efficienza", intesa come rapporto fra valore in lumen e potenza in Watt associata, indicativamente pari a 110-120 lm/W; tale dato è variabile in ragione dello spettro della luce naturale, che a sua volta dipende dalla copertura del cielo e dall'ora del giorno. Da questo risultato scaturisce che l'illuminamento esterno massimo, tipico delle ore centrali di giornate estive serene, in cui il flusso di radiazione solare sull'orizzontale è dell'ordine di 1 kW/m², può facilmente superare i 100.000 lx.

Mentre nell'illuminazione artificiale degli interni il calcolo fa riferimento al valore assoluto dell'illuminamento, nell'illuminazione naturale, intrinsecamente variabile nel tempo, si ragiona in termini relativi attraverso il concetto di Fattore di Luce Diurna (FLD), definito come:

$$FLD = \frac{E}{E_0}$$

dove E è l'illuminamento in un punto di un piano orizzontale (tipicamente situato a 70 cm dal pavimento) ed E_0 è l'illuminamento che si ha nel medesimo istante su un piano orizzontale esterno, escludendo però il contributo della radiazione diretta.

Si definisce Fattore Medio di Luce Diurna FLD_m la media dei valori puntuali del fattore di luce diurna. In prima approssimazione si può utilizzare la seguente formula di calcolo semplificata:

$$FLD_m = \frac{F_s t S_f}{(1 - r_m) S_p}$$



dove:

F_s = fattore di schermatura che tiene conto degli ostacoli esterni alla superficie vetrata

t = coefficiente di trasmissione luminosa del vetro

S_f = area della superficie vetrata

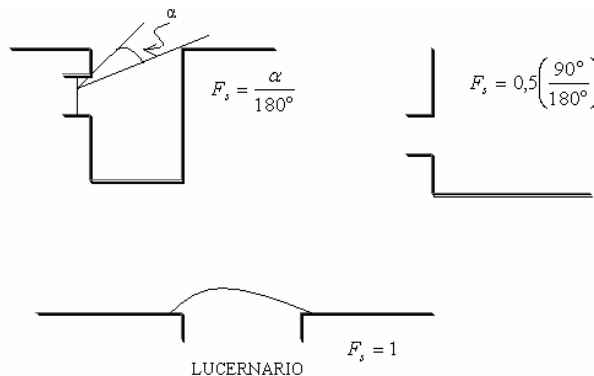
r_m = valor medio dei coefficienti di riflessione delle superfici che delimitano l'ambiente

S_p = area delle superfici che delimitano l'ambiente

Il fattore di schermatura F_s può essere valutato con la formula:

$$F_s = \frac{\alpha}{180^\circ}$$

dove α rappresenta l'angolo di vista della volta celeste individuato dal baricentro della superficie vetrata: in assenza di ostacoli esterni, assume quindi i valori $F_s = 0,5$ nel caso di finestra verticale a filo facciata e $F_s = 1$ nel caso in un lucernario aperto su una copertura piana.



Il parametro FLD_m viene spesso richiamato dalle normative sull'illuminazione naturale degli edifici, che richiedono per edifici residenziali un valore non inferiore al 2%. Assumendo quale condizione esterna cautelativa (cielo coperto) quella di un illuminamento orizzontale di 28.000 lx, risulta quindi un illuminamento medio interno non inferiore a 560 lx, valore quindi più che accettabile.

E' facile verificare con un esempio (locale 4 m x 5 m x 3 m) che tale condizione è coerente con la prescrizione dei regolamenti igienico-edilizi Comunali che prescrivono il cosiddetto "rapporto aero-illuminante", ovvero un'area minima di serramento apribile pari a 1/8 della superficie di pavimento.

Nell'esempio la superficie di pavimento è 20 m², per cui la superficie vetrata minima è $S_f = 2,5$ m²; assumendo $F_s = 0,5$; $t = 0,8$; $r_m = 0,5$ e poiché $S_p = 20 + 20 + 3 \times 18 = 94$ m², si ha:

$$FLD_m = \frac{0,5 \cdot 0,8 \cdot 2,5}{(1 - 0,5) \cdot 94} = 0,021$$



5.4 Illuminazione artificiale di esterni

Il calcolo degli impianti di illuminazione per esterni è notevolmente semplificato dall'assenza di riflessioni. Pertanto, stabilita la posizione degli apparecchi di illuminazione (di cui si suppone nota l'indicatrice di emissione), si calcola l'illuminamento in un generico punto della superficie ricevente prodotto da un dato apparecchio con la formula, già introdotta nel par. 2. 3, valida per sorgenti puntiformi:

$$E = \frac{I(\alpha) \cos \alpha}{R^2}$$

Se all'illuminamento nel punto contribuiscono più apparecchi, l'illuminamento complessivo si calcola semplicemente sommando i singoli contributi.

Le applicazioni tipiche dell'illuminazione di esterni sono:

- l'illuminazione stradale
- l'illuminazione di impianti sportivi
- l'illuminazione di monumenti

Ciascuna delle applicazioni suddette presenta esigenze e fa riferimento a specifiche normative di settore, fra cui si ricorda in particolare la norma UNI 10439 requisiti illuminotecnici di strade con traffico motorizzato.