

## CAPITOLO 9

# ILLUMINAZIONE NATURALE

### 9.1 Generalità

Un corretto utilizzo della luce diurna rende più gradevoli ambienti agli occupanti e contemporaneamente può contribuire a contenere durante il giorno i consumi di energia elettrica. Ovviamente, nel caso di ambienti profondi e di ridotta altezza si rende spesso necessario un contributo supplementare d'illuminazione artificiale anche nelle ore centrali della giornata. E' evidente che l'impianto supplementare dovrà essere una sottosezione dell'impianto d'illuminazione generale per evitare costose duplicazioni.

La progettazione di sistemi d'illuminazione supplementare presenta problemi non ancora compiutamente studiati: ad esempio, poiché la luminanza del cielo varia continuamente, ne consegue che anche il livello d'illuminazione supplementare dovrebbe variare durante le ore del giorno per assicurare accettabili condizioni d'equilibrio dei vari parametri illuminotecnici (livelli d'illuminamento, contrasti di luminanza).

D'altra parte molti edifici moderni sono progettati, anche quando sarebbe tecnicamente possibile fare altrimenti, senza tener conto, o addirittura in spregio, a queste problematiche, ad esempio privilegiando criteri compositivi che portano a realizzare ambienti profondi con soffitti bassi, che non favoriscono l'illuminazione naturale negli ambienti.

Come già osservato in precedenza, l'atmosfera provoca fenomeni d'assorbimento e di diffusione delle radiazioni solari, in misura variabile con le ore del giorno (percorso più o meno lungo che le radiazioni stesse compiono prima di raggiungere il livello del suolo).

La volta celeste è luminosa proprio in conseguenza della diffusione atmosferica della luce, in particolare:

- se l'aria è secca la diffusione della luce è essenzialmente dovuta alle molecole di  $O_2$  e  $N_2$  e, quindi, come ben noto, predominano le componenti luminose a minore  $\lambda$  (cielo azzurro)
- in presenza di goccioline d'acqua (nuvole) vengono maggiormente diffuse le componenti a maggiore  $\lambda$  per cui la volta celeste assume una colorazione bianco-grigia.

È opportuno osservare che quando si parla d'illuminazione naturale s'intende come sorgente luminosa primaria la **volta celeste** e non certo il sole, alle cui radiazioni dirette si cerca in genere di precludere l'accesso agli ambienti.

Sebbene parlando d'illuminazione naturale venga spontaneo riferirsi al cielo sereno, molte ricerche condotte nel mondo sulla disponibilità di luce naturale hanno preso in considerazione il

cielo nella condizione di uniforme nuvolosità. Ciò per motivi prudenziali nella progettazione e per le agevolazioni di calcolo.

Il primo modello (il più semplice ed approssimato) prevede un cielo coperto (nuvoloso) con **luminanza uniforme**. Ovviamente, in realtà la luminanza di un cielo coperto non è uniforme, per cui la **CIE** ha proposto e normalizzato un modello di cielo coperto a **luminanza non uniforme**, per quei climi nei quali questa condizione atmosferica può essere considerata preminente. Un presupposto interessante di questo modello è che la luminanza del cielo decresce dallo zenit all'orizzonte in modo tale che il primo risulta essere caratterizzato da una luminanza tre volte più elevata del secondo.

Il **modello di cielo sereno CIE** presenta una distribuzione di luminanza che dipende dalla posizione del sole a parte il disco solare vero e proprio. Si può accennare che secondo questo modello le porzioni di cielo sereno più prossime alla posizione del sole risultano caratterizzate da una luminanza fino a 40 volte superiore a quella delle porzioni più sfavorite (opposte).

## 9.2 Fattore di luce diurna

Una difficoltà connessa allo studio dell'illuminazione naturale all'interno degli ambienti è dovuta al fatto che la luminanza della volta celeste varia notevolmente durante l'arco del giorno. In conseguenza più che a valutare l'illuminamento assoluto all'interno di ambienti, spesso si preferisce il criterio relativo, e cioè valutare il rapporto esistente tra l'illuminamento interno ed esterno.

Questo rapporto o **fattore di luce diurna**  $\eta$ , è più precisamente definito come:

$$\eta = E / E_e$$

e, cioè, come rapporto tra l'illuminamento **E** in un punto dell'ambiente e l'illuminamento **E<sub>e</sub>** che, nello stesso istante, assumerebbe una superficie orizzontale posta all'esterno, schermata dall'irraggiamento solare diretto ed esposta alla luce proveniente dall'intera (non ostruita) volta celeste. Il fattore di luce diurna  $\eta$  viene spesso espresso in unità percentuali. Esso può essere facilmente misurato con un luxmetro in ogni punto del piano di lavoro di un ambiente. A questo fine occorre misurare l'illuminamento **E** del punto e contemporaneamente anche l'illuminamento esterno **E<sub>e</sub>**.

A titolo informativo, l'illuminamento naturale in un punto di un ambiente deve ritenersi:

- **insufficiente** se il valore di  $\eta$  risulta  $< 0,3 \%$ ;
- **discreto** se il valore di  $\eta$  è compreso tra  $0,5$  e  $1\%$ ;
- **buono** se il valore di  $\eta$  risulta  $> 1\%$ ;
- **ottimo** se il valore di  $\eta$  risulta  $> 4\%$ .

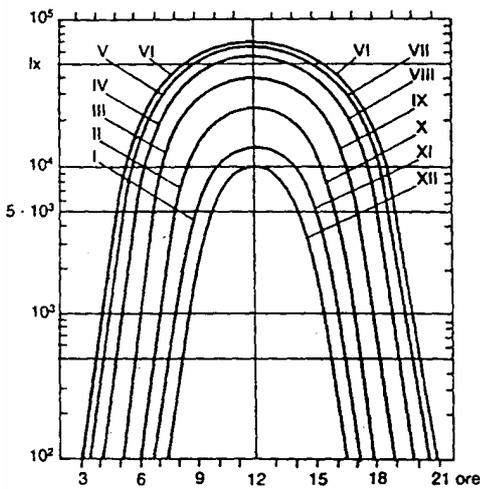
Per valutare accuratamente  $\eta$  nei diversi punti del piano di lavoro di un ambiente, occorre un'analisi laboriosa e complessa. E' opportuno, prima di presentare un semplice procedimento per la valutazione approssimata di  $\eta$ , illustrare brevemente la complessità della problematica.

In generale, l'**illuminamento esterno**, dovuto all'intera volta celeste,  $E_e$  può essere ricondotto ad una situazione già nota (calcolo dell'illuminamento in un punto dovuto ad una sorgente estesa) se si suppone che la volta celeste corrisponda ad un'intera calotta sferica luminosa con luminanza costante ( $L_c$ ) e comportamento lambertiano. Adottando questa semplificazione si

può scrivere:

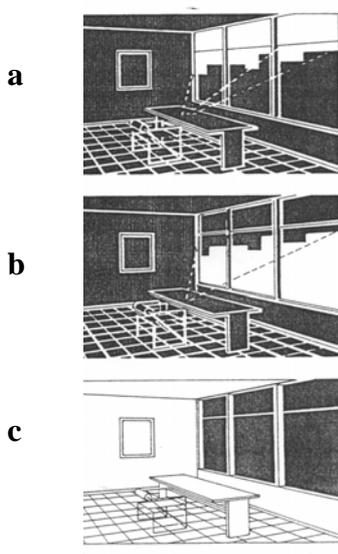
$$E_e = \pi \cdot L_c$$

In figura è riportato, per le nostre latitudini, l'illuminamento medio esterno  $E_e$  nei diversi mesi dell'anno (I = gennaio, II = febbraio, ecc.) durante il ciclo diurno (da cui è immediato ottenere anche  $L_c$ ).



L'**illuminamento E** in un punto dell'ambiente risulta di complessa valutazione principalmente a causa della grande varietà di situazioni che possono presentarsi: esso, infatti, è pari alla somma dei seguenti contributi:

- $E_{dc}$  = contributo direttamente proveniente dalla porzione di cielo vista dal punto stesso attraverso la finestra;
- $E_{re}$  = contributo riflesso esternamente (ad esempio le pareti di un altro edificio, alberi, etc.);
- $E_{ri}$  = contributo riflesso internamente (a causa di riflessioni multiple all'interno dell'ambiente).



Nelle seguenti figure (a, b e c) le superfici luminose responsabili dei tre diversi contributi sono evidenziate in chiaro.

Il **primo contributo**, e cioè il termine  $E_{dc}$ , può essere valutato linea di principio senza difficoltà, in quanto ricade in una situazione già studiata (calcolo dell'illuminamento in un punto dovuto ad una sorgente estesa): Per la porzione di volta celeste vista attraverso la finestra si assume una luminanza pari a  $\tau L_c$  con  $\tau$  fattore di trasmissione del vetro

Il **secondo contributo**, e cioè il termine  $E_{re}$ , può essere ancora valutato senza particolari difficoltà d'ordine concettuale, se si ipotizza che le varie superfici esterne siano caratterizzate da

luminanze  $L_j$ . Le luminanze da assumere sono date da  $L_j = \tau E_j \rho_j / \pi$  essendo tale la luminanza assunta dalla superficie  $j$  (fattore di riflessione  $\rho_j$ ) sottoposta ad illuminamento  $E_j$ . Pertanto, anche per questo contributo, si ricade in una situazione già studiata (calcolo dell'illuminamento in un punto dovuto ad una sorgente estesa di superficie  $S_j$ ).

Il **terzo contributo**, e cioè l'illuminamento  $E_{ri}$ , dovuto a quella parte di luce che giunge nel punto in conseguenza delle riflessioni multiple all'interno dell'ambiente, potrebbe in linea teorica essere valutato come già accennato per l'illuminazione artificiale di un ambiente e, cioè, nel modo seguente.

In una fase iniziale si potrebbero determinare gli illuminamenti direttamente provocati dalle sorgenti primarie (cielo e superfici esterne) in un numero sufficientemente rappresentativo di punti posti sulle superfici delimitanti l'ambiente, per ottenere una prima approssimata distribuzione degli illuminamenti medi. A questo punto si può assegnare alle varie porzioni di superfici una luminanza  $L_i = \rho_i E_i / \pi$  e considerare ciascuna di esse come una sorgente luminosa estesa che fornisce un supplemento di illuminazione sulle varie superfici del locale.

A questo punto si possono correggere i vari illuminamenti medi precedentemente valutati ottenendo un secondo e più approssimato andamento dell'illuminamento sulle varie pareti. Ripetendo questo macchinoso procedimento, un numero sufficiente di volte, si arriva a determinare con l'approssimazione desiderata l'illuminamento  $E_{ri}$  nel punto in esame.

Ovviamente, raramente sono richieste valutazioni così accurate dei livelli di illuminamento; oltre a ciò esse sarebbero spesso illusorie: si pensi, ad esempio, come già osservato, al fatto stesso che il progettista conosce solo in linea del tutto indicativa quali valori assegnare ai fattori di riflessione delle varie superfici.

In generale l'uso di metodi di calcolo più o meno complessi (la letteratura tecnica ne riporta un notevole numero) ha senso solo quando la necessità di ottenere risultati molto dettagliati giustifica la relativa difficoltà di applicazione ai vari casi. In genere molte di queste procedure presuppongono, per essere applicabili, un elevato grado di conoscenza della geometria del sistema, spesso non disponibile.

La determinazione del fattore di luce diurna risulta, quindi, più o meno approssimata secondo le ipotesi scelte nell'impostazione del calcolo. A titolo d'esempio, si riportano alcune figure ove sono qualitativamente rappresentate distribuzioni del fattore di luce diurna lungo la sezione di locali con diversa disposizione delle superfici trasparenti. Si può osservare la notevole disuniformità di tale fattore nel caso di un locale munito di un'unica finestra.

Se gli ambienti non sono destinati a particolari impegni visivi, può risultare sufficiente determinare il fattore medio di luce diurna, anche se le finestre sono disposte su un solo lato.

Il più semplice (e approssimato) metodo esprime l'illuminamento medio interno all'ambiente  $E_m$  in funzione dell'illuminamento  $E_f$  sulla finestra del locale.

Ricordando la relazione precedentemente ottenuta che lega il flusso luminoso immesso in un ambiente  $\phi_1$  col l'illuminamento medio  $E_m$  in ogni punto dell'ambiente (ipotesi di flusso luminoso perfettamente diffuso nell'ambiente), si può scrivere:

$$\phi_1 / (1 - \rho_m) = E_m \sum A_n$$

Nel nostro caso indicando con  $A$  la superficie della finestra e con  $\tau$  il relativo fattore di trasmissione può porsi:

$$\phi_1 = A \cdot E_{fr} \cdot \tau$$

L'illuminamento medio  $E_m$  risulta allora esprimibile da:

$$E_m = A \cdot E_{fr} \cdot \tau / (1 - \rho_m) \sum A_n$$

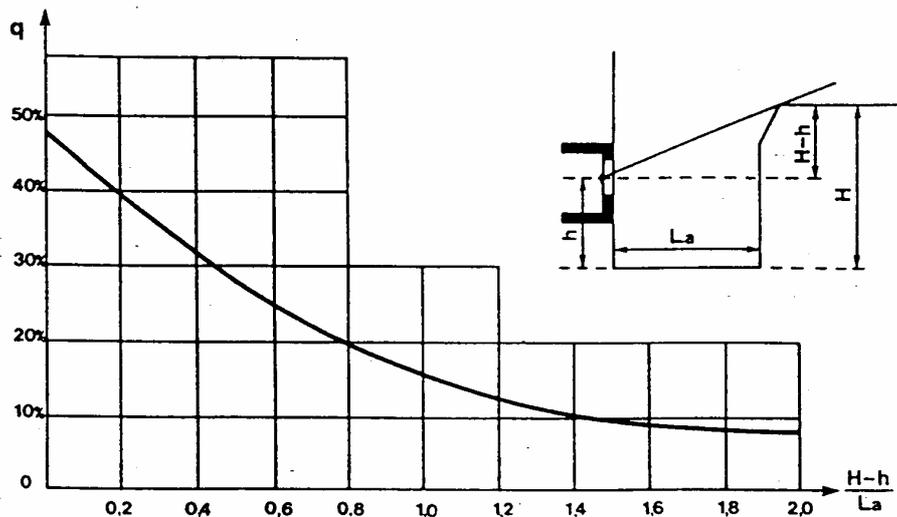
Per semplicità, indicando ora l'area totale delle superfici interne con  $S$  (ponendo cioè  $S = \sum A_n$ ) e ricordando la definizione di fattore medio di luce diurna  $\eta_m = E_m / E_e$ , si può scrivere:

$$\eta_m = E_m / E_e = A \cdot E_f \cdot \tau / E_e \cdot (1 - \rho_m) \cdot S = A \cdot \tau \cdot q / (1 - \rho_m) \cdot S$$

Il rapporto  $q = E_f / E_e$ , tra l'illuminamento  $E_f$  dovuto al flusso luminoso incidente sulla finestra e quello esterno  $E_e$  su un piano orizzontale liberamente esposto al cielo, è detto **fattore di finestra** e dipende dalle condizioni di illuminazione della finestra. Il fattore  $q$  è ovviamente uguale all'unità per una finestra orizzontale con vista libera della volta celeste (luminanza uniforme). Nel caso di una finestra verticale con ostacoli esterni (edifici, alberi, ecc.) ovviamente  $q < 0.5$ . In questi casi, una sua determinazione accurata risulta spesso assai laboriosa, dovendo tener conto della luce riflessa sulla finestra stessa dagli ostacoli esterni (piano stradale, edifici prospicienti, etc.). Ovviamente, se vi sono un numero  $i$  di finestre si può porre:

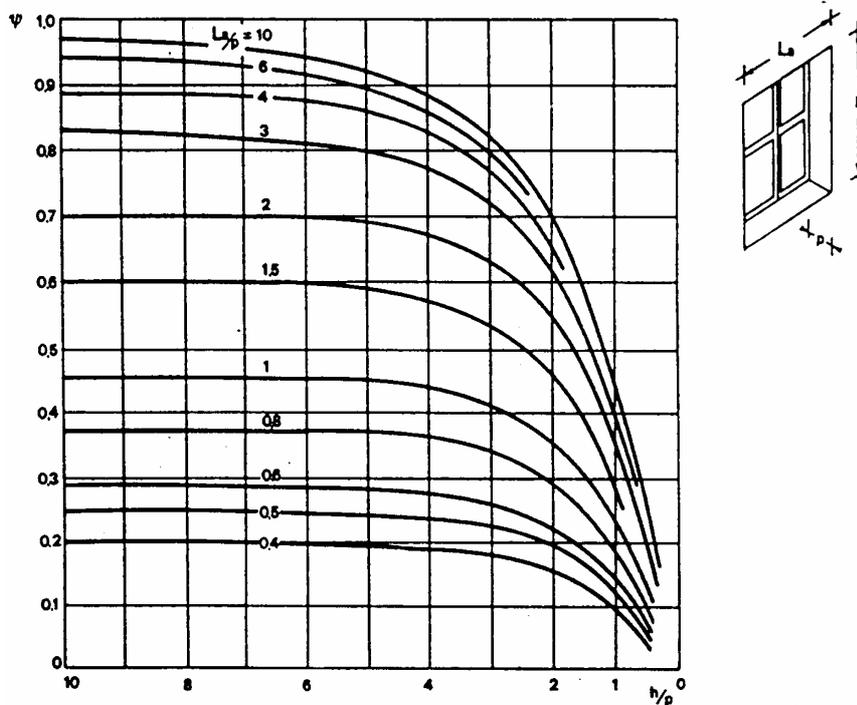
$$\eta_m = \sum A_i \cdot \tau_i \cdot q_i / (1 - \rho_m) \cdot S$$

In letteratura sono riportati numerosi metodi rapidi e ovviamente più o meno approssimati per valutare il fattore finestra  $q$ . Per esempio, per una finestra verticale affacciata su una strada con fabbricati contrapposti, il fattore finestra  $q$  può valutarsi indicativamente mediante il diagramma riportato in figura.



dove:  $q$  = fattore finestra;  
 $H$  = altezza del fabbricato contrapposto;  
 $h$  = altezza della finestra dal piano stradale;  
 $L_a$  = larghezza della strada.

Per tener conto del posizionamento della superficie vetrata rispetto al filo della facciata, si può moltiplicare il *fattore finestra*  $q$  per un **fattore di correzione**  $\psi$ , *funzione della geometria della vetrata*, come riportato nel successivo diagramma.



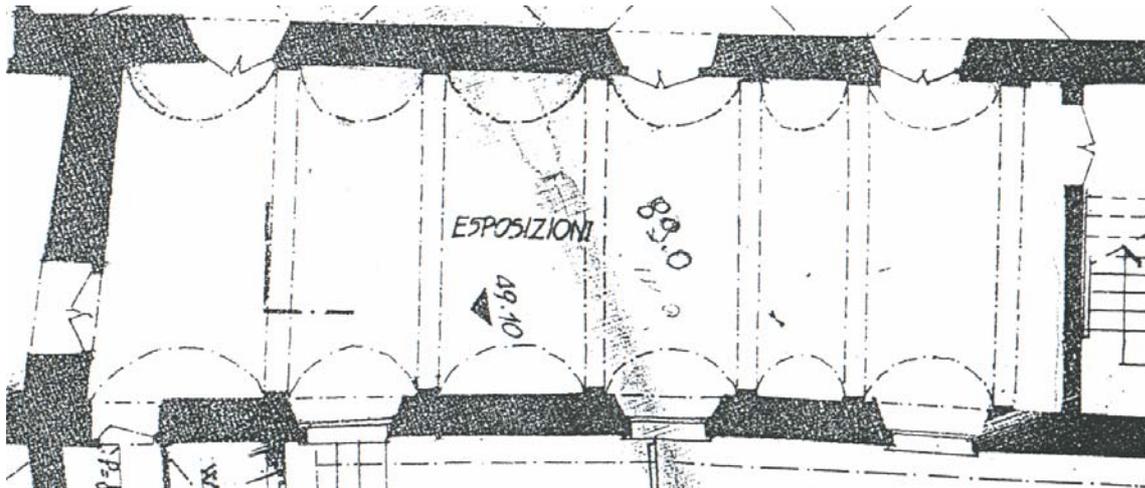
Ad esempio, il **D.M. 5/7/75** per l'edilizia residenziale dispone che tutti i locali degli alloggi, eccettuati quelli destinati a servizi igienici, disimpegni, corridoi, vani scala, ripostigli, devono fruire d'illuminazione naturale diretta adeguata alla destinazione d'uso. Per ciascun locale d'abitazione l'ampiezza della finestra deve essere proporzionata in modo da assicurare un valore del fattore di luce diurna medio non inferiore al 2% e, in ogni caso, la superficie finestrata apribile non dovrà essere inferiore a 1/8 della superficie del pavimento.

Il fattore  $\eta_m$  dipende sia dalla destinazione generale d'uso dell'edificio, sia dalla funzione propria dei singoli spazi all'interno di esso. In tabella sono riassunti i valori di  $\eta_m$  indicati nella normativa.

	$\eta_m=0.01$	$\eta_m=0.02$	$\eta_m=0.03$
<b>Edilizia Residenziale</b>		<b>tutti i locali di abitazione</b>	
<b>Edilizia Scolastica</b>	<b>uffici, spazi di distribuzione, scale, servizi igienici</b>	<b>palestre, refettori</b>	<b>ambienti ad uso didattico, laboratori</b>
<b>Edilizia Ospedaliera</b>	<b>come edilizia scolastica</b>		<b>ambienti di degenza, diagnostica, laboratori</b>

## ESERCIZI ED ESEMPI

1) Misura fattore medio di luce diurna e confronto con il risultato calcolato nel caso dell'aula esposizioni tesi della Facoltà. Nella seguente figura si riporta la pianta della sala che risulta trapezoidale (lato maggiore 16.2 [m], lato minore 15.4 [m], altezza del trapezio 5.6 [m] con quindi una totale superficie pari a circa  $S_t = 88$  [m<sup>2</sup>]).



### Misure eseguite

All'interno della sala si sono eseguite misure di illuminamento con luxmetro Testo 545 sul piano di lavoro ( piano a 80 [cm ]dal pavimento). Le misure (36) sono state effettuate al centro di 36 aree rettangolari eguali  $S_i = 1.44 \times 1.7$  [m<sup>2</sup>] in cui si è suddivisa la superficie in pianta. La tabella seguente riporta valori  $E_i$  in Lux ottenuti alle ore 15 di un giorno di Gennaio.

Tabella illuminamenti rilevati nella sala (Lux)

230	350	75	330	370	66	140	280	90
188	200	140	220	210	115	135	200	125
140	150	155	200	170	120	120	140	120
90	140	110	115	130	85	100	108	100

Il valore medio dell'illuminamento risulta pari a :

$$E_m = \frac{\sum S_i \cdot E_i}{\sum S_i} = \frac{S_0 \cdot \sum E_i}{36 \cdot S_0} = 144 \text{ lux}$$

Contemporaneamente una seconda squadra di studenti, munita di un secondo luxmetro, ha proceduto a misurare contemporaneamente l'illuminamento esterno su un terrazzo orizzontale della

Facoltà curando opportunamente di schermare il luxmetro dall'*irraggiamento solare diretto*. Il valore rilevato alle ore 15 è risultato pari a  $E_e = 11750$  lux.

Il **fattore medio di luce diurna** risulta, quindi:

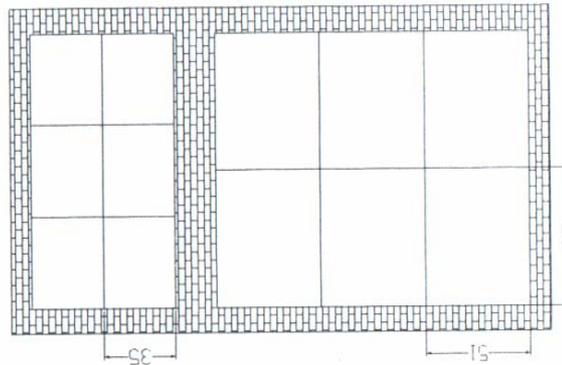
$$\eta_m = \frac{E_m}{E_e} = 0.012$$

Il risultato ottenuto evidenzia come l'illuminazione naturale della sala possa essere classificata come buona.

### Calcolo del fattore medio $\eta$ e confronto colla valore misurato

Si sono rilevate le seguenti informazioni relative alle caratteristiche della sala e dei serramenti:

- n° 3 finestre munite di vetri doppi a circa 20 [cm] dal filo esterno (1 finestra ha una totale superficie **vetrata pari a  $A_f = 2.46$  [m<sup>2</sup>]**) (vedi figura)
- altezza locale  $h_l = 4$  [m]
- due finestre sono libere mentre la terza è parzialmente ostruita



I fattori di riflessione da assegnare alla varie superfici della sala derivano dalla seguente tabella

Materiale e della natura della superficie	$\rho$
Intonaco comune bianco (latte di calce o simili) recente o carta	0.8
Intonaco comune o carta di colore molto chiaro (avorio, giallo, grigio)	0.7
Intonaco comune o carta di colore chiaro (grigio perla, avorio, giallo limone, rosa chiaro)	0.6-0.5
Intonaco comune o carta di colore medio (verde prato, azzurro chiaro, marrone chiaro)	0.5-0.3
Intonaco comune o carta di colore scuro (verde oliva, rosso)	0.3-0.1
Pavimenti di tinta chiara	0.6-0.4
Pavimenti di tinta scura	0.2
Alluminio	0.8-0.9
Vernice bianca	0.5
Smalto bianco	0.6
Plastica chiara	0.55

:Risulta quindi :

- superficie totale pareti laterali  $S_l=171 \text{ m}^2$ ;  $\rho_l = 0.7$
- superficie soffitto (supposto piano)  $S_s= 88 \text{ m}^2$  ;  $\rho_s = 0.7$
- superficie pavimento  $S_p= 88 \text{ m}^2$ ;  $\rho_p = 0.4$

➤ **Calcolo di  $\rho_m$**

$$\rho_m = \frac{171 * 0.7 + 88 * 0.7 + 88 * 0.4}{347} = 0.62$$

➤ **Calcolo di  $\tau$  per vetri doppi**

$$\tau = \tau_1 \cdot \tau_2 = 0.8 * 0.8 = 0.64$$

➤ **Calcolo di  $q$**

Dal grafico poiché 2 delle 3 finestre risultano quasi completamente libere risulta

$$\frac{H_e - h_e}{L_{ae}} = 0 \text{ per cui } q = 0.47 \text{ mentre per la terza, la parziale ostruzione della volta celeste}$$

comporta circa  $q = 0.40$

➤ **Calcolo di  $\psi$**

Risultando per ciascuna finestra  $L_a = 1.2 \text{ m}$ ;  $p = 0.2$ ;  $h = 2.2 \text{ m}$  si ottiene un rapporto  $L_a / p = 6$  ed un rapporto  $h/p = 11$  per cui il grafico fornisce  $\psi = 0.95$

Applicando la relazione:

$$\eta_m = \frac{\sum A_i \cdot \tau_i \cdot q_i}{(1 - \rho_m) \cdot S} = \frac{2A_f \cdot \tau \cdot 0.47 \cdot 0.95 + A_f \cdot \tau \cdot 0.40 \cdot 0.95}{(1 - 0.62) \cdot S} = 0.015$$

Come si può osservare il valore del fattore medio di luce diurna calcolato risulta in buon accordo col valore precedentemente misurato.