



L.A.M.S.A.
Laboratorio di Analisi e Modellazione
dei Sistemi Ambientali

Stage 3: Misura della luce naturale

1. LE GRANDEZZE CARATTERIZZANTI L'AMBIENTE LUMINOSO
 - 1.1 Illuminamento
 - 1.2 Fattore di luce diurna
2. IL LUXMETRO E LA MISURA DELL'ILLUMINAMENTO
 - 2.1 Caratteristiche del luxmetro Delta Ohm HD8366
 - 2.2 Metodo di misura dell'illuminamento
3. LA MISURA DEL FATTORE DI LUCE DIURNA
4. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. LE GRANDEZZE CARATTERIZZANTI L'AMBIENTE LUMINOSO

L'illuminazione naturale deve essere utilizzata nella maggiore misura possibile al fine di favorire il benessere psicofisico degli occupanti, permettendo possibilmente anche lo svolgimento del compito visivo in condizioni di sicurezza, e ridurre il consumo energetico.

Alle superfici vetrate è attribuita la duplice funzione di consentire il contatto visivo con l'ambiente esterno e di realizzare una soddisfacente distribuzione dell'illuminazione nell'ambiente interno.

Le misure di *illuminamento* e di *fattore di luce diurna* consentono di caratterizzare un ambiente dal punto di vista luminoso. La prima grandezza si riferisce a sorgenti di luce sia naturale che artificiale, mentre l'altra si riferisce esclusivamente all'illuminamento naturale in un punto all'interno dell'ambiente considerato.

Il fine della seguente esperienza, quindi, è di misurare mediante un apposito strumento, il *luxmetro*, le grandezze sopra citate che rappresentano l'aspetto quantitativo del fenomeno luminoso.

E' bene, pertanto, definire tali grandezze prima di passare alla spiegazione dei metodi di misura e degli strumenti impiegati, tralasciando un'eventuale trattazione di tutte le altre grandezze di interesse nel campo fotometrico.

1.1 Illuminamento

Rappresenta la quantità di energia luminosa che investe una superficie nell'unità di tempo, ovvero il flusso luminoso Φ_l , emesso da una sorgente di luce naturale o artificiale, incidente su una superficie A. Poiché il flusso luminoso si misura in lumen [lm], la stima della quantità di lumen presente su un metro quadrato di superficie ci permette di valutare l'illuminamento E, la cui unità di misura è il lux [lx], ed è dato dal rapporto:

$$E = \frac{\Phi_l}{A} = \frac{[lm]}{[m^2]} = [lx]$$

I livelli di illuminamento entro i quali è possibile la visione variano da qualche centesimo di lux (notte) a diverse decine di migliaia di lux (pieno sole), in virtù della capacità di adattamento dell'occhio umano. In generale si può affermare che se a bassi livelli di illuminamento (minori di 100 lux) una modifica del livello produce un notevole effetto sulla prestazione visiva, lo stesso non accade ad alti livelli di illuminamento (maggiori di 1000 lx). Oltretutto grande importanza assumono le caratteristiche del compito visivo, così come l'età e la capacità visiva dell'osservatore. Per quanto riguarda il problema del gradimento dell'ambiente luminoso da parte dell'occupante, nonostante la complessità nel valutare la giusta quantità di luce, appare comunque certo che ambienti dove si svolgono attività lavorative non risultano gradevoli se caratterizzati da livelli di illuminamento inferiori a 200 lx o superiori a 2000 lx.

1.2 Fattore di luce diurna

È un parametro introdotto per valutare l'illuminazione naturale all'interno di un ambiente confinato.

Tuttavia, poiché le sorgenti di luce naturale sono il sole ed il cielo, nella valutazione delle condizioni di illuminazione si fa riferimento al caso più sfavorevole che si verifica in assenza di radiazione solare diretta.

Pur escludendo la radiazione diretta, i valori di illuminamento all'interno di un locale mostrano una variabilità notevole in funzione delle condizioni meteorologiche e del periodo dell'anno considerato.

Proprio per evitare che l'aleatorietà delle sorgenti naturali renda poco significativo il calcolo dell'illuminamento interno se svolto in termini assoluti, si è preso in considerazione il fatto che, fissato un punto interno ad un ambiente di prefissate caratteristiche, vi è un rapporto costante tra il suo illuminamento e l'illuminamento esterno. Tutto ciò porta a valutare le condizioni relative di illuminazione diurna degli ambienti, anziché quelle assolute.

Ciò può essere fatto mediante l'introduzione di opportuni fattori adimensionali, ed è proprio questo il caso del fattore di luce diurna. Esso, infatti, è un parametro adimensionale definito dal rapporto tra l'illuminamento E ricevuto dal punto in esame

e l'illuminamento E_0 ricevuto, nelle identiche condizioni di tempo e di luogo, da un punto su una superficie orizzontale illuminata dall'intera volta celeste senza irraggiamento diretto del sole:

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

Il valore dell'illuminamento E del punto all'interno dell'ambiente risulta costituito da tre componenti: l'apporto dovuto alla porzione di cielo vista dal punto attraverso la finestra, l'apporto dovuto alle riflessioni delle superfici di eventuali ostruzioni urbane esterne viste dal punto attraverso la finestra, l'apporto dovuto alle riflessioni multiple che si verificano all'interno dell'ambiente. Il fattore complessivo di luce diurna può quindi essere espresso come rapporto tra la somma dei diversi apporti all'interno dell'ambiente e l'illuminamento esterno E_0 .

Per valutare le condizioni di illuminamento naturale all'interno di un ambiente si è soliti impiegare il *fattore medio di luce diurna*, η_m , definito come il rapporto tra la media dei valori di illuminamento all'interno dell'ambiente, E_m , e la media dei valori di illuminamento esterno rilevati durante le misurazioni, E_{0m} , sempre in assenza di irraggiamento solare diretto:

$$\eta_m = \frac{E_m}{E_{0m}}$$

Questo fattore, comparso inizialmente sulla Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici n.3151 del 22/5/1967 e successivamente confermato dal D.L. che il Ministero della Sanità ha emanato nel 5/7/1975 riguardante i requisiti igienico-sanitari dei locali di abitazione, secondo la stessa Circolare può essere definito con la seguente formula di calcolo:

$$\eta_m = \frac{A_f \cdot t}{(1 - r_m) \cdot S_{tot}} \cdot \varepsilon \cdot \psi$$

dove:

- A_f è l'area della superficie della finestra, escluso il telaio [m²];
- t è il coefficiente di trasmissione luminosa del vetro [-];
- r_m è il coefficiente medio di riflessione luminosa delle superfici interne dell'ambiente [-];
- S_{tot} è l'area totale delle superfici che delimitano l'ambiente [m²];
- ε è il *fattore finestra*, rappresentativo della porzione di volta celeste vista dal baricentro della finestra [-];
- ψ è il coefficiente di riduzione del fattore finestra, in funzione dell'arretramento del piano della finestra rispetto al filo esterno della facciata [-];

Il fattore finestra ε assume i seguenti valori in funzione della posizione della superficie vetrata e della presenza di ostruzioni esterne:

- $\varepsilon = 100\%$ per superfici vetrate orizzontali prive di ostruzioni
- $\varepsilon = 50\%$ per superfici vetrate verticali prive di ostruzioni
- $\varepsilon < 50\%$ per superfici vetrate verticali in presenza di ostruzioni

Sia il fattore ε che ψ possono essere dedotti da appositi grafici riportati dai decreti prima citati ed in letteratura [4, 5, 6].

Il fattore η_m imposto dal decreto dipende sia dalla destinazione d'uso dell'edificio, sia dalla funzione propria ai singoli spazi all'interno di esso. Il D.L. emanato il 5/7/1975 prescrive che per ciascun locale di abitazione l'ampiezza della finestra deve essere proporzionata in modo da assicurare un valore del fattore medio di luce diurna non inferiore al 2%.

Una recente proposta di norma UNI, U290040 (1998) "Illuminotecnica. Locali scolastici – Criteri generali per l'illuminazione artificiale e naturale", fa riferimento al concetto di fattore medio di luce diurna riportando le seguenti definizioni ad esso relative:

- **Fattore medio di luce diurna (η_m):** rapporto espresso in percentuale, per l'illuminamento medio dell'ambiente E_m e l'illuminamento che si ha nelle stesse

condizioni di tempo e spazio, su una superficie orizzontale esterna che riceve luce dall'intera volta celeste, senza irraggiamento solare diretto E_0 .

- **Fattore puntuale massimo di luce diurna (η_{max}):** rapporto tra l'illuminamento massimo in un punto interno all'ambiente E_{max} e l'illuminamento che si ha nelle stesse condizioni di tempo e spazio, su una superficie orizzontale esterna che riceve luce dall'intera volta celeste, senza irraggiamento solare diretto E_0 .
- **Fattore puntuale minimo di luce diurna (η_{min}):** rapporto tra l'illuminamento minimo in un punto interno all'ambiente E_{min} e l'illuminamento che si ha nelle stesse condizioni di tempo e spazio, su una superficie orizzontale esterna che riceve luce dall'intera volta celeste, senza irraggiamento solare diretto E_0 .

La stessa bozza di documento sottolinea, anche per l'illuminazione naturale, la necessità di valutare l'uniformità di illuminamento precisando che *"al fine di garantire un'adeguata uniformità dell'illuminazione naturale, all'interno degli ambienti, devono essere garantiti i seguenti rapporti relativi al fattore di luce diurna puntuale"*:

$$U = \frac{\eta_{min}}{\eta_{max}} > 0,16$$

Qui di seguito si riportano i valori del fattore medio di luce diurna raccomandati dai diversi decreti ministeriali per quanto concerne l'edilizia residenziale, scolastica ed ospedaliera:

	$\eta_m \geq 1 \%$	$\eta_m \geq 2 \%$	$\eta_m \geq 3 \%$
Edilizia residenziale [4]	-	Tutti i locali di abitazione	-
Edilizia scolastica [5]	Uffici, spazi di distribuzione, scale, servizi igienici	Palestre e refettori	Ambienti ad uso didattico, laboratori
Edilizia ospedaliera [6]	Uffici, spazi di distribuzione, scale, servizi igienici	Palestre e refettori	Ambienti di degenza, diagnostica, laboratori

2. IL LUXMETRO E LA MISURA DELL'ILLUMINAMENTO

La misura dell'illuminamento, dovuto sia a luce naturale che luce artificiale, può essere effettuata mediante un luxmetro.

La parte sensibile di un luxmetro, che riceve il flusso luminoso, è la superficie di un dispositivo fotorilevatore quale una cellula fotoelettrica. Lo strumento è tarato in modo da indicare sulla propria scala valori in *lux*. Il suo funzionamento è basato sulla considerazione della curva di visibilità relativa dell'occhio umano e della sensibilità del dispositivo fotorilevatore impiegato.

Nel nostro caso si è utilizzato un luxmetro Delta Ohm HD8366, strumento portatile con fotocellula collegata mediante connettore flessibile, di utilizzo semplice e pratico in virtù delle sue dimensioni e peso ridotti.

Lo strumento è in grado di rilevare ridotti valori di illuminamento con discreta stabilità.

2.1 Caratteristiche del luxmetro HD8366 Delta Ohm

Il luxmetro HD8366 Delta Ohm è costituito dal corpo misuratore-analizzatore-visualizzatore e dall'elemento sensibile, collegati mediante un cavo flessibile.



Fig. 1 - Luxmetro HD8366 Delta Ohm

L'elemento sensibile è realizzato mediante un sensore al silicio al quale è stato anteposto un filtro ottico per la correzione della risposta spettrale (il filtro ottico non è altro che un vetrino piano su cui sono stati depositi dei sottilissimi strati di ossidi

metallici i quali determinano un comportamento globale del filtro variabile al variare della lunghezza d'onda incidente).

Il corpo misuratore contiene l'elettronica di elaborazione del segnale ed un indicatore digitale a cristalli liquidi; i pochi comandi (accensione e spegnimento, memorizzazione della lettura) sono impartiti tramite una tastiera a membrana.

Lo strumento è dotato di un circuito di auto-azzeramento che assicura un'ottima ripetitività delle misure anche a bassissimo livello di illuminamento.

Per l'utilizzo dello strumento è sufficiente orientare il sensore verso la sorgente luminosa. Lo strumento cambierà scala automaticamente ed indicherà sul display il valore misurato in lux o klux. (kilo-lux). Per bloccare la misura è sufficiente premere il tasto apposito (*hold*).

Il range di valori misurabili è compreso tra 0 e 199900 lux. Il luxmetro Delta Ohm utilizzato è in grado di offrire una risposta spettrale con uno scarto inferiore al 4%. La precisione è limitata da varie cause di errore quali: la non linearità del sensore, la deviazione della legge del coseno per luce incidente non ortogonalmente al sensore, risposta spettrale non perfettamente identica a quella dell'occhio umano.

Con taratura mediante lampada campione al tungsteno "A" (temperatura di colore pari a $2850 \text{ K} \pm 10 \text{ K}$, secondo DIN 5033) la precisione è migliore del $\pm 6 \%$ della lettura $\pm 1\%$ del fondo scala.

2.2 Metodo di misura dell'illuminamento

Dopo aver stabilito il piano del quale si vuole conoscere l'illuminamento (piano orizzontale a livello del piano di lavoro o più generalmente sul pavimento, piano verticale su pareti o su arredi), si può effettuare la misura. Si tratta di posizionare lo strumento con la fotocellula rivolta verso la sorgente luminosa se questa agisce ortogonalmente al piano di misura, oppure, nel caso più generale, con la fotocellula parallela alla superficie di interesse.

Analogamente si procede per le superfici verticali, avendo l'accortezza di posizionare lo strumento parallelamente al piano considerato ed in ogni caso di disporsi in modo tale per cui lo strumento non subisca l'influenza del corpo dell'operatore (ombra portata) e non riceva la luce con un angolo di incidenza eccessivo (luce radente).

Dopo aver effettuato la lettura in un numero sufficiente di punti (maggiore è il numero di letture, più precise risultano le informazioni) riferendo la somma dei singoli valori al numero totale dei punti di misura, si ottiene il valore dell'illuminamento medio E_m .

3. LA MISURA DEL FATTORE DI LUCE DIURNA

La verifica in opera del fattore di luce diurna in un punto, η , è un'operazione semplice ma che richiede particolare attenzione per la continua variabilità delle condizioni meteorologiche. Condizione essenziale per eseguirne una misura è infatti la presenza di cielo uniformemente coperto, poiché in generale i limiti indicati dalla normativa in materia fanno sempre riferimento a tale condizione.

L'operazione di rilievo implica possibilmente l'impiego di due luxmetri, al fine di misurare l'illuminamento esterno, E_0 , contemporaneamente con quello interno, E . In caso contrario, è necessario eseguire le misurazioni alternativamente con frequenza tanto maggiore quanto più mutevoli sono le condizioni di illuminazione esterna.

Dalla definizione di fattore di luce diurna riportata a pag. 4, si deduce che le misurazioni dell'illuminamento esterno E_0 devono essere effettuate su un piano orizzontale posto in prossimità dell'ambiente in esame, in grado di vedere l'intera volta celeste e senza ricevere l'apporto diretto della radiazione solare. In altri termini, la fotocellula del luxmetro deve poter "vedere" l'intero emisfero celeste e, nell'impossibilità di garantire tale condizione, deve essere posizionata in una zona scarsamente ostruita da edifici circostanti. È da evitare, dunque, di rilevare il valore di illuminamento esterno ponendosi in cavedi, cortili o balconi dell'edificio.

Per quanto riguarda l'illuminamento interno, esso deve essere misurato con le finestre chiuse ma non schermate da tende o altri sistemi di oscuramento, ed ovviamente senza alcun contributo dovuto alla luce artificiale. Nell'individuare i punti di misura nell'ambiente considerato, si consiglia di riferirsi ad un'altezza dal pavimento pari all'altezza dei piani di lavoro (generalmente pari a 85 cm), mantenendo una distanza minima di 1+1,5 m dalle finestre e di 50+60 cm dalle pareti.

Come si è detto in precedenza, se non ci si riferisce ad un punto ma all'illuminamento medio all'interno dell'ambiente, E_m , valutato in più punti e rapportato all'illuminamento medio rilevato contemporaneamente su una superficie esterna, E_{om} , si può determinare il fattore medio di luce diurna η_m (pag. 4).

Le condizioni di base e la strumentazione necessaria per la misurazione sono le stesse della verifica in opera del fattore puntuale di luce diurna. E' necessario individuare una serie di punti distribuiti uniformemente all'interno dell'ambiente, applicando le distanze minime da finestre e pareti prima citate.

Se le finestre occupano tutta l'estensione della parete di facciata, è sufficiente misurare l'illuminamento nella sezione mediana dell'ambiente e ricavarne il valore medio, altrimenti si rendono necessarie più sezioni di misura.

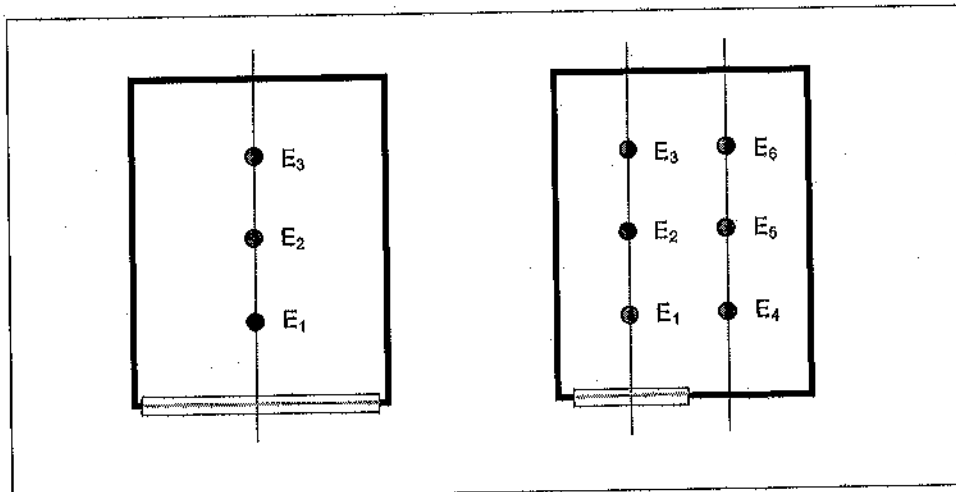


Fig. 2 - Punti di misura dell'illuminamento interno per la determinazione del fattore medio di luce diurna nel caso di superficie vetrata in posizione simmetrica ed asimmetrica.

Di seguito si riporta un esempio relativo alla misura di η e η_m in un ambiente di dimensioni pari a $8\text{ m} \times 4.20\text{ m}$. L'ambiente presenta sul lato più corto una superficie vetrata in posizione simmetrica. Sul pavimento sono stati determinati 4 punti lungo l'asse longitudinale in corrispondenza dei quali effettuare la misura dell'illuminamento mantenendo costantemente lo strumento ad una altezza pari a 85 cm da terra (altezza del piano di lavoro), come indicato in fig. 3.

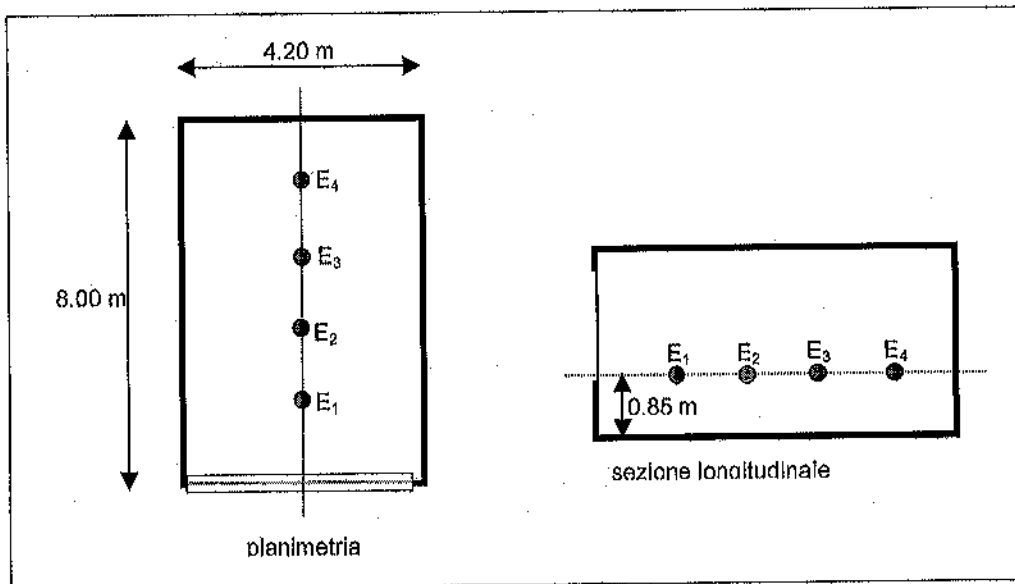


Fig. 3 – Disposizione dei punti di rilievo.

Dopo avere misurato un solo valore di E_0 , poiché in condizioni di cielo uniformemente coperto, si è subito misurato l'illuminamento nei 4 punti all'interno dell'ambiente.

Conoscendo E_0 ed E_1, E_2, E_3, E_4 (l'illuminamento nei 4 punti), si è potuto calcolare il fattore puntuale di luce diurna η ; eseguendo la media aritmetica di questi, si è determinato il fattore medio di luce diurna η_m .

Di seguito si riportano i risultati ottenuti dalla misurazione effettuata.

$E_0 = 13400 \text{ lx}$			
$E_1 = 1610 \text{ lx}$	→	$\eta_1 = 12\%$	
$E_2 = 409 \text{ lx}$	→	$\eta_1 = 3\%$	
$E_3 = 202 \text{ lx}$	→	$\eta_1 = 1\%$	
$E_4 = 84 \text{ lx}$	→	$\eta_1 = 0.6\%$	
			$\eta_m = 4,15\%$

4. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] C. Aghemo, C. Azzolino, *"Illuminazione naturale: metodi ed esempi di calcolo"*, Ceid, Torino, 1995
- [2] M. C. Torricelli, M. Sala, S. Secchi, *"Daylight. La luce del giorno. Tecnologie e strumenti per la progettazione"*, Alinea Editrice, 1995
- [3] A.A.V.V., *"Daylighting in architecture. A european reference book"*, James & James, London, 1993
- [4] Decreto Ministeriale della Sanità 5/7/75
- [5] Decreto Ministeriale 18/12/75
- [6] Circolare Ministeriale Lavori Pubblici 22/11/74 n. 13011