



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Linee guida per l'utilizzazione della luce naturale

F. Gugliermetti, F. Bisegna, L. Monti



Report RdS/2010/

LINEE GUIDA PER L'UTILIZZAZIONE DELLA LUCE

F. Gugliermetti, F. Bisegna, L. Monti

Settembre 2010

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Usi Finali

Tema: "Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto, in particolare nella stagione estiva e per uso terziario e abitativo e loro razionalizzazione. Interazione condizionamento e illuminazione".

Responsabile Tema: Gaetano Fasano, ENEA

CONTENUTI

Cap. 1:

Luce naturale: stato dell'arte su sistemi, metodi, tecniche di progettazione

pag. 5

Cap. 2:

Analisi numerica

pag. 25

Cap.3:

Analisi sperimentale

pag. 38

Cap. 4:

Risultati ed ottimizzazione

pag. 75

Cap. 5:

**Linee guida per la progettazione
con la luce naturale**

pag. 116

Bibliografia

pag. 135

Introduzione

Questo lavoro si inquadra nelle tematiche della modellizzazione numerico-sperimentale degli ambienti confinati ed ha lo scopo di analizzare l'efficacia di una nuova parametrizzazione da applicare ai metodi avanzati di calcolo illuminotecnico ai fini dell'analisi energetica degli edifici necessaria per la progettazione di sistemi HVAC.

Gli obiettivi sono:

- analisi dei principali metodi di calcolo illuminotecnico e scelta di quello più opportuno per gli scopi prefissati;
- progettazione e realizzazione di un modello in scala al fine di poter effettuare le misure di illuminamento necessarie all'analisi;
- realizzazione delle misure, mediante l'uso del modello costruito in laboratorio, riferite a condizioni reali;
- modellizzazione al calcolatore dell'ambiente reale cui fa riferimento il modello in scala e calcolo dei valori d'illuminamento teorici, nelle condizioni in cui sono state realizzate le sessioni di misura;
- confronto tra i valori di illuminamento ottenuti dalla modellizzazione al calcolatore e quelli relativi alle sessioni di misura effettuate;
- validazione del modello in scala ed individuazione delle cause dell' eventuale scarto esistente rispetto ai valori del modello teorico;
- simulazione teorica del comportamento illuminotecnico di diversi tipi di ambiente, effettuata mediante l'utilizzo di dati di input che rendono la rappresentazione di ambienti tipo generale;
- ricerca di nuovi parametri utili ad ottimizzare le fasi di progetto e verifica delle superfici vetrate di ambienti confinati in funzione delle dimensioni in condizioni di illuminamento naturale;
- individuazione di una metodologia semplificativa, di supporto a metodi di calcolo avanzati, per l'analisi e la progettazione illuminotecnica di ambienti interni.

Capitolo 1

Luce naturale: stato dell'arte su sistemi, metodi, tecniche di progettazione

Il ruolo dell'illuminazione naturale

La capacità visiva dell'uomo è frutto di un adattamento alla luce proveniente da Sole e cielo, sviluppatosi nel corso del tempo; da ciò, deriva l'importante ruolo che l'illuminamento naturale riveste per lo svolgimento di molte attività ed i problemi di natura psico-fisica che quasi sempre interessano coloro che, per differenti motivi, sono destinati a svolgere compiti visivi in ambienti illuminati esclusivamente con sorgenti artificiali.

Tale problematica è di grande attualità, in quanto le capacità visive sviluppate dall'uomo nel tempo erano un tempo finalizzate essenzialmente alle attività all'aperto, che ben poco hanno in comune con quelle caratteristiche di una società industrializzata, svolte in ambienti statici, all'interno di edifici ed al riparo dagli agenti esterni. Oggi, sembra essere certo il ruolo giocato dalla luce naturale sullo stato d'animo, sulla fisiologia, sulla psicologia, e in generale sul benessere dell'essere umano, in particolare dopo le scoperte di Brainard e Thapan, e gli studi di Rea, Veitch e Andersen, con cui sembra prendere forma il ruolo dell'illuminazione biologica (in particolare naturale) nei confronti del sistema circadiano.

Non esistono ancora ad oggi delle regole semplici, atte a garantire, per qualunque tipo di attività, una buona illuminazione naturale in uno spazio confinato. Le aperture, che consentono alla luce di penetrare all'interno dell'ambiente, dovrebbero essere, in rapporto al volume complessivo, in armonia con la distribuzione degli spazi ed in accordo, per gli aspetti architettonici, con le caratteristiche della facciata. Esse, d'altronde, dovrebbero essere proporzionate e collocate in modo da assicurare, nelle diverse ore del giorno, una confortevole distribuzione della luce naturale evitando comunque fenomeni di abbagliamento. Da quanto detto ne consegue che, in fase di progetto, l'impiego della luce naturale impone lo studio di soluzioni che forniscano una soddisfacente risposta sia alle esigenze visive che a quelle architettoniche e quindi influenza la distribuzione funzionale degli spazi, il benessere sia visivo che termico degli occupanti, la struttura ed il comportamento energetico dell'edificio, l'utilizzazione di luce artificiale ed i relativi sistemi di controllo per l'integrazione.

La progettazione di un sistema che assicuri il mantenimento delle condizioni di benessere visivo mediante l'utilizzo dell'illuminamento naturale presenta, a differenza di quella fatta nel caso di illuminazione artificiale, delle problematiche molto più complesse. In primo luogo, la disponibilità di luce naturale, a differenza di quella artificiale, non può essere controllata e fissata dal progettista: la sua distribuzione e la sua intensità sono funzioni della stagione e della latitudine considerate ed è inoltre necessario tener conto delle caratteristiche architettoniche della struttura, del suo orientamento e di tutto ciò che la circonda. È solo negli ultimi decenni, d'altra parte, che i principi della fotometria ed alcune procedure di calcolo caratteristiche dell'illuminotecnica delle sorgenti artificiali, sono stati estesi anche all'illuminazione naturale.

Le considerazioni dei progettisti relativamente all'illuminazione naturale, per secoli, non si sono mai discostate molto da quelle espresse da Vitruvio, sul posizionamento delle finestre e gli effetti visivi all'interno. In realtà un approccio quantitativo più preciso scaturì da esigenze di natura legale, dal bisogno cioè di definire i rapporti di vicinato tra le costruzioni, in termini di ostruzioni alla vista e della possibile reciproca limitazione nell'illuminamento connesse alla presenza di edifici adiacenti. Il problema principale fu quello di determinare l'illuminamento sul piano di lavoro, mentre successivamente si è evidenziata la possibilità di assegnare un significato numerico agli

aspetti soggettivi connessi all'impiego della luce naturale, quali ad esempio l'abbagliamento, l'attenzione e la distrazione negli operatori.

Una delle caratteristiche principali che rende preferibile la sorgente solare rispetto ad altre è la sua qualità: il suo rendimento nella percezione del colore è, ad esempio più elevato rispetto ad altre fonti. Inoltre la radiazione visibile proveniente dal Sole e dal cielo aggiunge una naturale dinamica alle condizioni d'illuminazione di un ambiente, attraverso le variazioni temporali di colore, contrasto e luminanza di ogni superficie; tali effetti difficilmente possono essere simulati mediante l'utilizzo di sorgenti artificiali.

Luce ed energia

L'importanza dell'illuminamento naturale non è legata solo agli aspetti psico-fisiologici della vita umana, ma anche a problematiche di tipo energetico. La conseguenza più immediata di uno studio che tenda a massimizzare l'apporto di illuminamento naturale all'interno di un ambiente confinato, è quella di ottenere una diminuzione sensibile del consumo di energia elettrica. Ad un'analisi superficiale, questa risulterebbe essere una strada obbligata da seguire al fine di ottenere una economicità di gestione dell'edificio. In realtà, il discorso risulta essere più complesso poiché, deve considerarsi l'effetto dovuto all'elevata quantità d'energia termica immessa nell'ambiente per irraggiamento, positivo nei periodi invernali, in quanto si somma ai carichi interni diminuendo la potenza termica da immettere mediante l'impianto HVAC per mantenere le condizioni di benessere prefissate, negativo nei periodi estivi, in quanto l'impianto HVAC per le stesse ragioni deve fornire una potenza frigorifera maggiore. Si deve infine considerare anche l'apporto, in termini di potenza termica dissipata nell'ambiente, dei sistemi di illuminamento artificiale necessari ad integrare, nel caso se ne presentasse la necessità, il livello d'illuminamento non ottenibile tramite sorgente naturale. Solo dopo un'attenta analisi delle condizioni che intervengono nei diversi periodi, quindi, si può optare per una scelta della percentuale di captazione ed utilizzo della luce naturale.

Il vantaggio dell'utilizzo di questa forma d'energia però non è associato esclusivamente alla diminuzione della spesa energetica, ma anche alla riduzione dell'emissione di sostanze inquinanti in atmosfera. La necessità di ottimizzare (aumentando il rendimento degli utilizzatori) il consumo dei combustibili, prevalentemente di tipo primario (petrolio, carbone, gas), è divenuto nel corso degli ultimi decenni una problematica di rilevante interesse. La ricerca di nuove soluzioni è stata dettata in principio da problemi di tipo economico-politici (crisi petrolifera, crisi del Medio Oriente), ma ha ricevuto una formidabile spinta da una "nuova" coscienza ambientale.

La radiazione solare

Il Sole emette secondo uno spettro che è simile a quello di un corpo nero alla temperatura di circa 6000 Kelvin; per corpo nero, si intende un sistema che emette una radiazione elettromagnetica con uno spettro continuo descritto (con intensità in funzione della lunghezza d'onda ad ogni temperatura) dalla funzione di Plank:

$$E_{\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)}$$

il cui integrale esteso, per ogni temperatura, a tutte le lunghezze d'onda fornisce il valore dell'emissività totale del corpo nero a quella temperatura (Tab 1.1).

Tabella 1.1. Spettro di emissione di corpo nero.

λ	$\omega(\lambda)$ (W/m ² μ)	W (da 0 a λ) (W/m ²)	λ	$\omega(\lambda)$ ($\Omega/\mu^2 \mu$)	W (da 0 a λ) (W/m ²)
0.15	0.07	0.008	0.65	1511	562.2
0.20	10.7	0.11	0.70	1369	634.3
0.25	70.4	2.63	0.75	1235	699.4
0.30	514	16.38	0.80	1109	758.0
0.35	1093	61.11	0.90	891	857.4
0.40	1429	118.1	1.00	784	940.2
0.45	2006	204.9	1.50	288	1172
0.46	2066	225.3	2.00	103	1265
0.50	1942	305.8	5.00	3.79	1346
0.55	1725	397.5	10.00	0.24	1352
0.60	1666	482.8	1000	0.00	1353

Dopo aver attraversato l'atmosfera, lo spettro subisce delle modifiche soprattutto a causa delle molecole d'acqua in sospensione nella stessa. La distribuzione spettrale dell'energia solare $\omega(\lambda)$ esternamente all'atmosfera terrestre presenta l'andamento tipico indicato nella figura 1. In Tab: 1 si riportano alcuni dati numerici di $\omega(\lambda)$ alle diverse lunghezze d'onda dovuti a Thekaekara (1974) e misurati ad una quota di 12000 metri sul livello del mare; il massimo di $\omega(\lambda)$ si ha per $\lambda = 0.46\mu$. La curva di emissione si discosta però dalla curva tipica del corpo nero e risulta evidente la presenza di righe di assorbimento dovute all'atmosfera solare, soprattutto nel campo $0.3 - 0.6\mu$. Nell'attraversamento dell'atmosfera terrestre, l'energia solare subisce una consistente riduzione per l'assorbimento gassoso, variabile con lo spessore d'aria attraversata: a parità di spessore, l'energia che arriva sulla superficie terrestre varia ulteriormente a seconda delle condizioni meteorologiche ed in particolare della presenza di vapor d'acqua (Fig. 1.1).

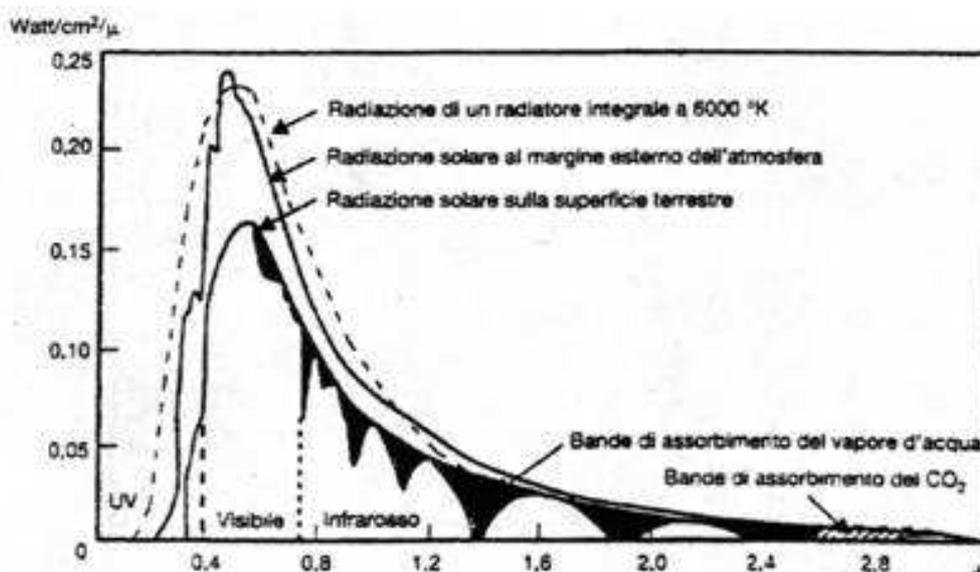


Figura 1.1. Distribuzione spettrale dell'energia raggiante solare esternamente all'atmosfera terrestre.

Si definisce *massa d'aria unitaria* lo spessore d'aria attraversato dai raggi solari quando questi incidono normalmente alla superficie terrestre, cioè quando il Sole si trova allo zenit. In queste condizioni lo spettro incidente assume la configurazione indicata in figura 2 dove sono anche riportati gli spettri relativi ad altri valori della massa d'aria

In Tab. 1.2 si riportano i valori numerici $\omega(\lambda)$ al suolo, per diversi valori di massa d'aria, mentre in Fig. 1.2 si presenta la distribuzione spettrale dell'energia raggiante solare sulla

superficie terrestre per diversi valori della massa d'aria.

Tabella 1.2. Emissione al suolo per diversi valori di m.

$\lambda(\mu)$	$\omega(\lambda) [W/m^2 \mu]$				
	m = 0	m = 1	m = 4	m = 7	m = 10
0.35	1093	481	40.8	3.5	0.3
0.40	1429	850	179	37.6	7.9
0.45	2006	1388	460	153	50.6
0.50	1942	1451	606	253	106
0.55	1725	1337	622	289	135
0.60	1666	1320	656	326	162
0.65	1511	1257	724	417	240
0.70	1369	1175	744	471	298
0.75	1235	1077	713	473	313
0.80	1109	981	679	470	326
0.90	891	449	184	92.3	50.0

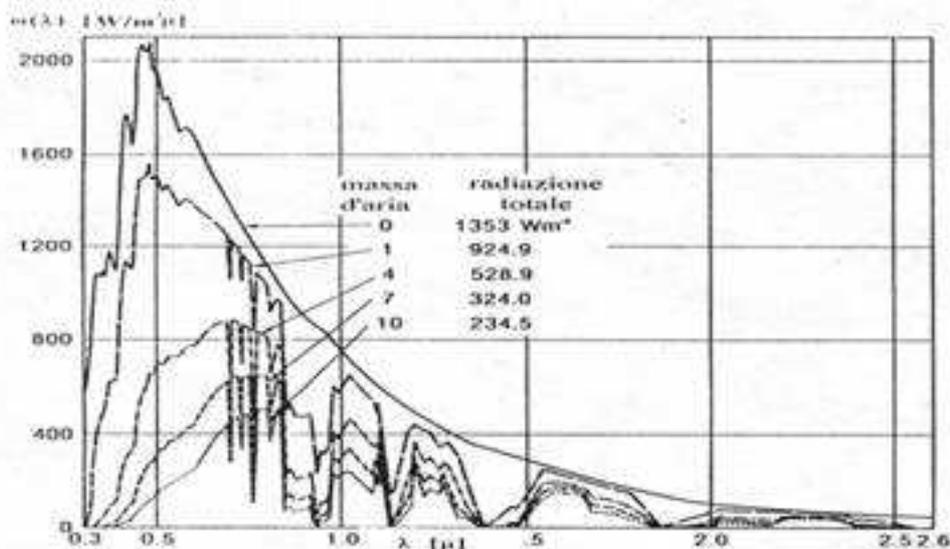


Figura 1.2. Distribuzione spettrale dell'energia raggiante solare sulla superficie terrestre, per diversi valori della massa d'aria

Gli andamenti sono molto irregolari per la presenza di bande di assorbimento; l'atmosfera assorbe gran parte della radiazione ultravioletta e meno del 20% di questa raggiunge la superficie terrestre a livello del mare. Il massimo della distribuzione spettrale dell'energia incidente si sposta verso destra all'aumentare della massa d'aria: a questo fenomeno corrisponde la proprietà della luce solare di assumere un colore tendente al rosso nelle ore prossime all'alba ed al tramonto.

In termini globali, con massa d'aria eguale ad 1 si ha una riduzione dell'energia incidente da 1353 W/m² fuori dell'atmosfera a 925 W/m² a livello del mare. Tale riduzione non è proporzionale alla massa d'aria poiché, all'aumentare di questa, assumono maggiore importanza i fenomeni di

diffusione. Tutti i dati sono soggetti a variare in funzione delle caratteristiche dell'atmosfera, in particolare del grado di inquinamento; i dati riportati sono relativi a condizioni di cielo sereno e ad un'aria parzialmente inquinata.

La radiazione solare che raggiunge il suolo è distribuita tra vari range di lunghezze d'onda:

- 300-370 nm 2.3% (UV);
- 380-780 nm 54% (Visibile);
- 790-2500 nm 42.4% (IR vicino);
- 2500-4050 nm (IR lontano).

L'intensità media della radiazione solare incidente in direzione normale ad una superficie posta al di fuori dell'atmosfera terrestre prende il nome di *costante solare* ed ha il valore $\omega_o = 1353W / m^2$, corrispondente alla distanza media Terra-Sole; ω_o non è in realtà una costante, dal momento che detta distanza varia nel corso dell'anno a seconda della posizione occupata dalla Terra nell'orbita ellittica che essa segue nel suo moto di rivoluzione intorno al Sole. In Tab. 1.3 sono riportate le variazioni di ω nel corso dell'anno astronomico. Soltanto nei giorni 4 Aprile e 5 Ottobre ω è uguale a ω_o . Il 4 Gennaio ω raggiunge il valore massimo $\omega_{max} = 1399W / m^2$ ed il 3 Luglio ω raggiunge il suo valore minimo $\omega_{min} = 1309W / m^2$; il rapporto $(\omega_{max} - \omega_{min}) / \omega_o$ è pari al 6.65%.

Tabella 1.3. Variazioni di ω nel corso dell'anno astronomico

<i>Data</i>	<i>Radiazione solare</i> [W/m ²]	<i>Data</i>	<i>Radiazione solare</i> [W/m ²]
1 Gennaio	1399	1 Luglio	1309
4 Gennaio	1399	3 Luglio	1309
1 Febbraio	1393	1 Agosto	1313
1 Marzo	1378	1 Settembre	1329
1 Aprile	1355	1 Ottobre	1350
4 Aprile	1353	5 Ottobre	1353
1 Maggio	1332	1 Novembre	1374
1 Giugno	1316	1 Dicembre	1392

Tutti i valori riportati sono i risultati di un calcolo effettuato tenendo conto che ω varia in ragione inversa del quadrato della distanza Terra-Sole la cui misura, variabile nel tempo, è conosciuta con notevole precisione. Pertanto la differenza $(\omega_{max} - \omega_{min})$, così come tutti gli scarti relativi ai valori di ω per le diverse giornate, sono affetti da errori modesti e comunque non superiori al $\pm 0.1\%$; di valore maggiore invece risulta essere l'errore su ω_o , che è, almeno con le tecniche di misura disponibili attualmente, dell'ordine di $\pm 20 W/m^2$, vale a dire, in termini di errore relativo, del $\pm 1.5\%$: tale è dunque l'errore da cui sono affetti tutti i valori riportati nella suesposta tabella.

Materiali ed irraggiamento

Nell'ottica del rispetto delle condizioni di benessere psico-fisiche, riveste notevole importanza l'individuazione e la corretta progettazione delle 'aperture trasparenti'. I materiali trasparenti in edilizia svolgono infatti un ruolo critico per ciò che riguarda sia l'illuminazione naturale che il carico termico complessivo dell'edificio: permettendo l'ingresso della radiazione solare proveniente direttamente dal Sole, ovvero riflessa dal cielo, dal terreno e dagli edifici circostanti, tali materiali consentono l'illuminazione degli ambienti e contribuiscono al loro riscaldamento.

Appare evidente che lo studio di una corretta illuminazione diurna obbliga ad affrontare il problema sin dalle prime fasi della progettazione, con un'opportuna scelta dell'orientamento del fabbricato, delle dimensioni e della forma delle superfici trasparenti, dei materiali impiegati.

L'obiettivo di garantire il benessere di coloro che vivono e operano all'interno dei fabbricati, comporta l'esame di aspetti diversi e talvolta tra loro contrastanti. Ampie finestrate consentono da un lato il lavoro dell'individuo in ambienti adeguatamente e naturalmente illuminati, dall'altro obbligano a proteggere coloro che si trovano negli ambienti dal notevole carico termico che l'irraggiamento solare produce e dai fenomeni di abbagliamento e di discomfort locale. Si tratta quindi di un problema di ottimizzazione che deve tener conto di questi aspetti contrastanti, ma che non può ignorare l'imprescindibile necessità di luce e di aria sentita dall'uomo nelle sue attività.

In aggiunta, vanno considerati gli aspetti relativi al rumore e all'effetto delle radiazioni solari sui materiali impiegati negli interni. Il primo è associabile a quello dei carichi termici, volendosi con quest'affermazione intendere che molti degli accorgimenti adottabili per il controllo della trasmissione del calore (aumento dello spessore e del numero dei vetri, nuovi materiali trasparenti (TIM), telai ben costruiti) si muovono nello stesso senso della protezione da rumori esterni. Il secondo, invece, va tenuto nella dovuta considerazione allorché negli ambienti siano conservati beni di particolare valore (libri, quadri, stoffe, mobili, ecc.), molto sensibili all'esposizione prolungata alle radiazioni luminose.

Le proprietà dei materiali trasparenti

I materiali trasparenti sono caratterizzati da proprietà ottiche, termiche ed energetiche. Tra le proprietà ottiche, si definisce trasmittanza il rapporto tra la quantità di radiazione che riesce ad attraversare un materiale e quella incidente sul materiale stesso:

$$\tau = \frac{I_t}{I}$$

Analogamente, si definiscono i valori di riflettanza e assorbanza di un materiale come i rapporti tra la radiazione riflessa o assorbita dal campione rispetto a quella incidente.

$$\rho = \frac{I_r}{I} \qquad \alpha = \frac{I_a}{I}$$

Tra i tre coefficienti esiste la relazione $\tau + \alpha + \rho = 1$

I tre coefficienti individuati dipendono funzionalmente da diversi parametri; una prima importante distinzione va fatta tra proprietà spettrali e a largo spettro (broad-band). La radiazione globale è composta da una serie di radiazioni monocromatiche (con un'unica frequenza e quindi con un'unica lunghezza d'onda), sovrapposte. Generalmente, le caratteristiche ottiche dei materiali, non sono costanti, ma assumono valori differenti rispetto alle varie lunghezze d'onda.

Di conseguenza, in luogo di un singolo e ben definito valore, la trasmittanza (e così la riflettanza e l'assorbanza) assume la forma di una funzione della lunghezza d'onda:

$$\tau(\lambda) = \frac{I_t(\lambda)}{I(\lambda)}$$

Tale formulazione, anche se dal punto di vista scientifico è la più corretta, risulta di non facile utilizzo soprattutto in contesti non specialistici, e quindi si sono definiti da questa forma funzionale alcuni valori che descrivono con adeguata precisione e semplicità le prestazioni di interesse.

Se in luogo di una radiazione generica, si utilizza per illuminare il materiale la radiazione solare, o meglio una radiazione con uno spettro di riferimento mediamente simile a quello solare, il rapporto tra l'energia trasmessa otticamente rispetto a quella incidente è definito trasmittanza solare (τ_e). Lo stesso valore di trasmittanza può essere ottenuto analiticamente, conoscendo la curva di trasmittanza spettrale e lo spettro solare di riferimento ($E(\lambda)$):

$$\tau_e = \frac{\int \tau(\lambda) \cdot E(\lambda) \cdot d\lambda}{\int E(\lambda) \cdot d\lambda}$$

I valori della trasmittanza variano a seconda dell'angolo di incidenza della radiazione rispetto alla superficie di interesse: il valore massimo lo si ha quando il fascio luminoso incide ortogonalmente rispetto alla superficie e al diminuire dell'inclinazione, si osserva un decremento monotono fino ad un valore nullo.

Nel caso specifico della luce naturale, le variazioni degli angoli di incidenza relativi ad una lastra verticale vanno da 0° (zenit) a 90° (orizzonte). La letteratura scientifica riporta diversi studi sulla misura sperimentale dei valori della trasmittanza in funzione degli angoli di incidenza della luce solare. In Fig.1. 3 sono riportate le curve più note, riferite ad una lastra di cristallo avente trasmittanza "normale" $\tau_n = 93\%$, il valore massimo di cui si può disporre.

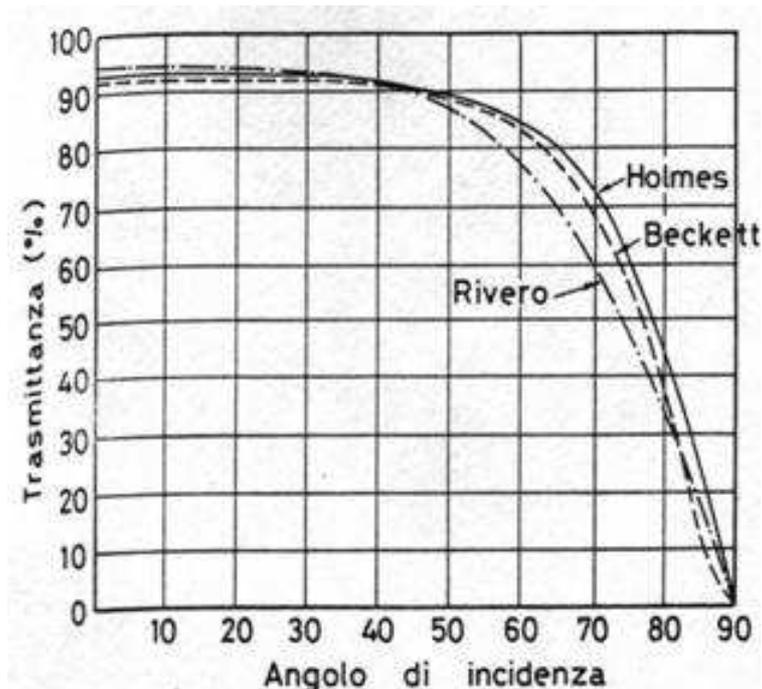


Figura 1.3. Curve relative alla trasmittanza di una lastra avente trasmittanza normale $\tau_n=93\%$) in funzione degli angoli di incidenza della luce.

Le curve di Holmes e di Beckett sono sperimentali, quella di Rivero è analitica e viene rappresentata dalla seguente espressione trigonometrica:

$$\tau_i = 1,018 \cdot \tau_n \cdot (\cos i + \sin^3 i \cdot \cos i)$$

essendo i l'angolo d'incidenza e τ_n la trasmittanza in direzione normale alla superficie.

L'espressione di Rivero risulta molto comoda per l'inserimento nei programmi di analisi numerica computerizzati, relativi a calcoli di carattere scientifico condotti per punti su un piano di riferimento.

Diversamente da quest'impiego, le tre curve summenzionate non hanno grossa utilità e vengono indicate per dimostrare la macroscopica variazione della trasmittanza angolare della luce.

Caratteristiche dei materiali

Le caratteristiche fotometriche dei materiali giocano un ruolo fondamentale nel determinare la distribuzione spaziale e la qualità della luce in un ambiente. Il flusso luminoso trasmesso da un materiale trasparente risulta, in generale, diverso da quello incidente sia come distribuzione spettrale che come direzione; i raggi luminosi che attraversano l'apertura trasparente inoltre incidono sulle diverse pareti che delimitano l'ambiente e da queste vengono in parte assorbiti e in parte riflessi con una nuova variazione della distribuzione spettrale e della direzione dei raggi luminosi. In definitiva, le caratteristiche della luce disponibile su un piano di lavoro dipendono fortemente dalla geometria, dalla morfologia e dalle proprietà dei vari materiali 'incontrati' dalla radiazione luminosa nel percorso dalla sorgente al piano di utilizzazione. Una caratterizzazione completa dei materiali dal punto di vista fotometrico richiederebbe la determinazione sperimentale, per mezzo di uno spettrofotometro, del solido fotometrico, riflesso e/o trasmesso, in funzione dell'angolo di incidenza del raggio e della sua lunghezza d'onda. Si tratterebbe, cioè di un procedimento estremamente complesso e costoso, non giustificato nella maggior parte dei casi, ovvero per i materiali ed i rivestimenti tradizionalmente impiegati in edilizia. Per questi, è possibile adottare una classificazione che consenta di riunire i materiali in poche categorie, caratterizzabili per mezzo di un numero molto limitato di parametri.

In generale, si parla di materiali perfettamente speculari quando non si ha diffusione ed il raggio emergente (riflesso o trasmesso) forma un angolo rispetto alla normale alla superficie uguale all'angolo d'incidenza (Fig. 1.4). Allo stesso modo, si parla di materiali perfettamente diffondenti quando il solido fotometrico della luce emergente (riflessa o trasmessa) è una sfera. La classificazione è quella proposta in sede Comunitaria, basata sul parametro *angolo di dispersione* δ rappresentato in Fig. 1.5. Le categorie sono le seguenti:

- diffondenti, se $45^\circ < \delta < 60^\circ$; la perfetta diffusione si otterrà con $\delta = 60^\circ$;
- con diffusione ampia, se $15^\circ < \delta < 45^\circ$;
- con diffusione stretta, se $0^\circ < \delta < 15^\circ$;
- speculari, se $\delta = 0$, cioè in assenza totale di diffusione;
- diffondenti speculari, quando i due componenti coesistono;
- complessi, quando il flusso emergente forma un solido fotometrico molto irregolare o con discontinuità, spesso molto

- variabile con l'angolo di incidenza, ed anche, a parità di questo, con la direzione. Al fine di caratterizzare i materiali dei tipi indicati nella schematizzazione spesso è sufficiente indicare:
- la categoria, che permette di riassumere il comportamento 'distributivo';
- il colore, che riassume l'effetto 'spettrale';
- il coefficiente *di rinvio o di trasparenza*, che riassume l'effetto di attenuazione.

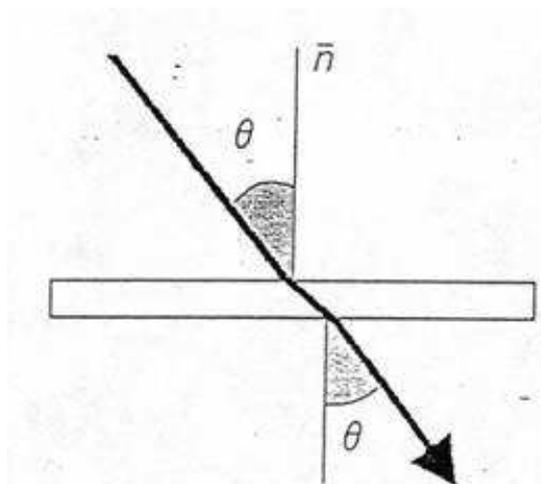


Figura 1.4. Materiale speculare (trasmissione)

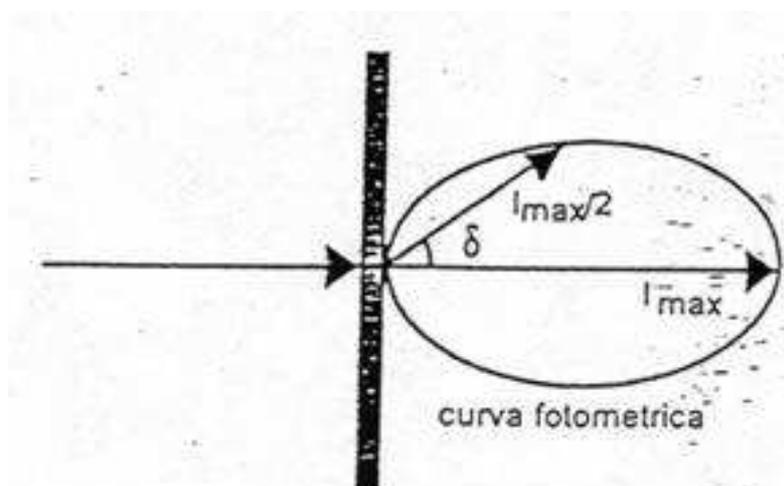


Figura 1.5. Definizione dell'angolo di dispersione materiale speculare (trasmissione)

La questione del colore è, in realtà, complessa. Una possibile caratterizzazione può basarsi sulla variazione della temperatura di colore tra flusso incidente e flusso emergente. Si assume come flusso incidente di riferimento quello della luce naturale diffusa con temperatura di colore di 6000 K; il materiale è caratterizzato dalla temperatura di colore del flusso emergente. Un vetro chiaro (materiale speculare) trasmette, ad esempio, la luce diffusa con modesta variazione di temperatura di colore (-70 K), mentre altri materiali trasparenti alterano sensibilmente la luce trasmessa, con variazioni di colore di centinaia di Kelvin, come nel caso della carta bianca (materiale diffondente), che aumenta la temperatura di colore di oltre 1300 K, lasciando emergere una luce sensibilmente più blu di quella incidente.

Materiali trasparenti tipici delle categorie viste sopra sono:

- diffondenti: acrilici, rivestimenti in PVC su tessuti in poliestere, carta;
- con diffusione ampia: alcuni vetri laminati, policarbonati multi-strato;
- con diffusione stretta: vetri o materiali acrilici goffrati;
- speculari: vetri chiari o colorati, vetri basso-emissivi, policarbonati;
- diffondenti-speculari: tessuti per tende;
- complessi: PVC e policarbonati strutturati, pannelli prismatici acrilici.

Materiali riflettenti tipici sono:

- diffondenti: moquette, pannelli di fibre minerali, calcestruzzo poroso;
- con diffusione ampia: vernici opache, tessuti di poliestere, calcestruzzo;
- con diffusione stretta: vernici satinare, alcuni rivestimenti plastici;
- speculari: specchi;
- diffondenti-speculari: vernici a smalto, superfici lucidate;
- complessi: superfici corrugate e irregolari, metalli piegati o deformati.

Esistono poi materiali trasparenti innovativi, il cui sviluppo è tuttora in atto, con proprietà e comportamenti molto differenziati e la cui possibilità d'impiego, alla luce delle problematiche relative al benessere e al rispetto delle politiche ambientali, apre nuove prospettive di progetto: tali materiali sono stati presentati diffusamente nella relazione tecnica di chiusura del primo anno di attività.

Sorgenti di luce naturale

La luce naturale giunge sulla superficie terrestre da due sorgenti: il Sole ed il cielo. In analogia con la terminologia utilizzata per la radiazione, si può parlare di luce diretta (dal Sole), diffusa (dal cielo) e globale, somma delle due componenti.

Il contenuto luminoso della radiazione è espresso dal coefficiente di visibilità della radiazione K , ovvero il rapporto tra il flusso luminoso (espresso in lm) e la potenza radiante (W).

Nella letteratura scientifica si trovano diversi tentativi di indagine di tipo sperimentale legati a questi aspetti della radiazione che hanno portato a risultati differenti, in quanto K dipende sensibilmente dalla distribuzione spettrale della radiazione, e questa, a sua volta, è fortemente dipendente dalle caratteristiche dell'atmosfera, variabili da luogo a luogo, e dallo spessore di atmosfera attraversato, che dipende dalla posizione (altezza) del Sole.

Altre cause che hanno comportato delle sostanziali differenze sono da ricercare nei metodi di misurazione adottati.

In generale, per dare dei valori di riferimento della efficienza luminosa del cielo, per la radiazione diffusa sono stati misurati valori di K compresi tra 84 e 173 lm/W , per quella diretta si trovano valori di K compresi tra 50 e 120 lm/W (Littlefair, 1985).

Modelli di cielo

La luce proveniente dal cielo può essere caratterizzata in termini di luminanza ($\text{cd/m}^2 = \text{nit}$) della volta celeste. La distribuzione della luminanza dipende da molti fattori: posizione del Sole, nuvolosità, presenza nell'atmosfera di particelle in sospensione di diversa natura e dimensione (torbidità).

Nuvolosità e torbidità possono essere molto variabili, nel tempo e da luogo a luogo. Per descrivere le diverse situazioni che si possono verificare, sono stati proposti diversi modelli di cielo, ovvero espressioni che descrivono la distribuzione di luminanza in funzione di alcuni parametri.

Nel seguito si indicherà con L_p la luminanza del punto P del cielo, e con E_h l'illuminamento globale su superficie orizzontale ($\text{lux} = \text{lm/m}^2$). Il Comité International de l'Eclairage (CIE) ha definito i seguenti modelli:

- ***cielo uniforme (completely overcast sky)***

si ipotizza che la luminanza abbia lo stesso valore, L_u in tutti i punti del cielo, e quindi che questo si comporti come una sorgente estesa che emetta secondo la legge di Lambert ovvero:

$$L_p = L_u = \frac{E_h}{\pi}$$

Quest'ipotesi semplifica notevolmente il problema e corrisponde ad una situazione di cielo parzialmente coperto, in inverno quando il Sole è basso sull'orizzonte. A tale riguardo, viene normalmente attribuito al cielo un valore di luminanza pari a 1600 cd/m^2 .

- ***cielo coperto (cloudy sky)***

per descrivere un cielo coperto si usa l'espressione proposta da Moon e Spencer, assunta dalla CIE nel 1955 quale cielo di riferimento, che prevede che la luminanza abbia il suo massimo allo zenit e decresca fino all'orizzonte, ove assume un valore pari a un terzo del massimo:

$$L_p = L_z \frac{1 + 2 \sin \vartheta}{3}$$

dove ϑ è l'altezza angolare del punto rispetto all'orizzonte e L_z è la luminanza allo zenit, legata a E_h dall'espressione:

$$L_z = \frac{9}{7} \cdot \frac{E_h}{\pi}$$

La formula di Moon e Spencer non considera la riflessione del terreno che ha in realtà una certa influenza.

- ***Cielo sereno (clear sky)***

Per il caso di cielo perfettamente sereno, si è adottata una relazione che esprime la luminanza di un punto in funzione di tre angoli, come illustrato in Fig. 1.6 (CIE,1973):

- ϑ : altezza del punto, oppure β , distanza angolare, ove evidentemente $\beta = \pi/2 - \vartheta$;
- η : distanza angolare tra punto e Sole;
- γ : altezza angolare del Sole rispetto all'orizzonte, oppure ζ , distanza angolare tra Sole e Zenit, ove $\zeta = \pi/2 - \gamma$.

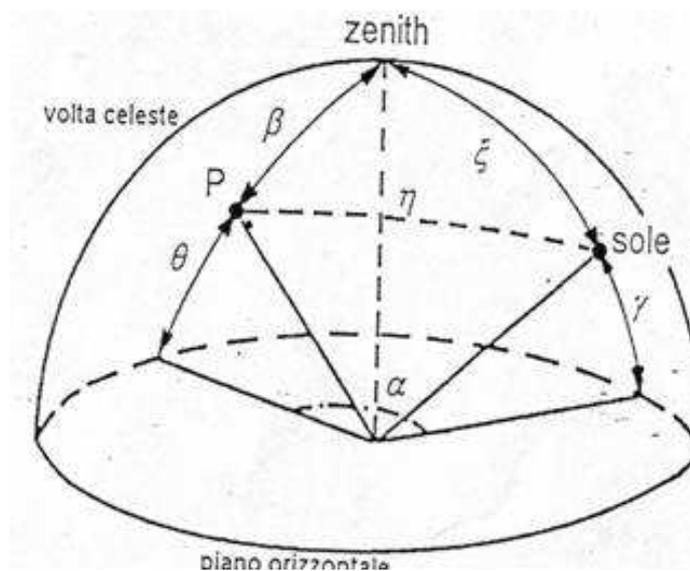


Figura 1.6. Volta celeste e angoli per definire la luminanza di un punto P.

Nell'espressione compare anche α , angolo tra i piani verticali contenenti Sole e punto, ricavabile dagli altri tre dall'equazione:

$$\cos(\eta) = \cos(\zeta) \cdot \cos(\beta) + \sin(\zeta) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\alpha)$$

L'espressione della luminanza del punto P è del tipo:

$$L_p = L_z \cdot \frac{f(\eta) \cdot \Phi(\beta)}{f(\zeta) \cdot f(\vartheta)}$$

dove la funzione $f(\text{argomento})$ ha la forma:

$$f(\text{arg}) = 0,91 + 10 \exp(-3 \text{arg}) + 0,45 \cos(\text{arg})$$

e la funzione $\Phi(\text{argomento})$ ha la forma:

$$\Phi(\text{argomento}) = 1 - \exp[(-0,32/\cos(\text{arg}))]$$

Attualmente sono in corso delle ricerche che, tenendo conto dei valori rilevati di irraggiamento globale e diffuso, del tipo di nuvolosità e dell'eventuale inquinamento atmosferico, facciano pervenire alla definizione di distribuzioni di luminanza del cielo più conformi a quelle che si riscontrano nella realtà.

Esistono poi diverse altre possibili caratterizzazioni del cielo, generalmente meno note, meno diffuse ed impiegate, che esulano dalla presente trattazione. Importante almeno fare cenno al progetto internazionale in via di conclusione che dovrebbe portare nel prossimo futuro alla caratterizzazione del cielo in 15 modelli (5 per il cielo sereno, 5 per il cielo variabile, 5 per il cielo coperto) comprendenti gli attuali modelli di cielo coperto e sereno standard CIE. Dovrebbe inoltre nel corso del prossimo anno (2011) concludersi l'attività del CIE TC 3-51 (Chair: Prof. Stan Darula) dedicato allo studio dell'attuale stato dell'arte sulla caratterizzazione e modellizzazione dei cieli.

Cieli reali

Nella maggior parte dei casi il cielo non è descrivibile mediante uno dei modelli visti finora. In particolare, i cieli uniforme o coperto non descrivono adeguatamente le condizioni di cielo nuvoloso, per le quali sono stati proposti una serie di altri modelli basati su modifiche dell'espressione del cielo sereno CIE.

Ad esempio Pierpoint (1983) propone le espressioni:

$$f(\arg) = 0,526 + 5 \exp(-1,5 \arg)$$
$$\Phi(\arg) = 1 - \exp[-0,80 / \cos(\arg)]$$

Gilette e Treado (1985) propongono che la luminanza di un punto con cielo nuvoloso L_p sia data in funzione della media pesata delle luminanze con cieli CIE coperto, L_{po} , e sereno, L_{pc} :

$$L_p = \rho L_{pc} + (1 - \rho) L_{po}$$

dove il peso, ρ , è espresso in funzione del rapporto K_d , definito come il rapporto tra l'irraggiamento diffuso su superficie orizzontale e irraggiamento globale su superficie orizzontale.

Tipi di cielo proposti dal CSTB

Sulla base dei dati raccolti nel corso di un'estesa campagna di misure di luminanza, di illuminamento e di irraggiamento, il Centre Scientifique et Technique du Batiment (CSTB) di Nantes ha proposto di classificare i cieli in cinque categorie:

- cielo coperto
- cielo coperto intermedio
- cielo medio
- cielo sereno intermedio
- cielo sereno

Il criterio di classificazione, esposto in Tab. 1.4, è basato sul valore assunto dall'indice di nuvolosità, I_n , definito come:

$$I_n = \frac{1 - K_{dM}}{1 - K_{dT}}$$

dove K_{dM} è il valore misurato del rapporto dell'irraggiamento diffuso/diretto, mentre K_{dT} è il valore teorico con condizioni di cielo perfettamente sereno.

Tabella 1.4. Indice di luminosità in funzione del tipo di cielo.

Tipo di cielo	Indice di luminosità
Coperto (C)	$0,00 < I_n < 0,05$
Coperto intermedio (IC)	$0,05 < I_n < 0,20$
Medio (M)	$0,20 < I_n < 0,70$
Sereno intermedio (IS)	$0,70 < I_n < 0,90$
Sereno (S)	$0,90 < I_n < 1,00$

La luminanza di un punto della volta celeste è data dall'espressione generale:

$$L_p = A \cdot f(\eta) \cdot g(\beta) \cdot h(\zeta)$$

dove i tre angoli η , β e ζ hanno il significato già visto, A è un fattore di scala, e la funzione f ha forma simile alla corrispondente del cielo sereno CIE vista precedentemente:

$$f(\eta) = a_1 + b_1 \exp(-K\eta) + c_1 \cos(\eta)$$

mentre le funzioni g ed h hanno la forma:

$$g(\beta) = a_2 - b_2 \cdot [\cos(\beta)]^{0,6}$$

$$h(\zeta) = a_3 + b_3 \cos(\zeta) + c_3 \sin(\zeta)$$

e il valore dei coefficienti è riportato in Tab. 5.

Tabella 1.5. Valori dei coefficienti per la valutazione della luminanza in funzione del tipo di cielo.

Tipo di cielo	C	IC	M	IS	S
a1	32.33	17.82	14.41	13.05	12.89
b1	13.16	23.99	69.70	124.96	243.38
K	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
c1	3.24	13.35	10.18	7.49	3.26
a2	1.18	1.70	2.03	2.21	2.25
b2	0.23	0.89	1.31	1.54	1.59
a3	0.76	0.45	0.83	-0.83	1.04

b3	0.13	0.10	-0.29	-0.28	-0.41
c3	0.20	0.59	0.38	0.42	0.20

Nel caso in cui sia noto il valore dell'irraggiamento diffuso su superficie orizzontale, I_d , [W/m^2], si ottiene:

$$L_p = I_d \cdot f'(\eta) \cdot g'(\beta) \cdot h'(\zeta)$$

dove le tre funzioni $f'(\eta)$, $g'(\beta)$ e $h'(\zeta)$ hanno la forma di quelle descritte precedentemente.

Dati sperimentali per la progettazione e la ricerca

Numerose sono le motivazioni alla base della domanda di dati sperimentali sulla disponibilità di luce naturale, in particolare nella progettazione illuminotecnica degli ambienti confinati e nella ricerca.

Le procedure di calcolo fondate sui valori della luminanza allo zenit o quelli per la valutazione dell'illuminamento diretto richiedono, per il loro sviluppo, i valori sperimentali delle corrispondenti grandezze ed informazioni sull'atmosfera.

I metodi per la determinazione del fattore di luce diurna utilizzano storicamente solo condizioni di cielo 'overcast', e, più recentemente anche altre condizioni di cielo, e richiedono i dati relativi all'illuminamento diffuso, diretto e globale su superficie orizzontale (CIE, 1970).

I metodi semplificati, che permettono una rapida valutazione dell'illuminamento naturale degli ambienti confinati, necessitano di dati orari o compendi statistici dei valori orari, relativi all'illuminamento su superficie orizzontale per le componenti globali, diffusa e diretta ed infine condizioni statistiche di cielo mensili e stagionali.

Va comunque ricordato che in tutte le applicazioni illustrate è fondamentale utilizzare dati di radiazione e di illuminamento che provengano da una stessa stazione e che siano rilevati simultaneamente perché vi sia la possibilità di un obiettivo confronto.

Metodi di calcolo

Per il calcolo dell'illuminamento naturale (daylighting) di un ambiente interno sono state proposte nel tempo diverse metodologie che, benché sviluppate su ipotesi sufficientemente rigorose, consentono una rapida valutazione delle grandezze in oggetto. Tali metodologie possono essere suddivise in due categorie:

- metodi basati sul concetto di fattore di luce diurna (Daylighting Factor), prevalentemente studiati e sviluppati in Gran Bretagna;
- metodi basati sul concetto di coefficiente d'utilizzazione (Lumen Method), prevalentemente studiati e sviluppati negli Stati Uniti.

Metodo del fattore di luce diurna

Il metodo del fattore di luce diurna deriva dalle ricerche di Waldram (Waldram, 1944), sulla base del lavoro condotto dai ricercatori del BRE (British Research Establishment) a Watford, in Inghilterra e da Hopkinson (Hopkinson et al, 1966).

Il metodo è attualmente raccomandato dalla CIE (1972) per il calcolo dell'illuminazione naturale all'interno degli edifici. Esso si basa sull'assunto che l'illuminamento prodotto dalla luce naturale in un punto all'interno di un ambiente è soggetto a variazioni analoghe a quelle che si producono all'esterno.

Il coefficiente Daylight Factor (DF) è il parametro ormai universalmente accettato per l'impostazione degli studi volti a garantire un'illuminazione diurna ottimale. Esso è definito come il rapporto tra l'illuminamento che si ha in un punto dell'ambiente per effetto dell'illuminazione dovuta alla sola componente diffusa (ipotesi di cielo coperto standard) ricevuta da un cielo di nota distribuzione di luminanza (per quanto riguarda l'illuminamento esterno, viene comunemente assunto il valore di 5000 lx), in assenza di ostruzioni, e l'illuminamento che, nello stesso istante, si avrebbe su una superficie orizzontale esposta all'aperto e schermata dall'irraggiamento solare diretto. Il metodo del fattore di luce diurna è stato sviluppato assumendo il modello di cielo coperto o uniforme CIE 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. In Tab. 1.6 sono riportati i valori di DF consigliati (I.E.S. 1961) per varie destinazioni d'uso.

Tabella 1.6. Valori del fattore di luce diurna per diverse destinazioni d'uso.

Ambienti	DF (%) ≥	Raccomandazioni
Cucine	2	Su almeno il 50% dell'area del pavimento (minimo 4.5 m ²)
Soggiorni	1	Su almeno il 50% dell'area del pavimento (minimo 7.0 m ²)
Stanze da letto	0.5	Su almeno il 75% dell'area del pavimento (minimo 5.5 m ²)
Scuole	2	In tutte le aule e nelle cucine
Ospedali	1	Nelle camere di degenza
Sale da disegno	6	Sui tavoli da disegno
	2	Sul resto dell'area
Copisterie	4	Su tutta l'area di lavoro
Officine	3-6	Secondo se prevale l'illuminazione laterale o dall'alto
Industrie	5	
Edifici pubblici	1	Con illuminazione laterale a 3.6 m dalla finestra
Uffici	2	Con illuminazione dall'alto su tutta l'area

Il flusso luminoso incidente su di un punto di una superficie all'interno di un ambiente dipende da due componenti: la componente diretta entrante attraverso la finestra e quella indiretta o riflessa internamente, che raggiunge il punto dopo ripetute riflessioni sulle superfici interne. A sua volta la componente diretta può essere considerata come la somma di due aliquote: la componente cielo, proveniente direttamente dalla volta celeste e la componente riflessa esternamente, che raggiunge il punto dopo una o più riflessioni sulle superfici esterne. Ne consegue che il fattore di luce diurna è dato dalla somma di tre componenti:

- D_s : componente diretta cielo;
- D_e : componente di riflessione esterna;
- D_i : componente di riflessione interna.

Se la somma di queste tre componenti uguaglia o supera il valore ottimale del 4%, l'ambiente in esame gode di un'ottima illuminazione naturale; in ogni caso dovranno essere rispettati i valori indicati nella tabella precedente.

Il calcolo del fattore di luce diurna può avvenire sia valutando globalmente le tre componenti, sia valutando singolarmente gli apporti dovuti al campo diretto e al campo diffuso e sommandoli poi successivamente; si considera come campo diretto l'apporto fornito dai flussi provenienti dalle sorgenti primarie esterne (cielo e Sole) e dalle "ostruzioni urbane" viste come sorgenti primarie a bassa luminanza, e come campo diffuso l'apporto dovuto dai flussi indiretti che raggiungono il punto in esame per effetto delle riflessioni multiple delle diverse superfici delimitanti l'ambiente. La sostanziale differenza tra i due approcci sta nel fatto che i metodi del primo tipo forniscono un valore medio dell'illuminamento nell'ambiente, sono quindi utilizzabili in sede di progetto per il dimensionamento delle superfici trasparenti, mentre quelli del secondo tipo forniscono valori puntuali dell'illuminamento nell'ambiente e risultano quindi utili, in sede di verifica, per valutare la distribuzione della luce.

Calcolo del fattore di luce diurna

Trascurando i criteri di calcolo che forniscono solo i valori medi del fattore di illuminazione diurna senza tener conto di forma e dimensione della finestra, un calcolo sufficientemente preciso di DF può essere effettuato mediante l'uso di diversi metodi che sostanzialmente possono essere raggruppati in due categorie principali:

- metodi tabellari
- metodi grafici.

In questo paragrafo vengono solo accennati alcuni di questi metodi, rinviando per un eventuale approfondimento ai testi citati in bibliografia.

- **Metodo N.P.L.:** metodo tabellare elaborato attorno al 1940 dal National Physical Laboratory per valutare l'illuminamento diretto prodotto da un cielo a radianza uniforme attraverso una superficie trasparente verticale su un piano orizzontale, interno ad un ambiente. Questo metodo consente di valutare tra l'altro l'illuminamento in vari punti arrivando a stabilire i limiti di penetrazione della luce diretta e le curve isolux. In questo metodo non si tiene in conto esplicitamente delle ostruzioni esterne.
- **Metodo di Rivero:** metodo tabellare che prende il nome del ricercatore R. Rivero ed è sicuramente più completo e preciso del metodo precedente, pur conservandone le caratteristiche essenziali. Attraverso una serie di tabelle integrate da espressioni trigonometriche è possibile calcolare l'illuminamento prodotto sia da un cielo a radianza

uniforme che da un cielo CIE in un punto interno ad un ambiente su di una giacitura qualsiasi. Il metodo calcola infatti nel punto in oggetto i vari contributi di energia luminosa dovuti agli elementi finiti in cui è suddivisa la superficie trasparente (finestra), sommandoli.

- **Metodi grafici:** messi a punto per il calcolo del fattore di luce diurna, sono moltissimi ed alcuni di essi sono assai completi ed originali. In particolare è necessario citare il metodo di Waldram che può essere applicato anche a geometrie molto complesse e il metodo B.R.S. Daylight Protractors. In particolare quest'ultimo fornisce dei regoli semicircolari che consentono una rapida valutazione dei fattori D_s e D_e tali regoli sono di facile e rapida utilizzazione e permettono di verificare i livelli di illuminamento naturale ottenibile in punti interni di ambienti di cui siano note piante e sezioni.
- **Metodo tabellare B.R.S.:** è stato proposto nel 1958 da Hopkinson sulla base degli studi di Waldram e, pur non essendo il più completo, ha il pregio di essere di facile impiego, consentendo comunque delle approssimazioni generalmente accettabili. Le tabelle proposte dal metodo forniscono la componente cielo D_s in un punto di una superficie orizzontale prodotta da un cielo a radianza uniforme o da un cielo coperto internazionale (CIE) attraverso una finestra verticale.

Lumen method

Il lumen method, talvolta denominato lumen input method o metodo del flusso totale, si basa sull'assunto che l'illuminamento in un dato punto appartenente ad una superficie all'interno di un ambiente è funzione dell'illuminamento sul piano della superficie vetrata.

La procedura attualmente raccomandata dall'IESNA (Illuminating Engineering Society of North America) rappresenta l'estensione al caso della luce naturale del metodo dell'IES per il calcolo dell'illuminazione artificiale. La procedura consente di valutare, se la superficie è collocata su una parete verticale, l'illuminamento in tre punti collocati su una retta ortogonale rispetto al piano della finestra, centrata rispetto ad essa ed appartenente ad un piano collocato a 0.76m dal pavimento (piano di lavoro). Se la superficie vetrata è invece utilizzata come copertura, è possibile la valutazione dell'illuminamento medio sul piano di lavoro.

Le geometrie previste sono di norma a pianta rettangolare; le superfici trasparenti possono essere più di una se sono a soffitto (lucernai). Deve essere invece unica la finestra se disposta su una delle quattro pareti verticali che delimitano l'ambiente. Essa dovrà occupare, a partire da 0.90m dal pavimento, tutta, la parte superiore della parete, fino al soffitto. La valutazione degli effetti dovuti alla presenza contemporanea di più superfici trasparenti si può effettuare sommando gli illuminamenti dovuti a ciascuna di esse.

Poiché il calcolo si basa su dati di tipo sperimentale opportunamente elaborati, esso è applicabile solo a particolari complessi strutturali e solo dopo un'attenta disamina delle caratteristiche del sistema nel suo complesso è possibile estenderne l'impiego ad una gamma più ampia di tipologie edilizie.

Quadro normativo vigente

Nella legislazione vigente, non esiste una vera e propria norma che tratti esclusivamente sistemi di illuminamento naturale per ambienti confinati, ad eccezione della UNI 10840 (rev. 2007) relativa

agli ambienti scolastici. Esistono comunque riferimenti legati a requisiti di sicurezza e di benessere che devono essere presi in considerazione presenti nella più generale UNI EN 12464-1, recentemente in fase di revisione, e in una serie di indicazioni a livello regionale, ovvero in decreti in cui si esplicita l'importanza dell'impiego della luce naturale (ad es. D.L. 19 settembre 1994, n°626, G.U. 12-11-1994, n° 265-suppl.), senza però scendere in dettagli più specifici. Come riferimento , si riporta uno stralcio del D.P.R. 19 marzo 1956, n°303, ormai decisamente datato ma a tutt'oggi valido, in cui si dispone che "...a meno che non sia richiesto diversamente dalle necessità delle lavorazioni, i luoghi di lavoro devono disporre di sufficiente illuminazione naturale... al fine di salvaguardare la sicurezza, la salute e il benessere degli operatori".

Capitolo 2

Analisi numerica

Introduzione

La complessità dei calcoli richiesti per la valutazione dell'illuminamento naturale in ambienti confinati ha incentivato l'uso di programmi di calcolo automatico che risulta la soluzione più idonea per la verifica della qualità dell'ambiente luminoso nella fase di progetto. Negli ultimi anni sono stati sviluppati numerosi programmi di calcolo automatico per la valutazione dell'illuminazione. In molti casi si tratta di programmi di calcolo che valutano non solo l'illuminazione naturale ma anche quella artificiale, fornendo al progettista la possibilità di simulare l'ambiente tenendo conto della loro integrazione.

I software impiegati per il calcolo della luce naturale sono in parte self produced, in parte software diffusi riconosciuti dalla comunità scientifica internazionale. Di seguito vengono pertanto presentati i programmi utilizzati per l'analisi e successivamente vengono illustrate le caratteristiche del sistema simulato.

PMSOL

È un modulo appositamente sviluppato, non presente in software diffusi. Il suo compito è quello di calcolare, a partire dai valori della radiazione diretta e diffusa al suolo per singolo mese (sono dati medi riferiti al giorno medio mensile) come dati di ingresso, e avendo stabilito il coefficiente di riflessione del suolo e la latitudine del sito in esame, gli angoli di altezza ed azimut solare, l'angolo di incidenza della radiazione, le componenti di radiazione diretta, diffusa e riflessa, e di conseguenza il contributo complessivo, per ciascuna orientazione (S, N, E, W), ed infine la potenza entrante in ambiente per m^2 di superficie trasparente per effetto della radiazione calcolata.

Alcuni dei dati di output (gli angoli di altezza ed azimut solare), vengono utilizzati come dati di input per il programma SUPERLITE.

SUPERLITE

Il Lawrence Berkeley Laboratory dell'Università della California ha sviluppato un programma di calcolo denominato SUPERLITE, in una prima versione del gennaio 1985 e nell'ultima versione del marzo 1994, basato sulla teoria dello scambio termico radiativo in cavità, metodo denominato "Flux Transfer". Il metodo consiste nel suddividere ciascuna superficie all'interno dell'ambiente in elementi più piccoli, ipotizzati a luminanza uniforme, definendo per ogni elemento l'equazione di bilancio del flusso luminoso e ottenendo un sistema di equazioni lineari indipendenti.

I dati d'ingresso possono essere inseriti sia con unità di misura americane, sia con il SI. Gli input necessari sono:

- descrizione accurata della stanza, in termini di dimensioni (altezza, larghezza, profondità), orientamento (della superficie trasparente in riferimento all'orientazione Sud) e posizione (altezza del pavimento della stanza rispetto al suolo), numero e posizione delle superfici trasparenti, presenza di sistemi di elementi illuminanti;

- analisi della superficie trasparente e dei componenti ad essa correlati, per dimensione (altezza e larghezza), posizione rispetto alla parete, discretizzazione (numero di nodi nelle due direzioni), coefficiente di riflettanza, tipo (da finestra chiara semplice a finestra schermata da tendaggi), manutenzione, trasmittanza (viene richiesto il valore per incidenza normale alla superficie), presenza di un'eventuale sporgenza rispetto alla superficie della parete esterna e/o di aggetti, con opportuna descrizione delle caratteristiche dell'elemento (tipo, trasmittanza, riflettanza, distanza dall'elemento trasparente, lunghezza), caratterizzazione dei tendaggi (coefficiente di trasmissione della componente diretta);
- descrizione dettagliata delle superfici opache della stanza (mura, soffitto, pavimento), in termini di discretizzazione (numero di nodi nelle due direzioni principali) e riflettanza;
- caratterizzazione della superficie di lavoro (altezza rispetto al pavimento), e sua discretizzazione;
- analisi degli elementi illuminanti (se presenti) per posizione all'interno dell'ambiente, dimensione e tipo;
- analisi di eventuali ostruzioni esterne (con conseguente descrizione), e/o interriflessione tra edificio e suolo;
- descrizione delle caratteristiche dell'edificio, in termini di dimensioni e riflettanza delle superfici esterne;
- caratterizzazione della disponibilità di illuminazione naturale, in termini di irradiazione solare diretta e diffusa su piano orizzontale (in W/m^2), efficienza luminosa delle due componenti (in lumen/W), condizioni atmosferiche relative alla copertura del cielo (da cielo coperto con eliminazione della componente diretta, a cielo sereno), riflettanza media del suolo;
- posizione del Sole (altezza ed azimut solare).

Questo sistema di calcolo consente anche altre descrizioni dei dati atmosferici, che risultano in genere più complessi; d'altronde, l'utilizzo dei dati ottenuti mediante l'applicazione del programma presentato precedentemente (PMSOL) permette una caratterizzazione ed un'analisi più sintetica ed efficace.

Gli output forniti sono costituiti da una matrice di valori di illuminamento totale (variando i dati di ingresso, anche diffuso) nei nodi della stanza indicati precedentemente, distribuiti sul piano di lavoro (quindi ad un'altezza definita). Altri valori forniti dal programma sono la componente diretta e diffusa dell'illuminamento naturale ed artificiale, ed il daylight factor, cioè il rapporto tra l'illuminamento istantaneo su un piano orizzontale in un punto dell'ambiente confinato e l'illuminamento esterno nello stesso momento con un cielo completamente sereno.

Radiance

Software disponibile gratuitamente, molto utilizzato, ha la possibilità di essere integrato ad altri software o di essere utilizzato indipendentemente.

Radiance è progettato per essere uno strumento di ricerca in grado di fornire calcoli accurati e previsioni affidabili degli effetti della luce e usa principalmente tecniche di Monte Carlo backward ray tracing.

Piuttosto che fornire semplicemente un motore di rendering fotorealistico, Radiance incorpora una serie di strumenti in grado di ottenere risultati numerici, in modo da mettere in grado il ricercatore o il progettista di misurare, simulare e progettare reali configurazioni di illuminazione.

Il risultato finale da un punto di vista fotometrico è accettabile e soprattutto affidabile, ed è stato oggetto di estese campagne di validazione in modo da assicurare che i valori di luminanza ed i livelli di illuminamento calcolati dal programma siano accurati in relazione all'ambiente reale per condizioni di illuminazione sia naturale che artificiale. Radiance è basato su di un algoritmo di backward ray tracing, in base al quale i raggi luminosi sono tracciati nella direzione opposta rispetto a quella che seguono solitamente: a partire dall'occhio dell'osservatore (il punto di vista) i raggi vengono tracciati sino alle sorgenti luminose rimbalzando tra le superfici presenti nell'ambiente e tenendo conto dei fenomeni di riflessione, trasmissione e rifrazione. In maniera del tutto innovativa, Radiance opera anche il calcolo delle inter-riflessioni tramite ray tracing stocastico.

La grande versatilità e precisione di Radiance è però in contrasto con un notevole livello di complessità d'uso.

Ambiente simulato

L'ambiente oggetto delle simulazioni e a cui fa riferimento il modello sia per la fase di calcolo analitica che per quella sperimentale, non è una struttura isolata ma appartiene ad un edificio complesso adibito ad uso ufficio e collocato al terzo piano.

Si è scelto un ambiente a pianta rettangolare con due dimensioni fisse (5x3m), e la terza dimensione variabile in un range tra i 4 ed i 9 metri. La parete con dimensioni fisse, che è anche l'unica parete esterna, è quella che fa da supporto alla superficie trasparente (finestra); nello studio effettuato, si sono prese in considerazione diverse geometrie dell'elemento vetrato, mantenendo la sua altezza a 2 metri e variando la sua lunghezza, con passo 1, da 2 fino a 5 metri. È stata prevista la presenza di un davanzale alto 1m e la parete in cui è inserita la finestra non viene ombreggiata da ostacoli esterni. La finestra è costituita da una lastra di vetro semplice con coefficiente di trasmittanza pari a 0.86 e riflettanza pari a 0.08. Le mura e il soffitto dell'ambiente hanno tutti coefficiente di riflettanza pari a 0.65 mentre per il pavimento il valore della stessa è pari a 0.3. Per una generalizzazione ulteriore del sistema sono state considerate le quattro esposizioni principali per la parete esterna (S, N, W, E). L'efficienza luminosa della radiazione solare diretta è stata assunta pari a 117 lumen/W, mentre per quella diffusa 125 lumen/W.

Simulazioni

Per effettuare l'analisi illuminotecnica del sistema, si è ricorsi ad una modellizzazione mediante l'uso dei programmi di calcolo:

- PMSOL;
- SUPERLITE;
- RADIANCE.

Le caratteristiche dell'ambiente simulato sono evidentemente le stesse del modello in scala ricostruito ad hoc. Il modello simulato è stato inserito in un edificio al terzo piano, secondo le ipotesi imposte, mentre il modello in scala è un ambiente non integrato in una struttura complessa, ma isolato (una stanza poggiata per terra), seppur in ambiente posto ad altezza propria di un terzo piano.

La simulazione con l'applicazione del calcolatore è stata effettuata con valori orari di irraggiamento derivati dai dati disponibili in letteratura. Successivamente, si sono eseguite simulazioni con valori orari di irraggiamento derivati direttamente dalle misure effettuate (vedi Cap. 3, Analisi sperimentale) in modo da consentire il confronto dei risultati ottenuti, e validare l'intera metodologia proposta. Di seguito, per semplicità, sono riportati alcuni dei risultati delle simulazioni relative agli stessi casi affrontati nelle sessioni di misura sperimentale. I parametri che sono stati fatti variare e sono rappresentati nelle seguenti Figure (Fig. 2.1-18) sono esposizione, dimensione della finestra, dimensione dell'ambiente. Il mese di riferimento per le simulazioni qui presentate è febbraio.

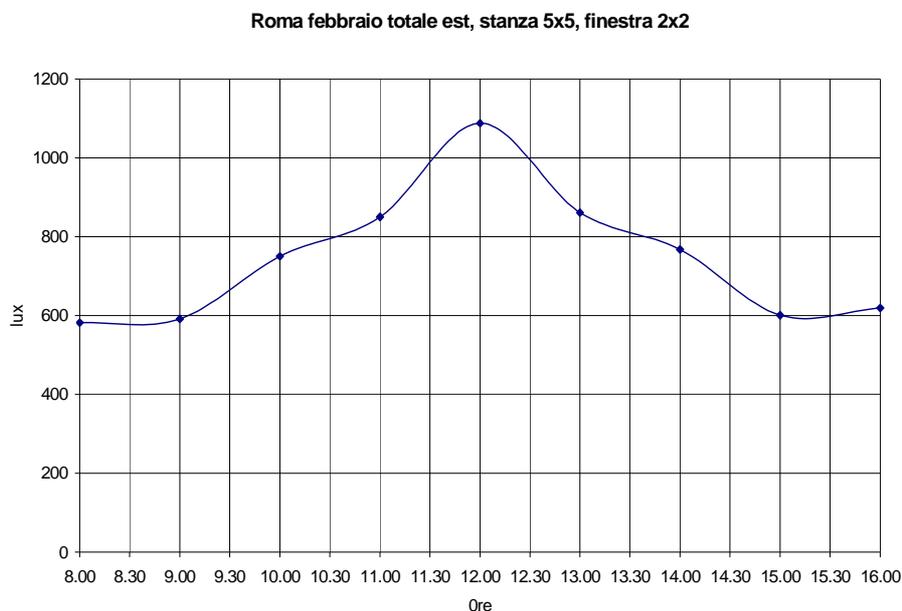


Figura 2.1. Esposizione Est, stanza 5x5, finestra 2x2

Roma febbraio totale est, stanza 5x5 finestra 3x2

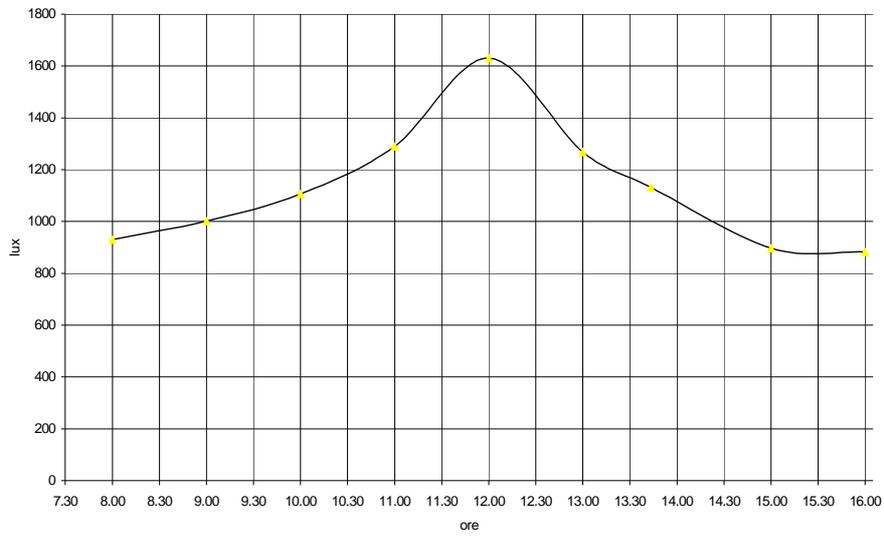


Figura 2.2. Esposizione Est, stanza 5x5, finestra 3x2

Roma febbraio totale est, stanza 5x7 finestra 2x2

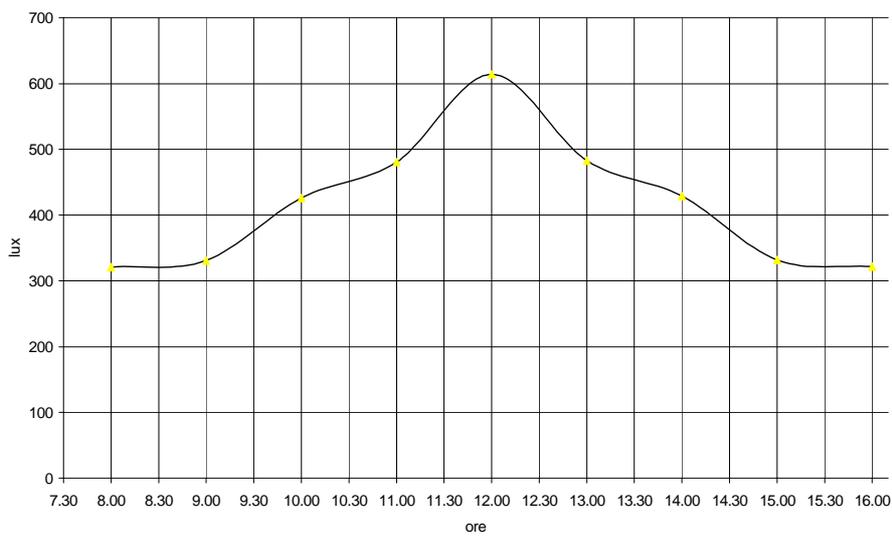


Figura 2.3. Esposizione Est, stanza 5x7, finestra 2x2

Roma febbraio totale est, stanza 5x7 finestra 3x2

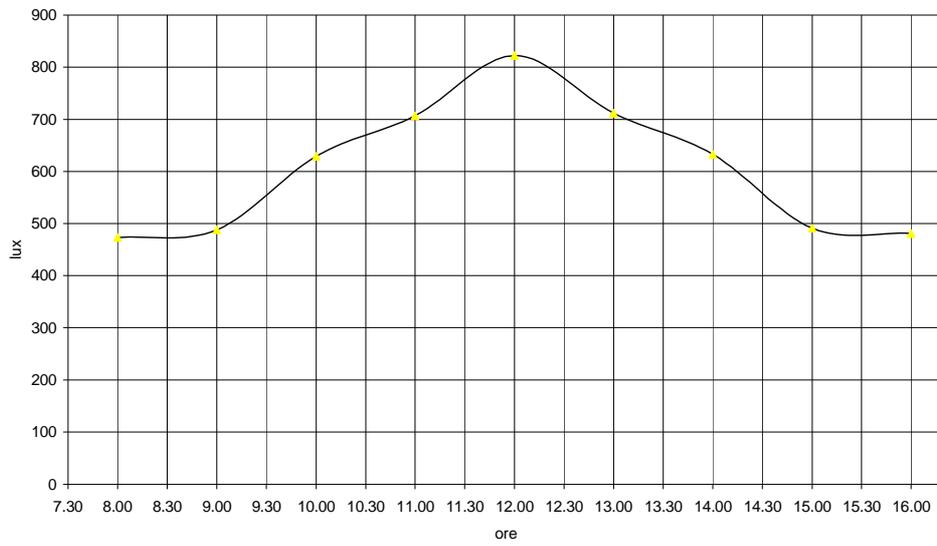


Figura 2.4. Esposizione Est, stanza 5x7, finestra 3x2

Roma febbraio totale est, stanza 5x5 finestra 5x2

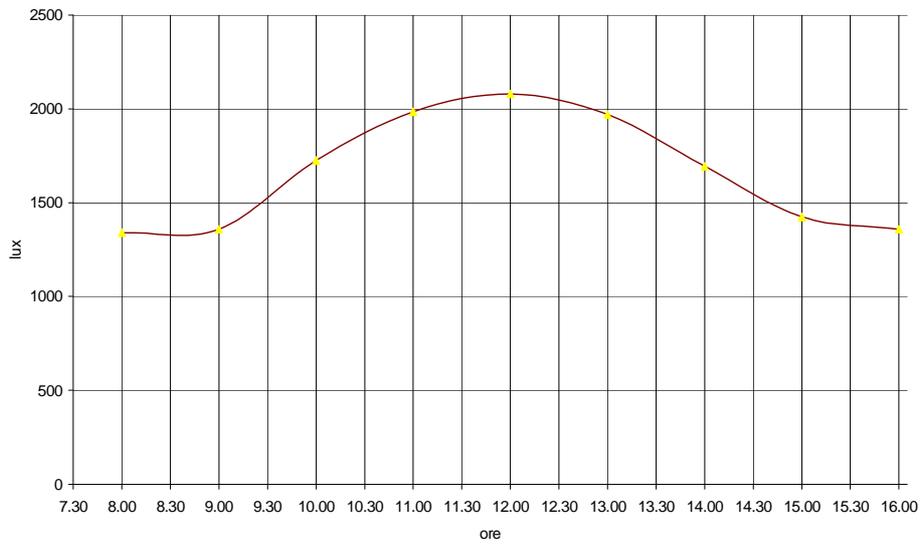


Figura 2.5. Esposizione Est, stanza 5x5, finestra 5x2

Roma febbraio totale est, stanza 5x7 finestra 5x2

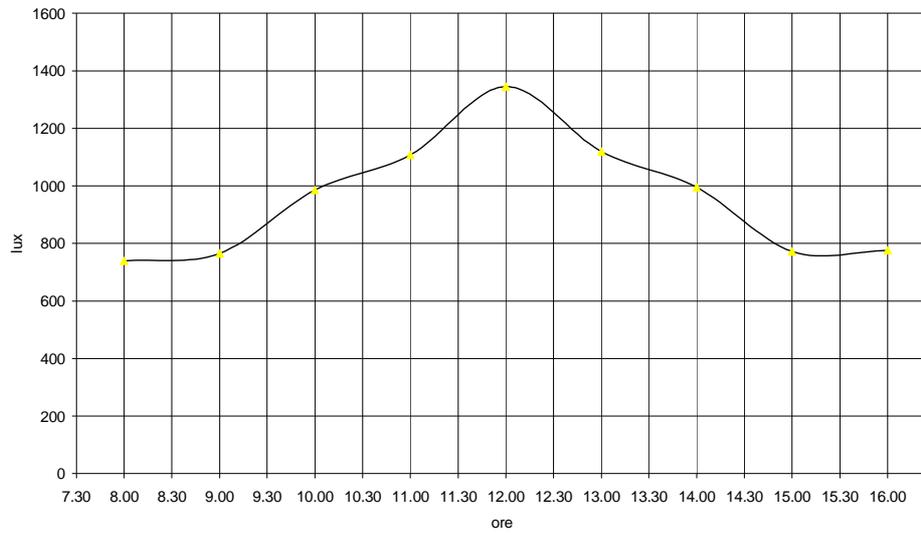


Figura 2.6. Esposizione Est, stanza 5x7, finestra 5x2

Roma febbraio totale est, stanza 5x9 finestra 2x2

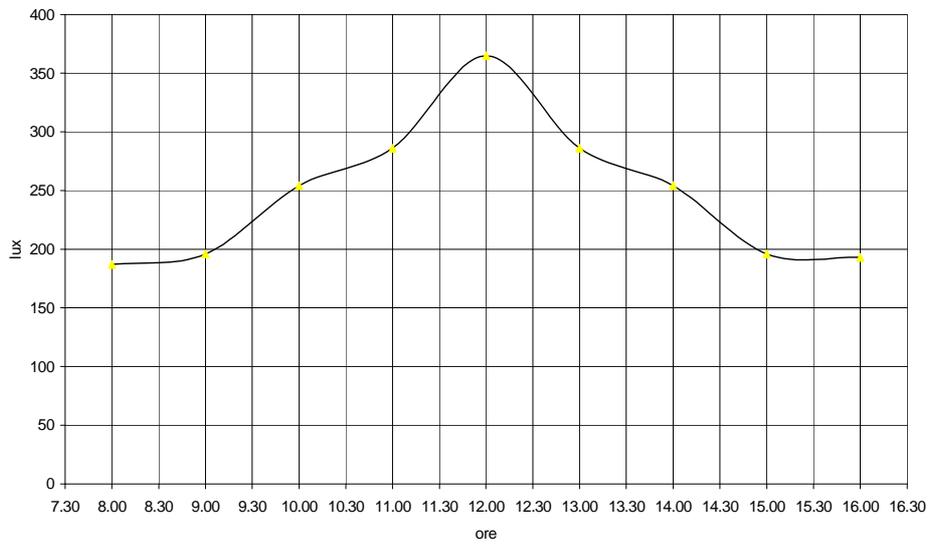


Figura 2.7. Esposizione Est, stanza 5x9, finestra 2x2

Roma febbraio totale est, stanza 5x9 finestra 3x2

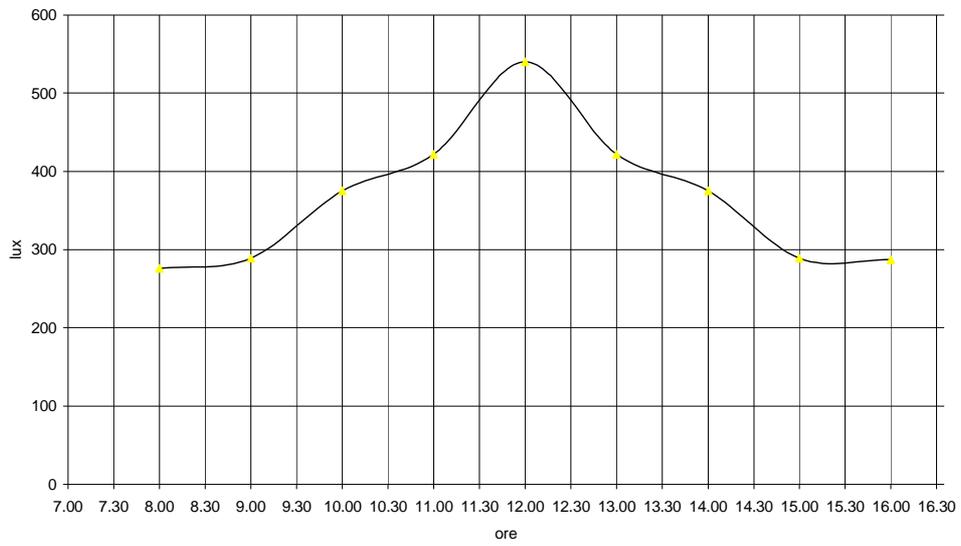


Figura 2.8. Esposizione Est, stanza 5x9, finestra 3x2

Roma febbraio totale est, stanza 5x9 finestra 5x2

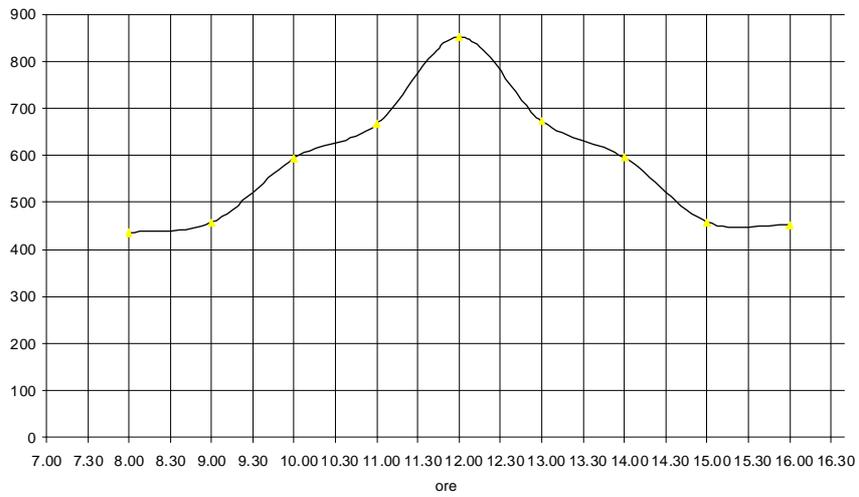


Figura 2.9. Esposizione Est, stanza 5x9, finestra 5x2

Roma febbraio totale sud, stanza 5x5, finestra 2x2

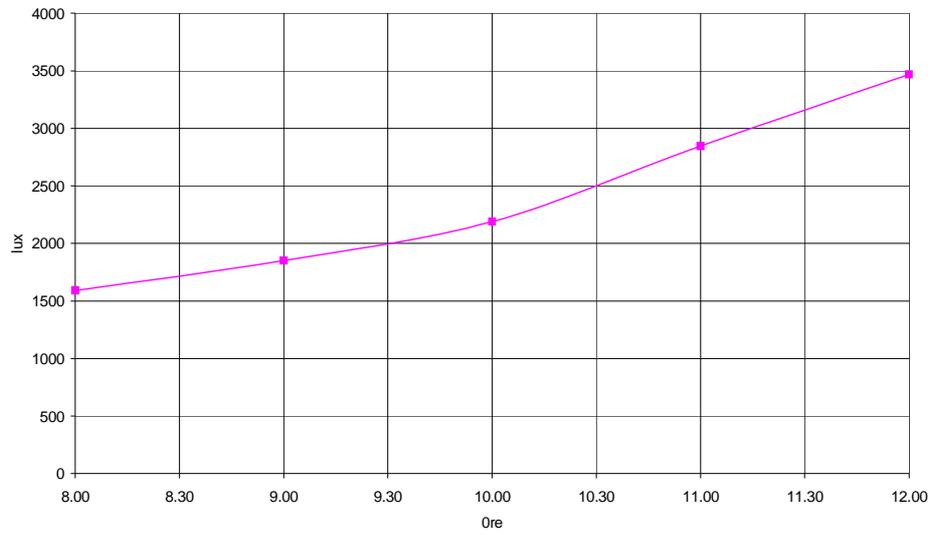


Figura 2.10. Esposizione Sud, stanza 5x5, finestra 2x2

Roma febbraio totale sud, stanza 5x5 finestra 3x2

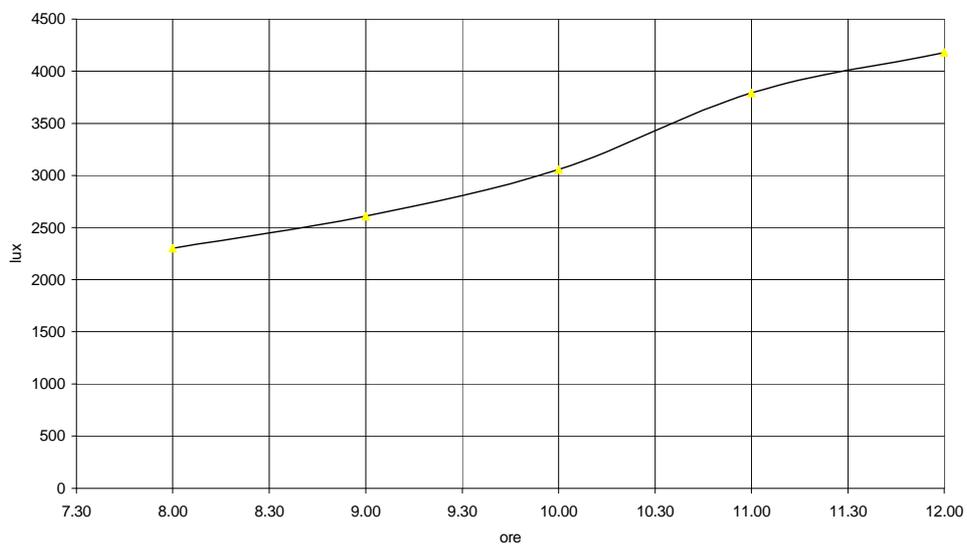


Figura 2.11. Esposizione Sud, stanza 5x5, finestra 3x2

Roma febbraio totale sud, stanza 5x7 finestra 2x2

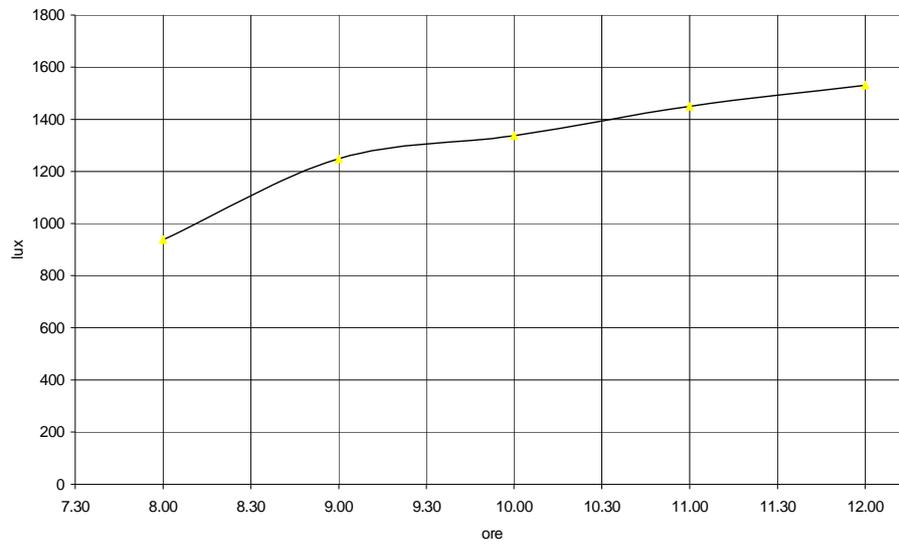


Figura 2.12. Esposizione Sud, stanza 5x7, finestra 2x2

Roma febbraio totale sud, stanza 5x7 finestra 3x2

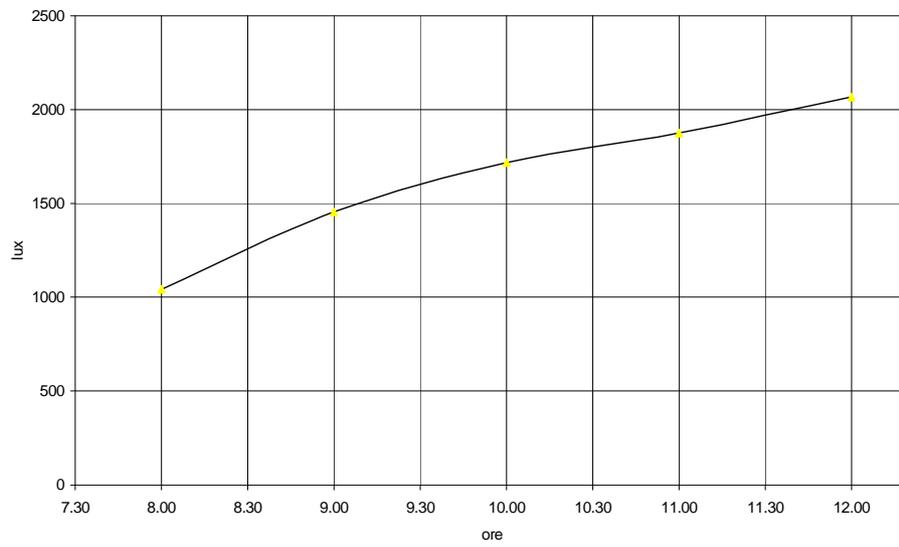


Figura 2.13. Esposizione Sud, stanza 5x7, finestra 3x2

Roma febbraio totale sud, stanza 5x5 finestra 5x2

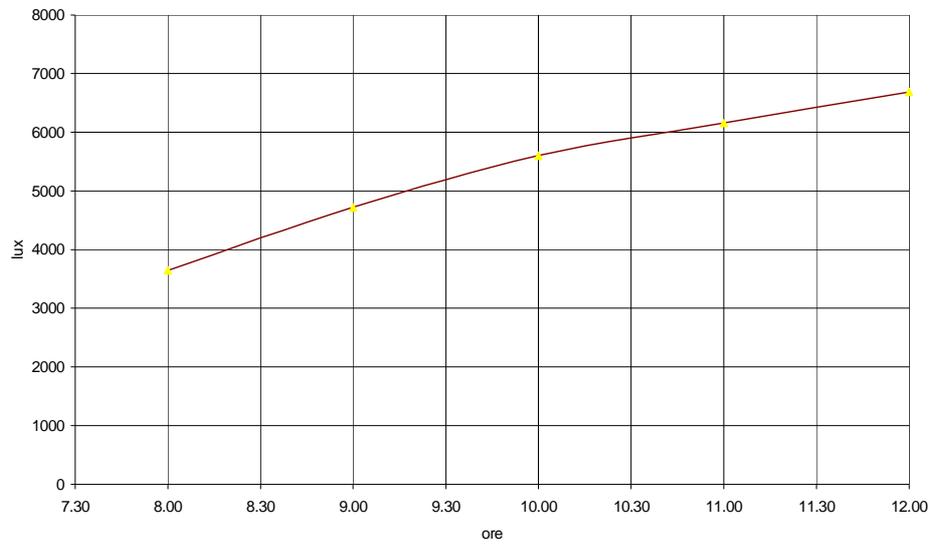


Figura 2.14. Esposizione Sud, stanza 5x5, finestra 5x2

Roma febbraio totale sud, stanza 5x9 finestra 2x2

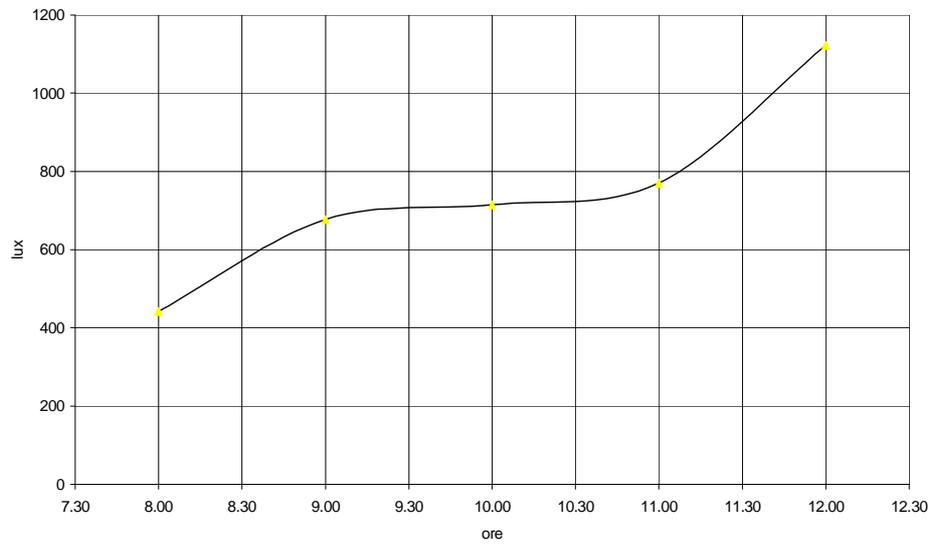


Figura 2.15. Esposizione Sud, stanza 5x9, finestra 2x2

Roma febbraio totale sud, stanza 5x9 finestra 5x2

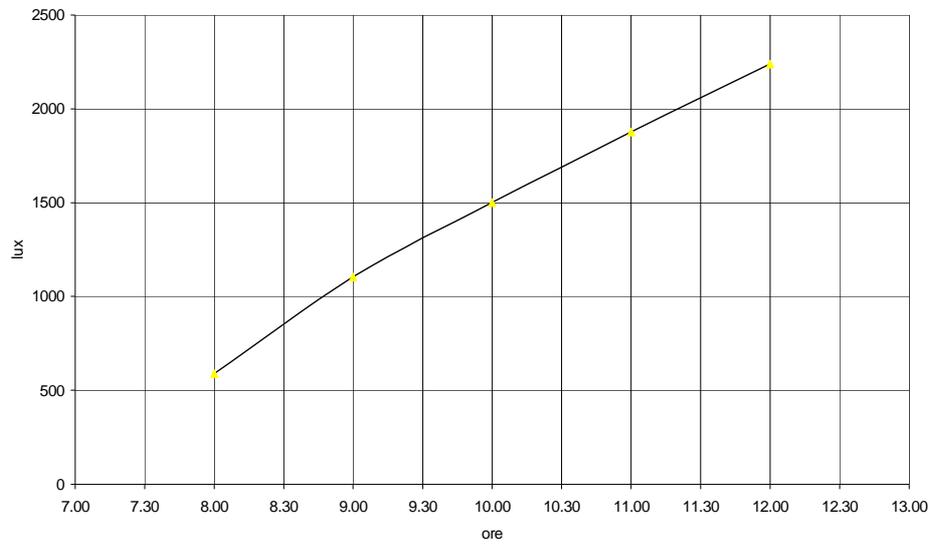


Figura 2.16. Esposizione Sud, stanza 5x9, finestra 5x2

Roma febbraio totale sud, stanza 5x7 finestra 5x2

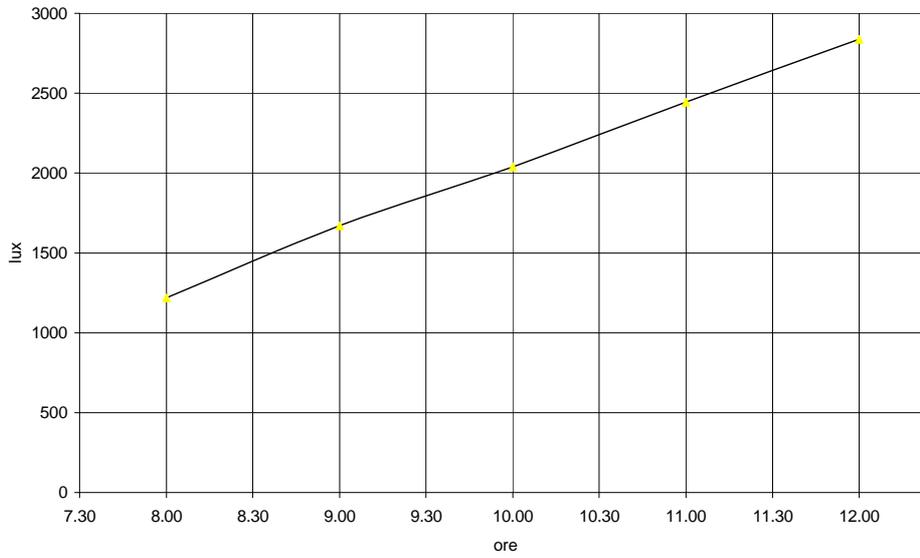


Figura 2.17. Esposizione Sud, stanza 5x7, finestra 5x2

Roma febbraio totale sud, stanza 5x9 finestra 3x2

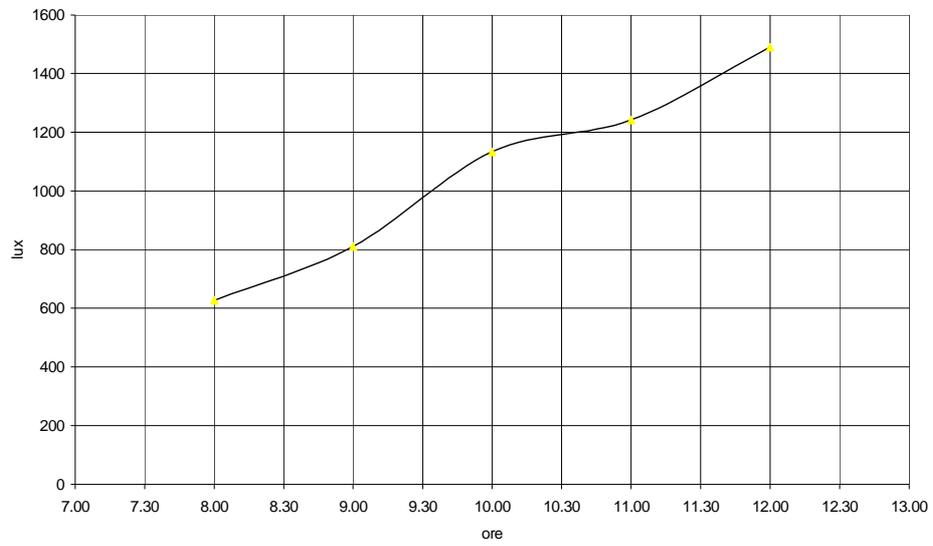


Figura 2.18. Esposizione Sud, stanza 5x9, finestra 3x2

Capitolo 3

Analisi sperimentale

Introduzione

Per effettuare la verifica sperimentale necessaria a validare il risultato ottenuto per via numerica, è stato necessario ricorrere alla realizzazione di un modello che rappresentasse le caratteristiche degli ambienti presi in esame nella fase di calcolo.

La scelta di utilizzare un modello è stata dettata dalla pratica impossibilità di individuare un ambiente confinato con caratteristiche utili alla sperimentazione; la necessità di poter disporre di un ambiente con volumi differenti e finestre di dimensioni diverse, situato ad una certa latitudine e, soprattutto, che avesse la parete esterna (ovvero quella trasparente) orientata, per ogni gruppo di misure, secondo un'esposizione differente, sono stati i motivi che hanno spinto alla scelta di costruire un modello fisico in scala che rappresentasse la generica situazione reale.

Teoria sui modelli fisici in scala

L'analisi, qualitativa e quantitativa, della distribuzione della luce naturale in modelli in scala costituisce uno strumento molto efficace per la comprensione del fenomeno e la progettazione di ambienti efficienti.

A differenza di quanto avviene con altri fenomeni fisici (quali l'acustica, la trasmissione del calore, la fluidodinamica), lo studio su modelli di dimensione sensibilmente minore (tipicamente 20-50 volte) rispetto alla realtà modellata non comporta problemi o esigenze di operare con fattori correttivi. Le lunghezze d'onda dell'energia radiante in gioco (10^{-7} m) sono talmente più piccole delle dimensioni caratteristiche del modello (dell'ordine del metro), che i fenomeni di riflessione e rifrazione che si possono osservare nel modello sono del tutto simili (Fanchiotti, 1996). Ne consegue che le conclusioni derivabili dall'osservazione di un modello sono immediatamente riferibili al caso simulato con tutti i vantaggi di poter operare lo studio delle caratteristiche d'interesse senza la necessità di costruire la struttura reale.

L'efficacia dei modelli in scala risulta particolarmente evidente nel caso di geometrie complesse (aperture dalle forme singolari, superfici non piane, ecc.), che modelli e codici di simulazione numerica riescono a simulare con difficoltà, a meno che non si tratti di prodotti molto complessi (e spesso applicabili solo a casi specifici) e sofisticati che richiedono un impiego di tempo e risorse non indifferente.

Per quanto riguarda la scelta della scala (M. Navvab, 2000) si possono seguire le seguenti indicazioni:

- da 1:1000 a 1:250 per studi su scala urbana;
- da 1:20 a 1:15 per la simulazione di ambienti di dimensioni da medie a grandi;
- 1:10 per progetti a livello esecutivo di ambienti da modellare in dettaglio.

La scelta della scala è vincolata a due condizioni limitative: la prima indica che il modello non può avere dimensioni troppo limitate a causa del fatto che i sistemi di misura dell'illuminamento hanno delle dimensioni fisiche (1-3cm) che potrebbero, se trascurate, influire negativamente sulle misure

rilevate; la seconda ipotesi, che non rientra comunque nel caso del modello che verrà utilizzato nella fase sperimentale, limita le dimensioni massime del modello poiché un sovradimensionamento di questo comporta un maggiore errore nel caso in cui si stiano effettuando delle misure in condizioni di cielo simulato in laboratorio.

Un aspetto di rilevante importanza è quello del coefficiente di riflessione delle superfici interne: quando non sia possibile o conveniente utilizzare gli stessi materiali o rivestimenti del caso reale, è necessario che il modello riproduca il più fedelmente possibile tali caratteristiche.

Altra considerazione da fare è quella relativa alla possibile influenza negativa del coefficiente di riflessione del terreno sulla fase di sperimentazione: la riflessione del terreno circostante può alterare la simulazione quando la piattaforma su cui poggia il modello viene inclinata per simulare periodi dell'anno differenti o diverse latitudini (Fig. 3.1).

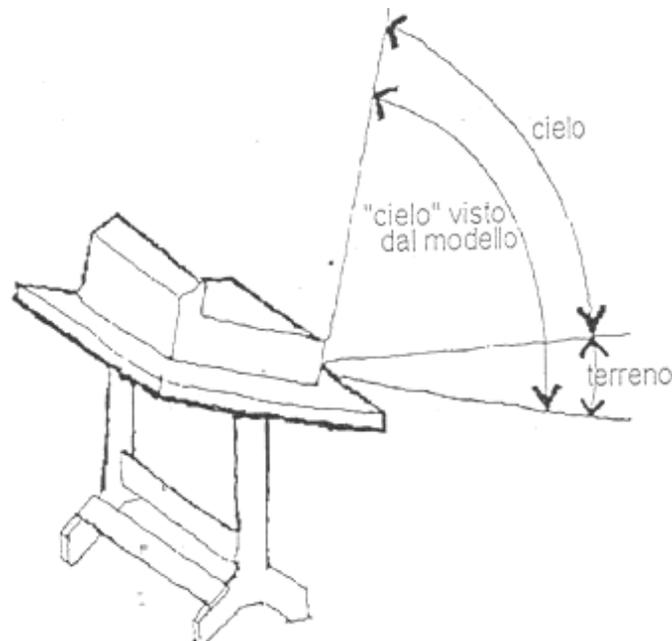


Figura 3.1. Errore introdotto dall'inclinazione del piano di appoggio di modelli in scala per simulare stagioni e latitudini diverse.

In questo caso la simulazione può essere in difetto, se le aperture sono sul lato inclinato verso il terreno, o in eccesso, se sono sul lato opposto. L'errore risulta comunque contenuto se il terreno ha un coefficiente di riflessione elevato ed è esposto alla radiazione diretta, perché in tal caso la luminanza del cielo e del terreno risulterebbero simili. Inoltre, se l'angolo d'incidenza dei raggi luminosi provenienti dalla sorgente principale è inferiore a 60° , e se il vetro della finestra è di tipo chiaro, conviene non utilizzarlo per evitare indesiderati effetti di bordo difficilmente valutabili causati dallo spessore della lastra trasparente rispetto alle dimensioni del modello (difficilmente si può infatti rispettare la scala per questi elementi).

Modello utilizzato

Alla luce delle considerazioni fatte, per la fase sperimentale è stato utilizzato un modello di ambiente in scala.

Avendo scelto di analizzare il comportamento dell'illuminamento naturale in ambienti confinati di diverse dimensioni e con finestre variabili nella superficie, è stato progettato un modello con una superficie mobile con cui poter variare la cubatura del sistema. Il modello è stato costruito in scala 1:5 in modo da poter simulare ambienti di dimensione variabile da 5x3x4m a 5x3x9m con sufficiente precisione, senza che le rilevazioni potessero risentire delle dimensioni relative delle

teste fotometriche utilizzate per il rilevamento. Anche la superficie vetrata (vetro chiaro) è stata dimensionata in modo tale da poter rientrare in tutta la casistica necessaria per le prove: per questo elemento si passa da una dimensione massima, in scala, di 5x2m fino a 2x2m oscurando, mediante l'uso di pannelli opportuni, la superficie del vetro a seconda delle necessità.

Realizzazione del modello

Prima di iniziare la fase di progettazione e realizzazione del modello, si è ritenuto opportuno individuare il sito più adatto al posizionamento dello stesso per effettuare la sperimentazione: trattandosi infatti di un elemento che fuori tutto misura oltre 2x1x0,70 metri (scala 1:5), ci si è dovuti garantire dal rischio di sovradimensionamento rispetto a strutture come scale, ascensori, porte. Si è scelto di posizionare il modello sul solaio di copertura della palazzina del dipartimento di Meccanica ed Aeronautica, che per l'assenza di elementi architettonici circostanti (gli edifici limitrofi hanno tutti un'altezza minore e quindi non comportano nessun tipo di riflessione o di ostruzione) è risultato essere adatto allo scopo (Fig. 3.2-3).





Figura 3.2-3. Localizzazione della area per la sistemazione del modello in scala

La struttura del modello è stata realizzata con profili metallici ad L (Safim) serrati mediante bullonatura; per unire i diversi moduli è stato utilizzato un sistema di attacchi a flangia sui fianchi esterni del sistema al fine di evitare di modificare le superfici interne rispetto al caso reale cui si è fatto riferimento. Con gli stessi profili metallici è stato realizzato un supporto rigido per il vetro e mediante l'utilizzo di inserti in plastica e guarnizioni in silicone sono state consentite le deformazioni per effetti termici ed è stata prevista una guida per permettere di inserire e posizionare gli elementi atti a variare le dimensioni della finestra. Per rendere mobile la parete posteriore della stanza, e modificarne di conseguenza la cubatura, è stato realizzato un telaio metallico con due supporti, che consentono allo stesso di scorrere su guide metalliche posizionate sui fianchi interni della struttura. Le sonde sono state fissate, mediante supporti regolabili, al sistema appena descritto. L'intera struttura è stata rivestita con pannelli sagomati di compensato (spessore di 6mm per evitare fenomeni di inflessione); le superfici interne hanno subito due trattamenti: è stato applicato uno strato di cementite per preparare la superficie e successivamente sono state trattate con due strati di vernice il cui colore è stato ottenuto dalla miscela di più tonalità, al fine di raggiungere le caratteristiche di riflessione necessarie alla sperimentazione. Sono stati colorati tutti i supporti interni, quelli delle sonde, e le guide della parete posteriore.

Per assicurare la tenuta della parete posteriore rispetto a possibili rientri di luce dovuti allo scarto, necessario al movimento, tra le dimensioni di questa quelle della stanza, è stato approntato un sistema di guarnizioni in gomma (verniciate nella parte interna) (Fig. 3.4-10).



Figura 3.4. Modulo 1: vista anteriore



Figura 3.5. Modulo 1: vista posteriore



Figura 3.6. Modulo 2: vista anteriore



Figura 3.7. Modulo 3: vista anteriore



Figura 3.8. Parete scorrevole: vista anteriore senza sonde



Figura 3.9. Parete scorrevole: vista della struttura del telaio



Figura 3.10. Vista d'insieme

Strumentazione utilizzata

Per il rilevamento delle grandezze e delle misure utili all'analisi del comportamento del sistema sono stati utilizzati una serie di strumenti di cui si riporta una breve descrizione:

BABUC ABC: acquirente di dati provenienti da sonde; gli ingressi sono in grado di ricevere un'ampia gamma di segnali, adattando automaticamente i propri circuiti logico-elettronici alle necessità del tipo fisico del segnale proveniente dal sensore connesso. Gli ingressi vengono singolarmente configurati per il tipo di segnale, per il significato e l'ingegnerizzazione da attribuire alla grandezza. All'acquirente è stato collegato un personal computer portatile per registrare i risultati su file Excel e per gestire il sistema di misura (Fig. 3.11).



Figura 3.11. BABUC con PC portatile

SONDE: per l'analisi ne è stato necessario l'uso di diversi tipi:

1. sonda luxmetrica CIE 0-25000 lux con tolleranza $\pm 1.5\%$ sul valore letto (± 2 lux (cod. BSR001)), campo di misura 0-300 mV, segnale analogico lineare, correzione del coseno;
2. sonda luxmetrica CIE 5-100000 lux con tolleranza $\pm 1.5\%$ sul valore letto (± 10 lux (cod. BSR003)), campo di misura 0-300 mV, segnale analogico lineare, correzione del coseno;
3. sonda per la misura della radiazione globale, 0-1500 W/m² con tolleranza 5% sul valore letto ± 5 W/m², sensibilità spettrale 300-1000nm, senza correzione del coseno.

Sono state utilizzate tre sonde di tipo 1, distribuite sul piano di lavoro del modello nel modo indicato in Fig. 3.12-13:



Figura 3.12. Posizionamento sonde di tipo 1



Figura 3.13. Posizionamento sonde di tipo 1

Queste sonde hanno la funzione di rilevare l'illuminamento all'interno dell'ambiente confinato: il loro posizionamento è stato previsto come indicato per avere la possibilità di muovere la parete posteriore del modello al fine di simulare diversi esempi di cubatura necessari alla sperimentazione. È stata utilizzata una sonda di tipo 2 (Fig. 3.14), posizionata all'esterno del modello, lontano da superfici che potessero influire su una corretta rilevazione dei dati.



Figura 3.14. Sonda di tipo 2

State utilizzate due sonde del tipo 3, posizionate con una struttura di supporto che ha la funzionalità di riparare il sensore dall'illuminamento diretto del Sole, al fine di ottenere i valori della componente di radiazione sia totale che diffusa e quindi, dalla loro differenza, quelli della componente diretta; in Fig. 3.15-16 è rappresentato lo schema di montaggio:

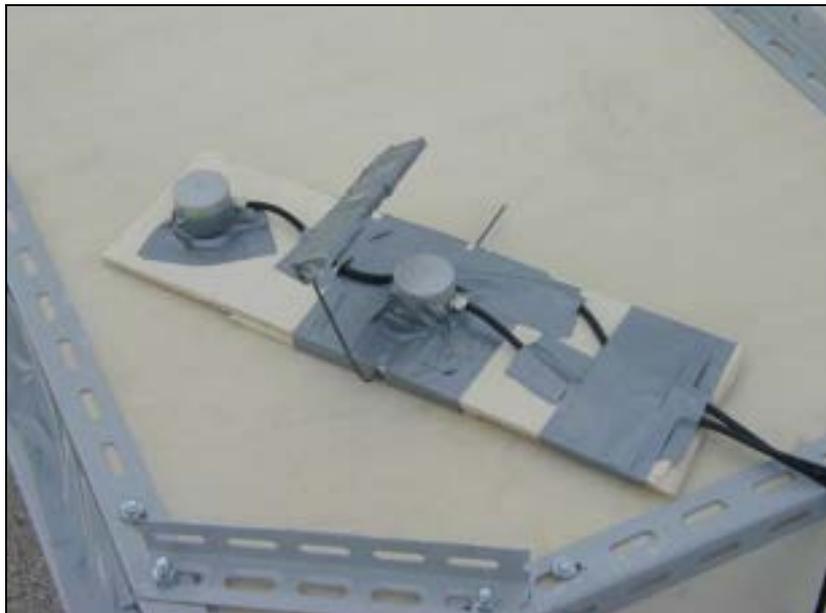




Figura 3.15-16. Sonde per la misura di radiazione diffusa e globale

Nelle Fig. 3.17-19, viene mostrato il modello nel suo insieme e la disposizione dei sistemi utilizzati per effettuare le misure sperimentali.



Figura 3.17. Modello e disposizione degli strumenti di misura



Figura 3.18. Modello e disposizione degli strumenti di misura



Figura 3.19. Modello e disposizione degli strumenti di misura

Teoria degli errori

Dovendo effettuare serie di misure, è necessario considerare il problema dell'attendibilità dei risultati ottenuti. L'esperienza ha dimostrato che nessuna misura, per quanto fatta con cura, può essere priva d'errori: assume quindi importanza fondamentale l'individuazione delle fonti di errore e dell'entità di questi.

Incertezza, valore medio, errore quadratico medio di una singola misura

Nel campo delle misure, l'errore è definibile come *incertezza*: quando si determina un risultato, è necessario fornire un'indicazione sull'incertezza della misura, cioè del *grado di approssimazione* della quantità misurata rispetto al valore atteso. Si definisce *incertezza relativa*, a , di una misura:

$$a = 1 - e = 1 - \left| \frac{x - x_0}{x_0} \right|$$

con: x = valore misurato

x_0 = valore vero.

La precisione di uno strumento, viene fornita dal costruttore mediante un indice di classe C che prende il nome di *classe di precisione* e rappresenta l'errore massimo percentuale relativo all'indicazione di fondo scala. L'errore relativo indicato in funzione dell'indice di classe C , assume la seguente espressione:

$$e = \frac{C}{100} \cdot \frac{\delta_{fs}}{\delta}$$

dove δ e δ_{fs} rappresentano rispettivamente la generica indicazione e quella di fondo scala; da quest'equazione si evince che per ridurre l'errore di indicazione lo strumento va utilizzato quanto più possibile verso il fondo scala.

Si definisce *valore medio* \bar{x} di una grandezza G misurata n volte la media aritmetica del valore di n misure:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Il valore medio "vero" \bar{x}_0 è quello che risulterebbe misurando la grandezza G un numero infinito di volte. Per conoscere come sono distribuiti i valori delle misure attorno al valore medio si definisce *scarto* della i -esima misura la differenza tra il valore x_i ed il valore medio:

$$\xi_i = x_i - \bar{x}$$

con $\sum_{i=1}^n \xi_i = 0$ e valore medio

$$\bar{\xi} = \frac{\sum_{i=1}^n \xi_i}{n} = 0$$

Si definisce *errore* differenza tra il valore x_i ed il valore vero x_0 :

$$\varepsilon_i = x_i - x_0$$

assoluto dell' i -esima misura la

Si definisce errore relativo la quantità:

$$\frac{\varepsilon_i}{x_0} = \varepsilon_r = \left| \frac{x_i - x_0}{x_0} \right|$$

Si definisce *errore medio* $\bar{\varepsilon}$ di una serie di misure la differenza tra il valore medio e quello vero:

$$\xi_i = x_i - \bar{x} = (x_i - x_0) - (x - x_0) = \varepsilon_i - \varepsilon$$

ossia lo scarto della i-esima misura è dato dalla differenza tra l'errore di tale misura e l'errore medio.

Si definisce *errore quadratico medio* di una serie di misure la radice quadrata della media dei quadrati degli errori:

$$\mu = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n}}$$

ovvero lo *scarto quadratico medio* $\mu = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \xi_i^2}{n-1}}$

che permette di esprimere l'errore quadratico medio in funzione di quantità note, le ξ_i , anziché di quantità sconosciute quali le ε_i . Quest'ultima relazione costituisce un indice di distribuzione dei valori delle singole misure attorno al valore medio. Il risultato di una serie di n misure (con n molto grande) si indicherà come:

$$x = \bar{x} \pm \mu = \bar{x} \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

L'intervallo $x - \mu$, $x + \mu$ è chiamato *intervallo di attendibilità* dei valori della serie di misure: al crescere di n, μ diminuisce, ovvero le singole misure risultano più addensate attorno al valor medio.

Curva di Gauss

Quando il numero di misure tende all'infinito, la loro distribuzione si avvicina ad una curva continua chiamata *distribuzione limite*; essa definisce una funzione $f(x)$ che descrive come dovrebbero essere distribuiti i risultati per la misura di una data grandezza e utilizzando una data apparecchiatura: la frazione di misure che cadono in qualunque intervallo compreso tra x e $x+dx$ è

uguale all'area $f(x)dx$ della striscia indicata in Fig. 3.20. Più in generale, il numero di misure che cadono tra 2 qualsiasi valori a e b è l'area totale sotto il grafico tra $x = a$ e $x = b$; quest'area è proprio l'integrale definito di $f(x)$ dove $f(x)dx$ rappresenta la probabilità che una singola misura di x dia un risultato compreso tra x e $x+dx$; tale funzione deve essere normalizzata, cioè l'integrale tra infiniti deve essere pari a 1.

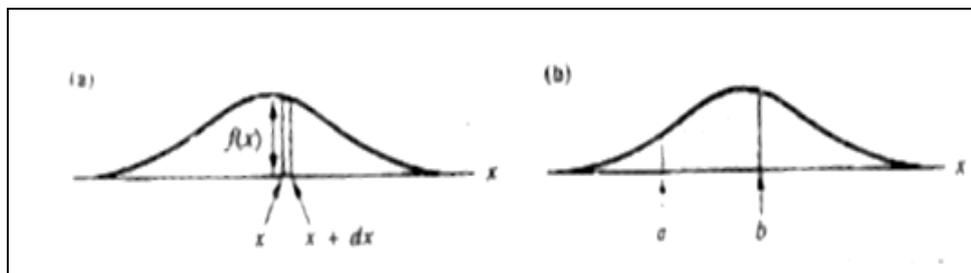


Figura 3.20. Distribuzione limite

Se le misure della grandezza sono soggette ad errori casuali ed a trascurabili errori sistematici, la loro distribuzione sarà una curva simmetrica a campana, centrata sul valore vero. La funzione matematica

$$e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$$

descrive la curva a campana ed è chiamata “distribuzione normale” o funzione di Gauss (Fig. 3.21) che però non è ancora nella sua forma finale perché deve essere normalizzata per descrivere una distribuzione limite e vale pertanto:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}$$

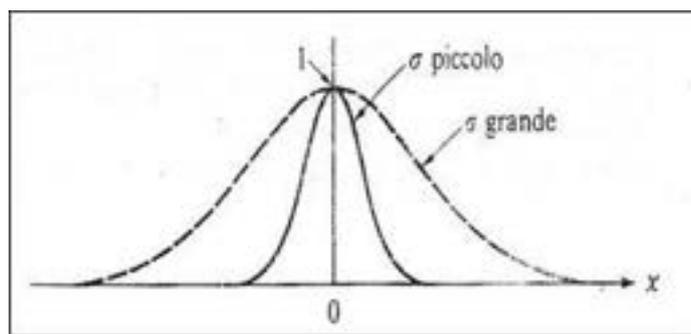


Figura 3.21. Funzione di Gauss a campana centrata su $x=0$

Dalla rappresentazione grafica della funzione si possono notare alcune caratteristiche:

- $f(x)$ è una funzione pari: la curva è simmetrica attorno al valore \bar{x} in corrispondenza del quale essa presenta il valore massimo (il valore medio di una distribuzione gaussiana è anche il più probabile);
- sostituendo $x = \bar{x}$ l'ordinata del massimo vale:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$$

σ può essere assunta come indice di precisione della distribuzione: minore è il suo valore, maggiore è la probabilità che una misura dia per risultato il valore medio.

La conoscenza della distribuzione limite permette di calcolare il valore medio \bar{x} dopo un gran numero di prove (al limite infinito) se la distribuzione limite è la distribuzione di Gauss centrata sul valore vero x_0 ; ma la sua utilità pratica è che se abbiamo a disposizione un numero di prove elevato ma finito la media \bar{x} tende al valore vero x_0 .

La probabilità che una misura possa trovarsi nell'intervallo $x - \sigma$ e $x + \sigma$ è data dall'integrale:

$$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{\bar{x}-\sigma}^{\bar{x}+\sigma} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} dx$$

definito "funzione degli errori" i cui valori sono riportati in una tabella e per $\bar{x} \pm \sigma$ vale 0.683, cioè la probabilità che ha una misura di scartare da \bar{x} per meno di σ è del 68.3%.

Descrizione delle misure effettuate

Precedentemente, sono stati descritti tutti i sistemi di misura utilizzati: di ogni tipo di sonda sono stati riportati i valori di sensibilità, campo di misura e tolleranza indicati sulla targa dello strumento; inoltre essendo accompagnati dalla certificazione di verifica e collaudo, tali valori sono stati considerati validi.

Nella programmazione delle sessioni di misura si è tenuto conto di diversi fattori:

- tempo di adeguamento delle sonde utilizzate per la misura dell'illuminamento interno;
- tempo di adeguamento delle sonde che misurano la radiazione;
- incertezza delle prime misure successive alla variazione della geometria del modello;
- rata di acquisizione del BABUC ABC;
- numero di canali da utilizzare;
- memoria necessaria per i dati rilevati.

Tutte le sonde utilizzate hanno un tempo di risposta pari a 50ms, mentre per il BABUC ABC la rata di acquisizione è programmabile da 1 sec. a 12 ore con un tempo di scansione di 0,5 secondi ad ingresso. Si è deciso di utilizzare 6 canali separati per le sei sonde: quindi, con il tempo di scansione indicato prima, per ogni rilievo sono necessari 3 secondi.

Si è scelto di effettuare, per ogni sessione di misure, 10 rilievi al minuto (6 valori utili per ogni rilievo) della durata totale quindi di 30 secondi e di ripetere questa procedura per 5 volte: dovendo, ad esempio conoscere i dati alle ore 08:00 la sessione delle misure inizia alle ore 07:58 e termina alle ore 08:02. Questa scelta è stata dettata dalla considerazione che i fenomeni oggetto dell'analisi hanno tempi di variazione non confrontabili con i tempi necessari alle misure e quindi il ripetere queste procedure ha garantito un elevato numero di dati disponibili.

Questa scelta ha consentito di assicurare un periodo di tempo necessario (circa 30 secondi) all'operatore per intervenire sul modello e poter effettuare le variazioni relative ai casi da analizzare

delle dimensioni della stanza o della finestra. Si è comunque tenuto conto della possibilità che le prime misure relative ad una nuova configurazione geometrica potessero essere influenzate proprio dal detto intervento, escludendo dall'operazione di calcolo della media i primi 3 rilievi del primo minuto delle misure riguardanti la nuova configurazione.

Misure sperimentali

Le sessioni di misura sono state effettuate durante il periodo invernale. Per avere dei dati confrontabili con i risultati dell'elaborazione dei programmi di calcolo, è stato necessario centrare ogni sessione di misure intorno al giorno 21: questo è il giorno a cui fanno riferimento i dati di posizionamento del Sole ottenuti dal programma di calcolo PMSOL ed utilizzati come parte di input nel programma SUPERLITE. I dati sono stati memorizzati su file EXCEL, e sono stati elaborati successivamente in diagrammi di più chiara lettura.

Le condizioni di cielo in cui sono state effettuate le misure corrispondono a quelle di cielo sereno, variabile e coperto.

Si è scelto di effettuare le misure per le esposizioni sud ed est, vista la simmetria di quest'ultima con il caso ovest; sono state considerate le seguenti geometrie:

- ambiente di dimensioni 5x3x5m con finestra 2x2m
- ambiente di dimensioni 5x3x5m con finestra 3x2m
- ambiente di dimensioni 5x3x5m con finestra 5x2m
- ambiente di dimensioni 5x3x7m con finestra 2x2m
- ambiente di dimensioni 5x3x7m con finestra 3x2m
- ambiente di dimensioni 5x3x7m con finestra 5x2m
- ambiente di dimensioni 5x3x9m con finestra 2x2m
- ambiente di dimensioni 5x3x9m con finestra 3x2m
- ambiente di dimensioni 5x3x9m con finestra 5x2m

I risultati sono stati rappresentati nei diagrammi di seguito riportati: le misure sono state effettuate con scansioni temporali diverse in modo da ottenere un gamma di valori distribuita nel tempo.

Esposizione Est (Fig. 3.22-30)

Misure: Roma febbraio totale est, stanza 5x5 finestra 5x2

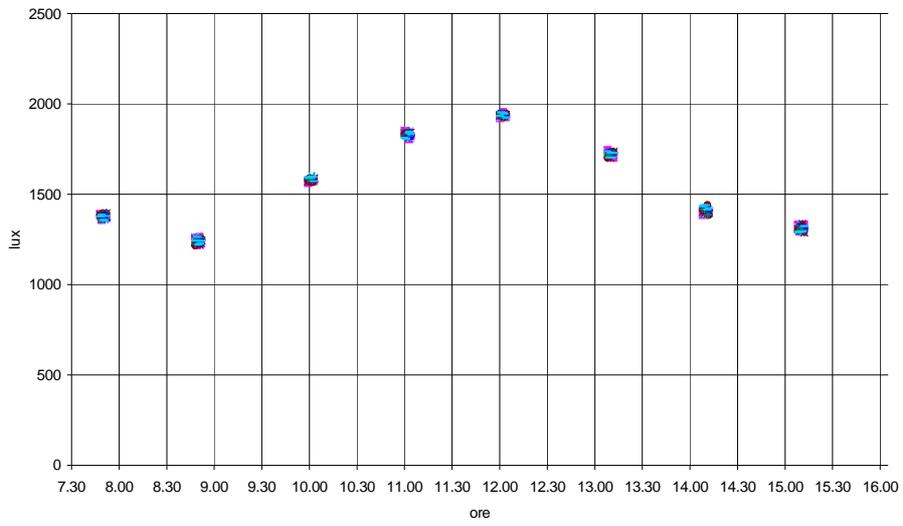


Figura 3.22. Roma, febbraio, radiazione totale, stanza 5x5, finestra 5x2

Misure: Roma febbraio totale est, stanza 5x5 finestra 3x2

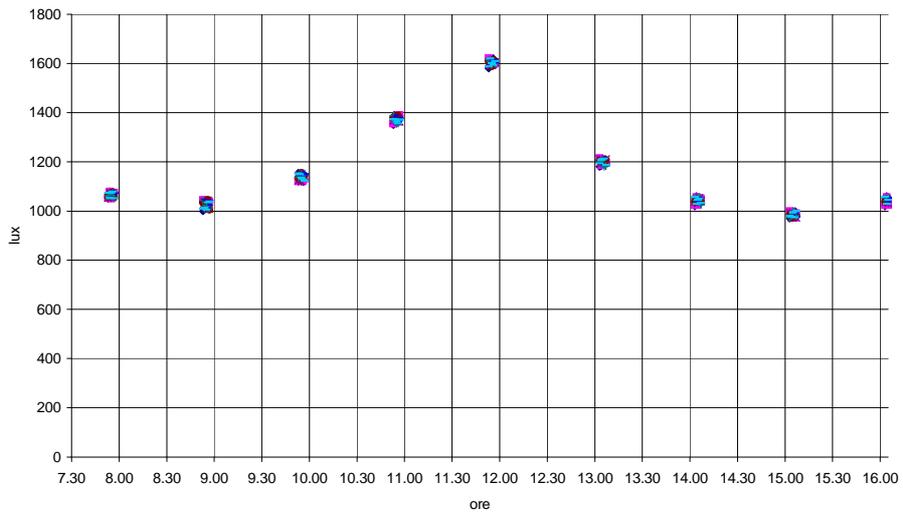


Figura 3.23. Roma, febbraio, radiazione totale, stanza 5x5, finestra 3x2

Misure: Roma febbraio totale est, stanza 5x7 finestra 2x2

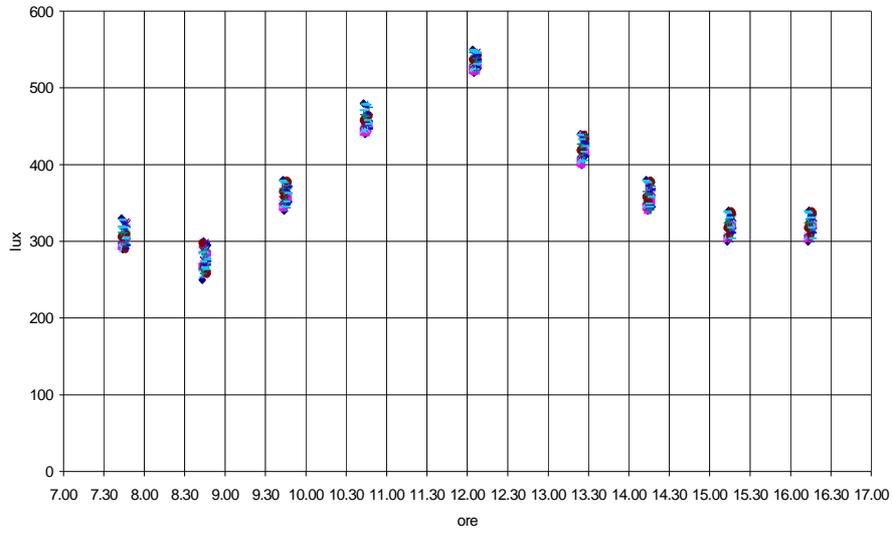


Figura 3.24. Roma, febbraio, radiazione totale, stanza 5x7, finestra 2x2

Misure: Roma febbraio totale est, stanza 5x7 finestra 5x2

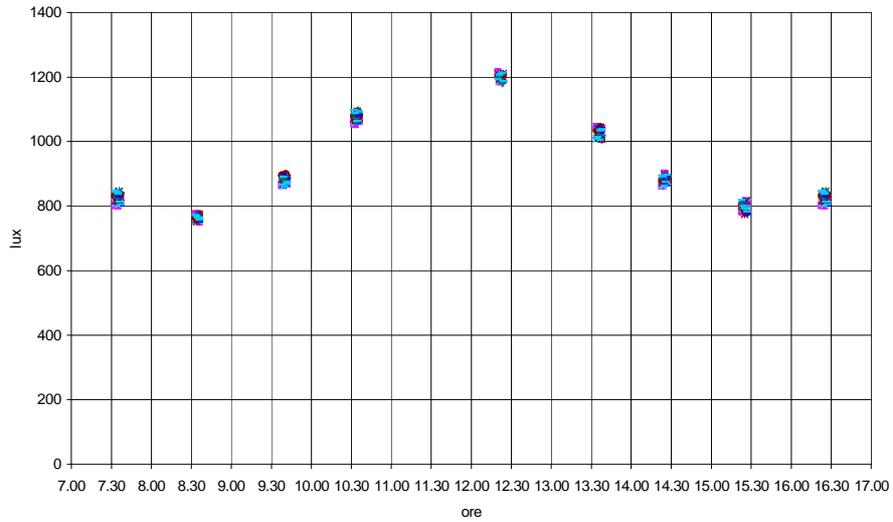


Figura 3.25. Roma, febbraio, radiazione totale, stanza 5x7, finestra 5x2

Misure: Roma febbraio totale est, stanza 5x5 finestra 5x2

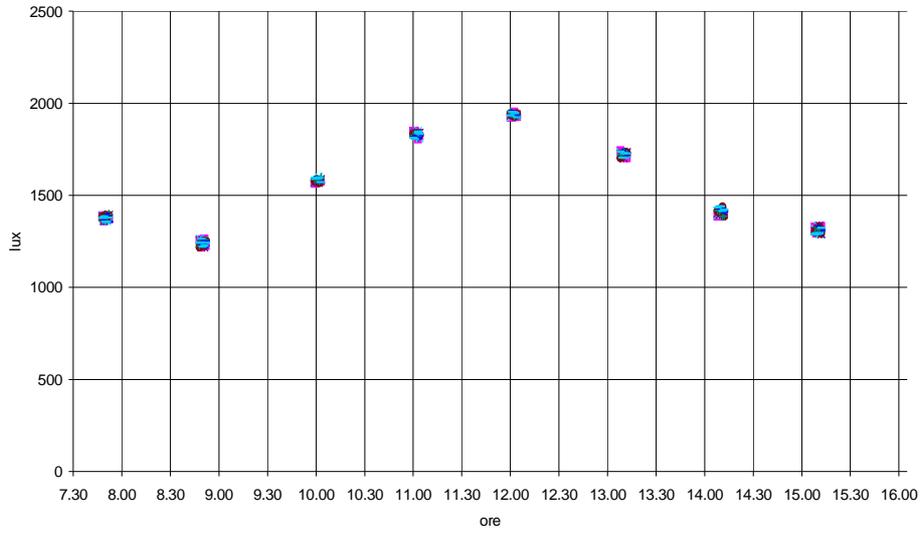


Figura 3.26. Roma, febbraio, radiazione totale, stanza 5x5, finestra 5x2

Misure: Roma febbraio totale est, stanza 5x7 finestra 3x2

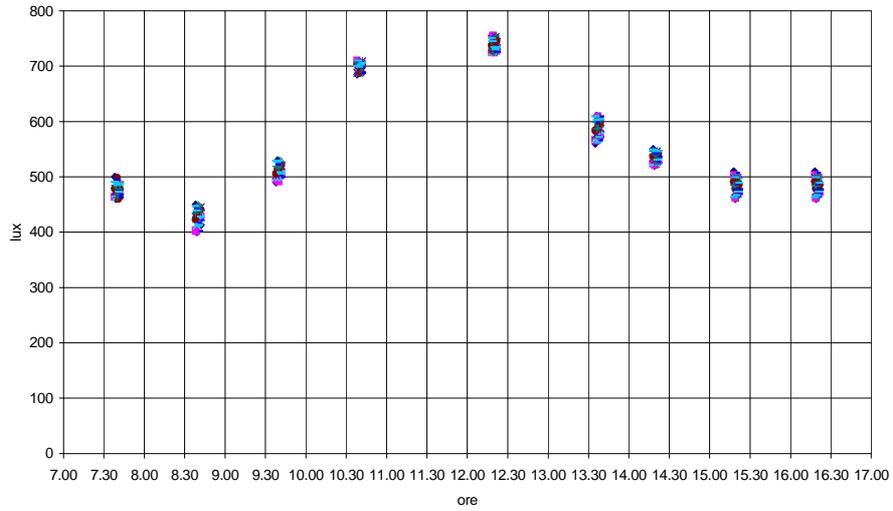


Figura 3.27. Roma, febbraio, radiazione totale, stanza 5x7, finestra 3x2

Misure: Roma febbraio totale est, stanza 5x9 finestra 2x2

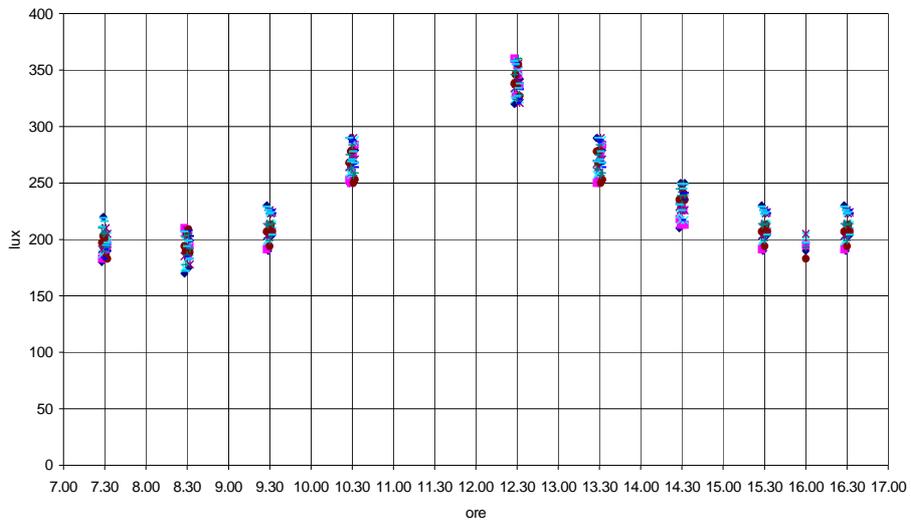


Figura 3.28. Roma, febbraio, radiazione totale, stanza 5x9, finestra 2x2

Misure: Roma febbraio totale est, stanza 5x9 finestra 3x2

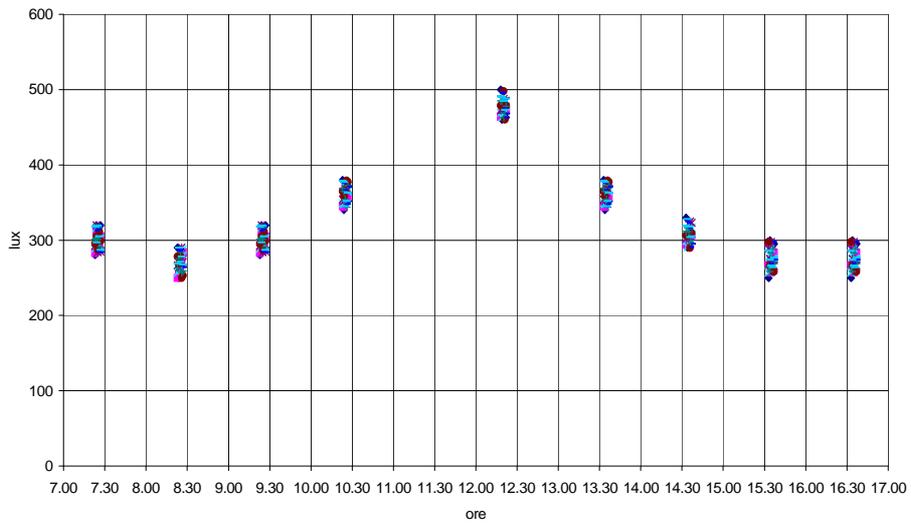


Figura 3.29. Roma, febbraio, radiazione totale, stanza 5x9, finestra 3x2

Misure: Roma febbraio totale est, stanza 5x9 finestra 5x2

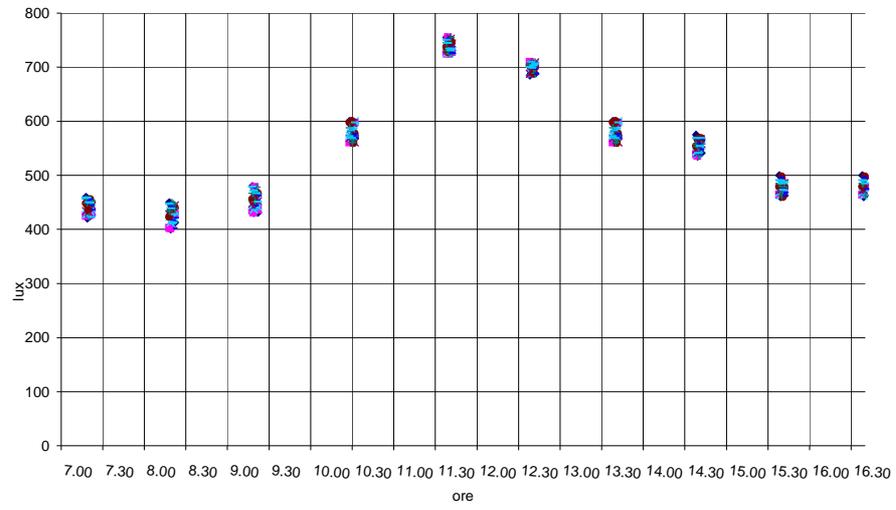


Figura 3.30. Roma, febbraio, radiazione totale, stanza 5x9, finestra 5x2

Esposizione Sud (Fig. 3.31-39)

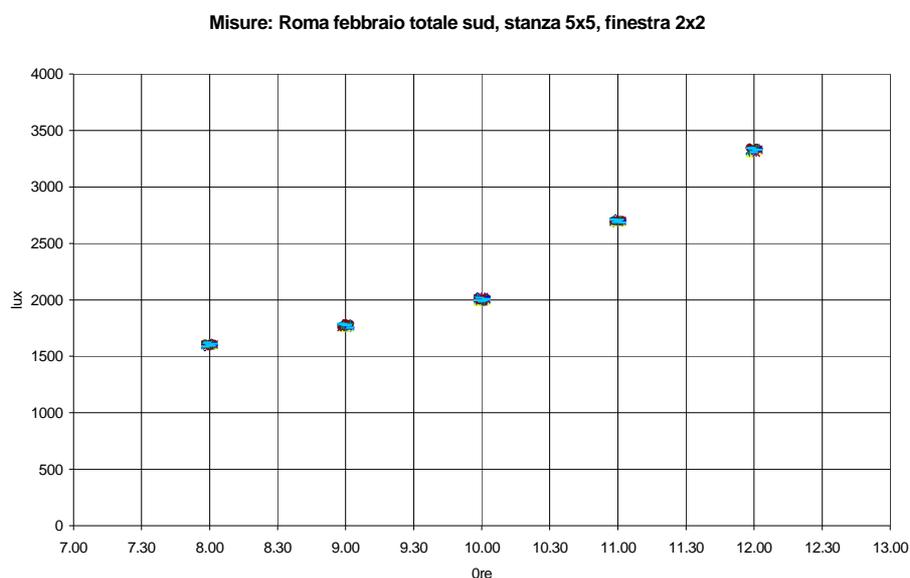


Figura 3.31. Roma, febbraio, radiazione totale, stanza 5x5, finestra 2x2

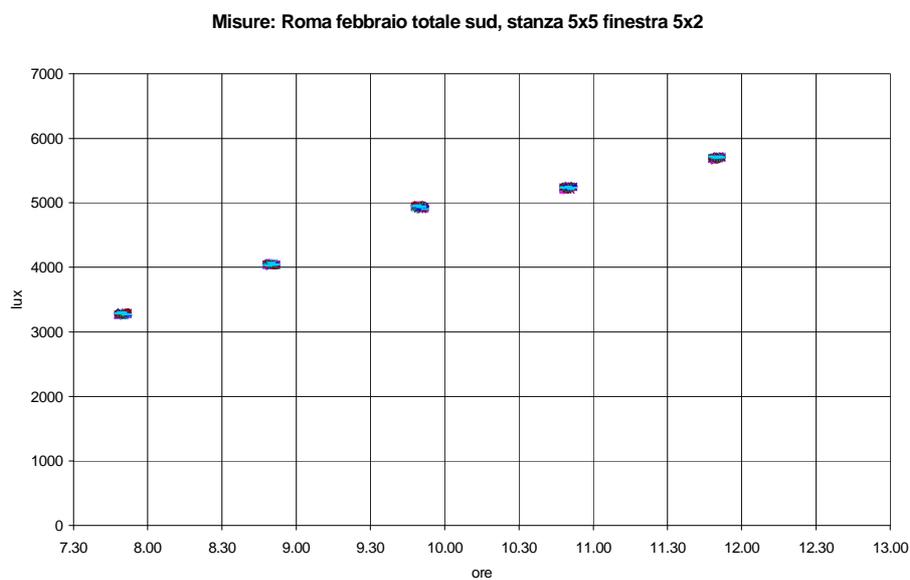


Figura 3.32. Roma, febbraio, radiazione totale, stanza 5x5, finestra 5x2

Misure: Roma febbraio totale sud, stanza 5x7 finestra 3x2

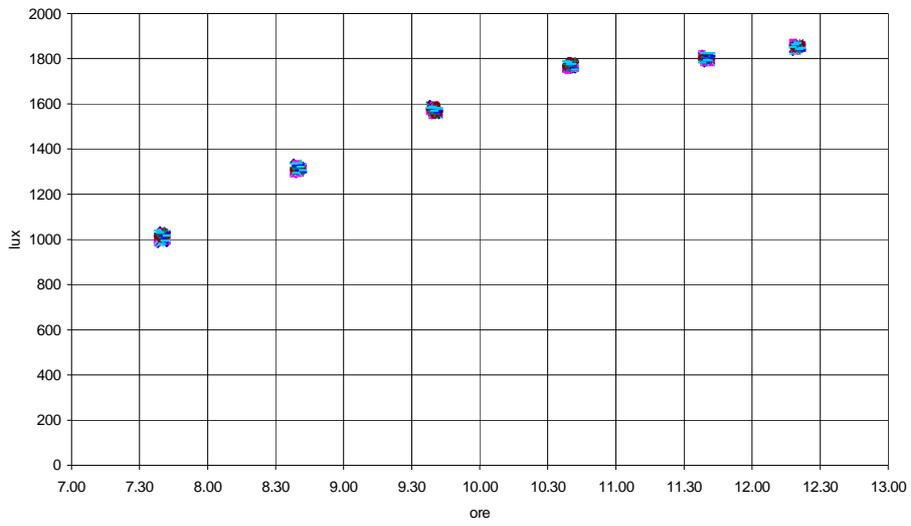


Figura 3.33. Roma, febbraio, radiazione totale, stanza 5x7, finestra 3x2

Misure: Roma febbraio totale sud, stanza 5x5 finestra 3x2

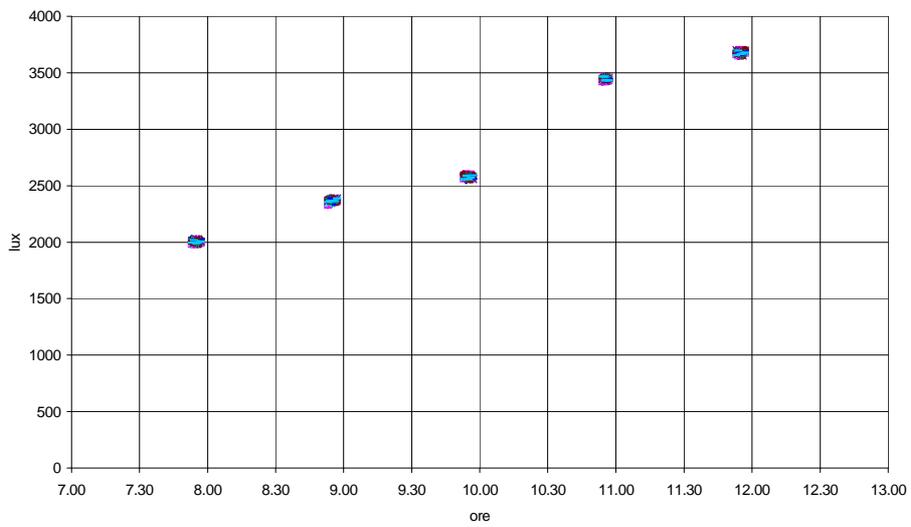


Figura 3.34. Roma, febbraio, radiazione totale, stanza 5x5, finestra 3x2

Misure: Roma febbraio totale sud, stanza 5x7 finestra 2x2

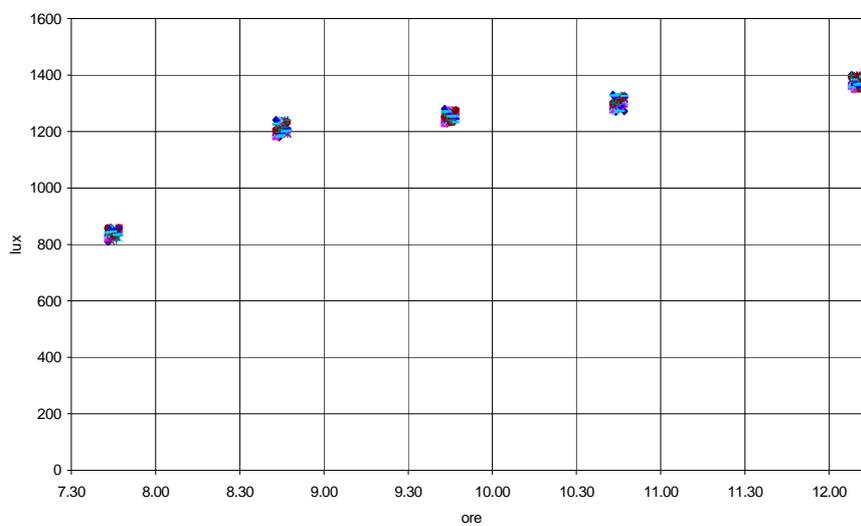


Figura 3.35. Roma, febbraio, radiazione totale, stanza 5x7, finestra 2x2

Misure: Roma febbraio totale sud, stanza 5x9 finestra 5x2

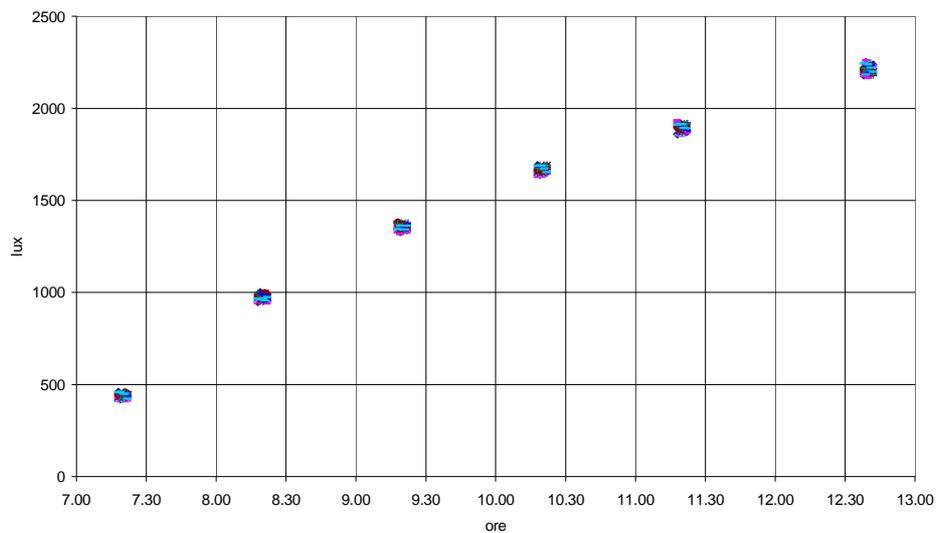


Figura 3.36. Roma, febbraio, radiazione totale, stanza 5x9, finestra 5x2

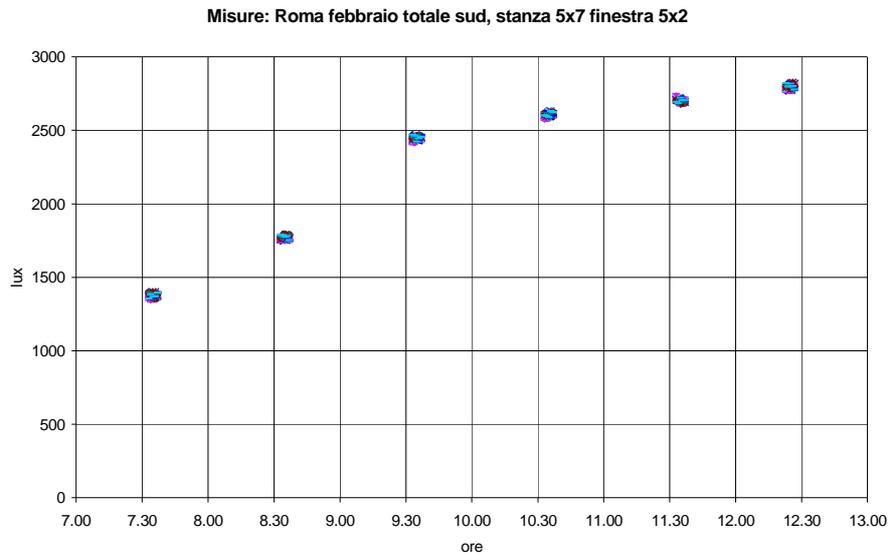


Figura 3.37. Roma, febbraio, radiazione totale, stanza 5x7, finestra 5x2

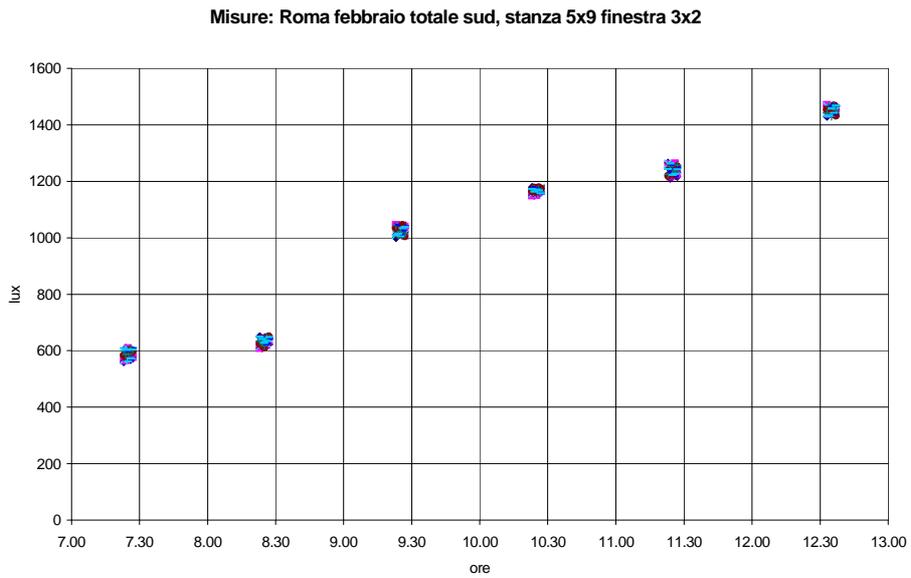


Figura 3.38. Roma, febbraio, radiazione totale, stanza 5x9, finestra 3x2

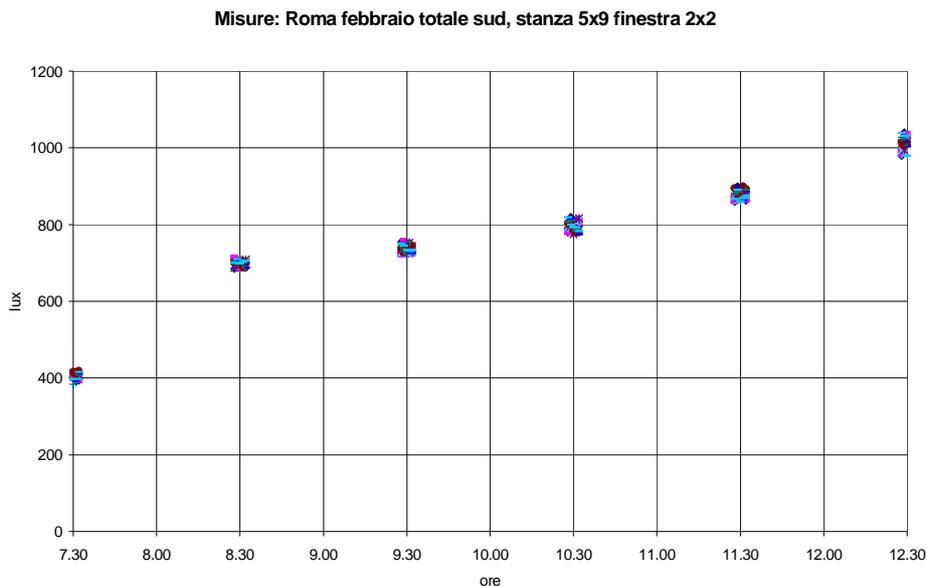


Figura 3.39. Roma, febbraio, radiazione totale, stanza 5x9, finestra 2x2

Confronto tra misure teoriche e sperimentali validazione della procedura

Avendo a disposizione sia i valori ottenuti dalle applicazioni numeriche, sia quelli delle numerose sessioni di misura, è possibile effettuare un confronto tra i due sistemi utilizzati per lo studio del problema illuminotecnico. Di seguito vengono riportati i diagrammi di confronto tra le curve teoriche e quelle ricavate dalla media dei valori misurati, riferiti alle esposizioni est e sud (Fig. 3.40-57).

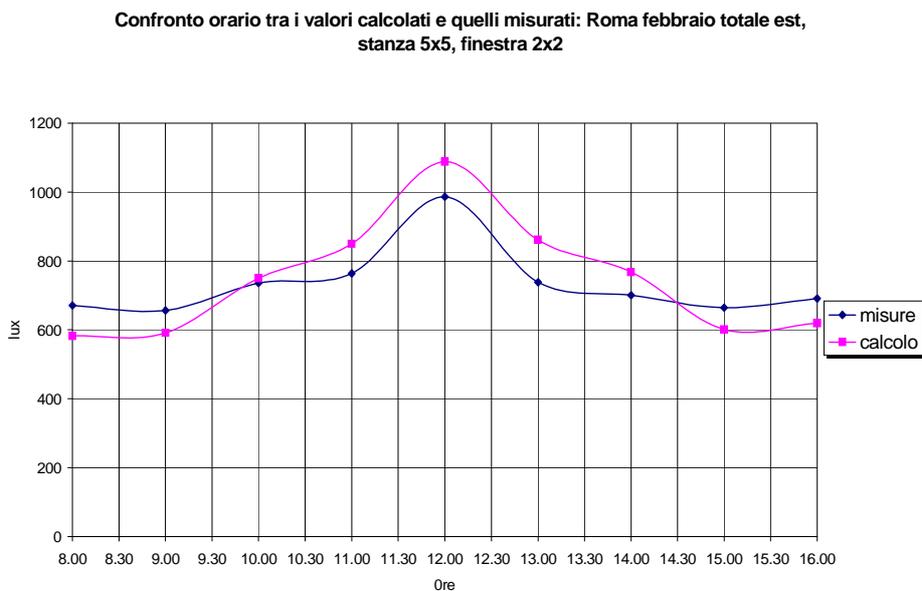


Figura 3.40. Roma, febbraio, est, radiazione totale, stanza 5x5, finestra 2x2

Confronto orario tra i valori calcolati e quelli misurati: Roma febbraio totale est, stanza 5x5 finestra 5x2

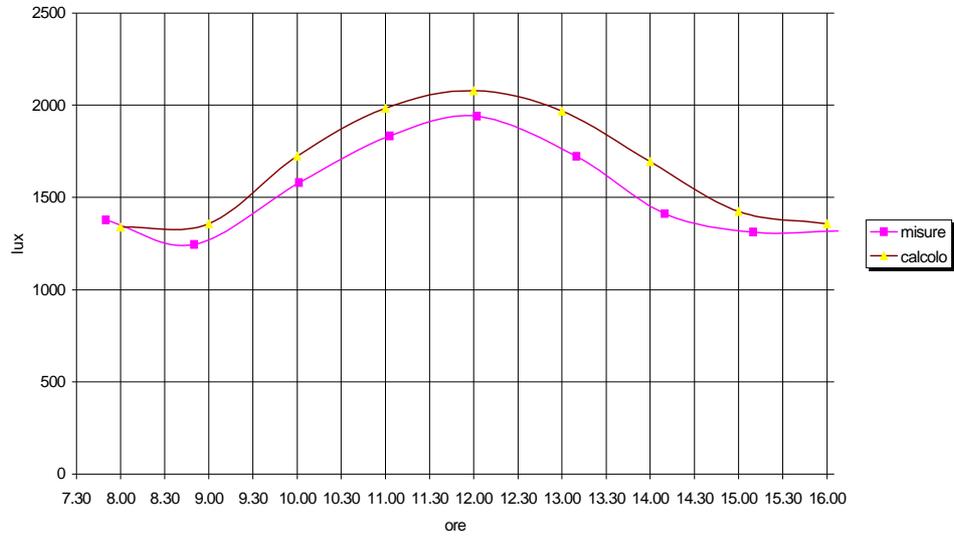


Figura 3.41. Roma, febbraio, est, radiazione totale, stanza 5x5, finestra 5x2

Confronto orario tra i valori calcolati e quelli misurati: Roma febbraio totale est, stanza 5x5 finestra 3x2

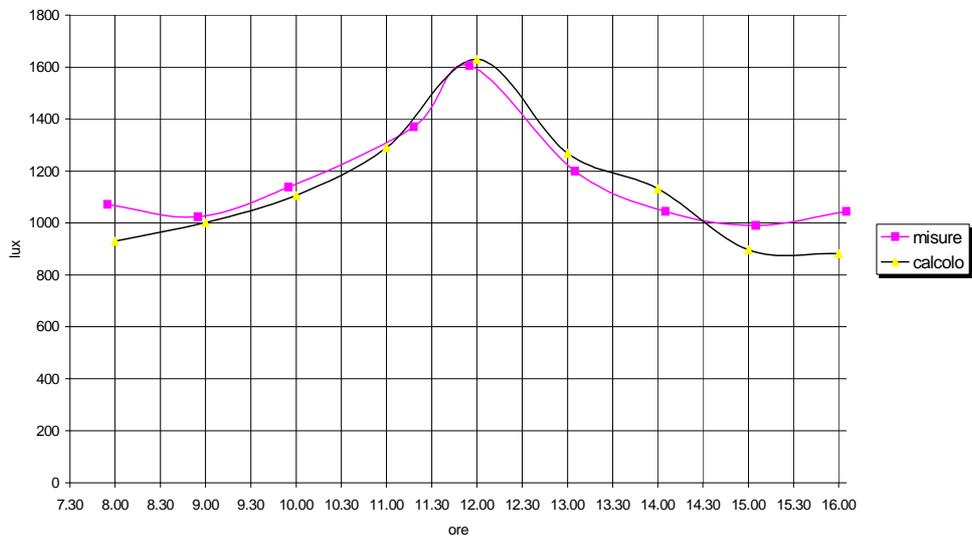


Figura 3.42. Roma, febbraio, est, radiazione totale, stanza 5x5, finestra 3x2

Confronto orario tra i valori calcolati e quelli misurati: Roma febbraio totale est, stanza 5x7 finestra 2x2

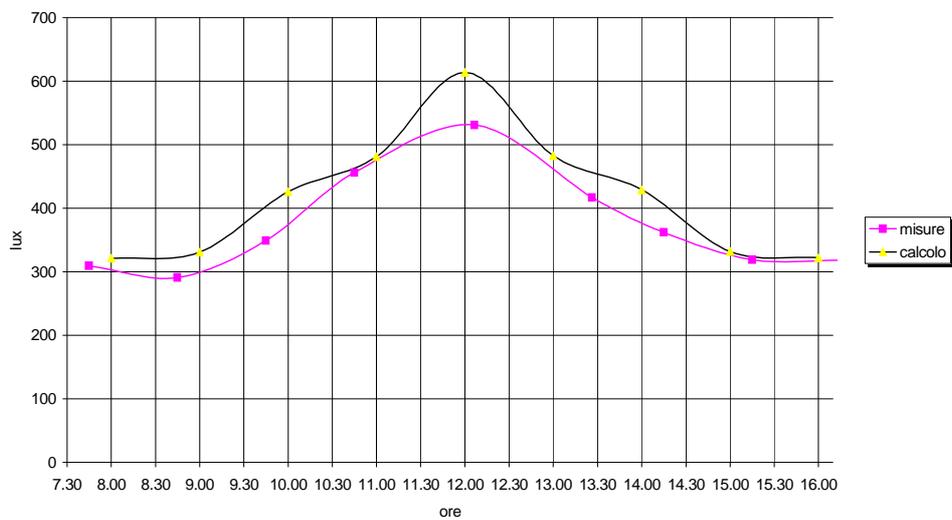


Figura 3.43. Roma, febbraio, est, radiazione totale, stanza 5x7, finestra 2x2

Confronto orario tra i valori calcolati e quelli misurati: Roma febbraio totale est, stanza 5x7 finestra 5x2

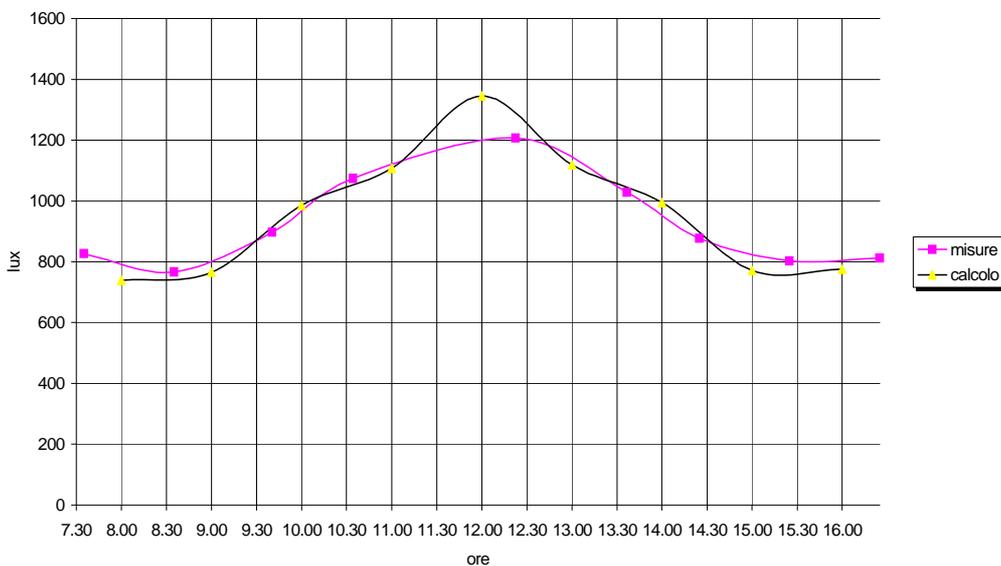


Figura 3.44. Roma, febbraio, est, radiazione totale, stanza 5x7, finestra 5x2

Confronto orario tra i valori calcolati e quelli misurati: Roma febbraio totale est, stanza 5x7 finestra 3x2

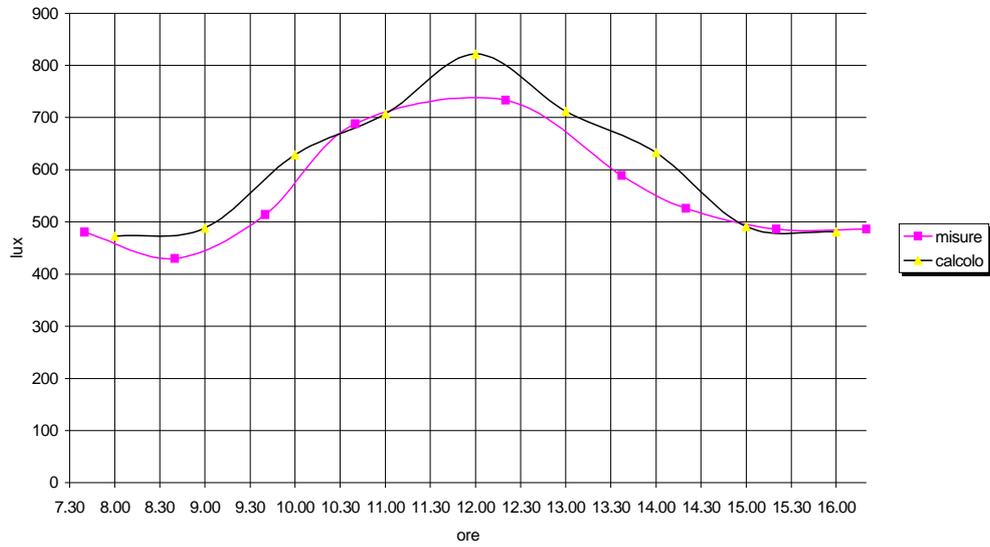


Figura 3.45. Roma, febbraio, est, radiazione totale, stanza 5x7, finestra 3x2

Confronto orario tra i valori calcolati e quelli misurati: Roma febbraio totale est, stanza 5x9 finestra 2x2

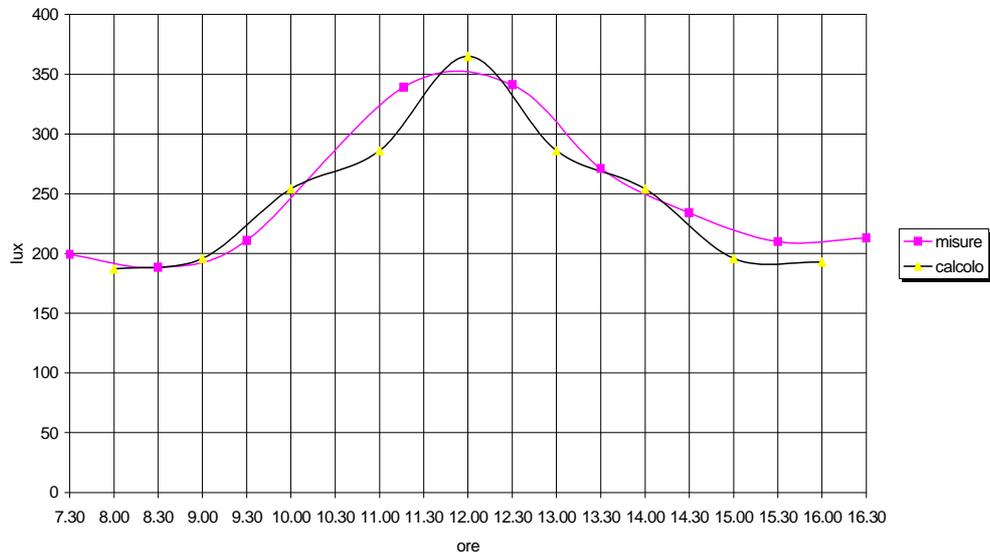


Figura 3.46. Roma, febbraio, est, radiazione totale, stanza 5x9, finestra 2x2

Confronto orario tra i valori calcolati e quelli misurati: Roma febbraio totale est, stanza 5x9 finestra 5x2

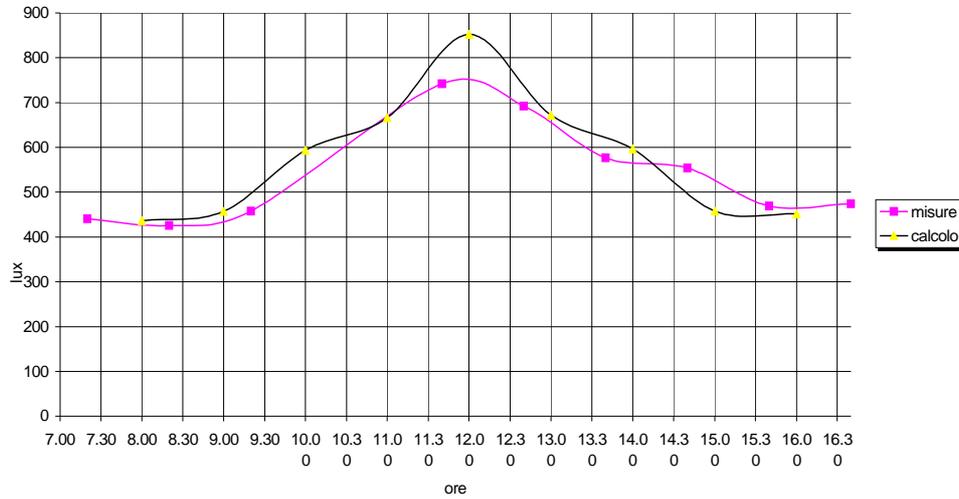


Figura 3.47. Roma, febbraio, est, radiazione totale, stanza 5x9, finestra 5x2

Confronto orario tra i valori calcolati e quelli misurati: Roma febbraio totale est, stanza 5x9 finestra 3x2

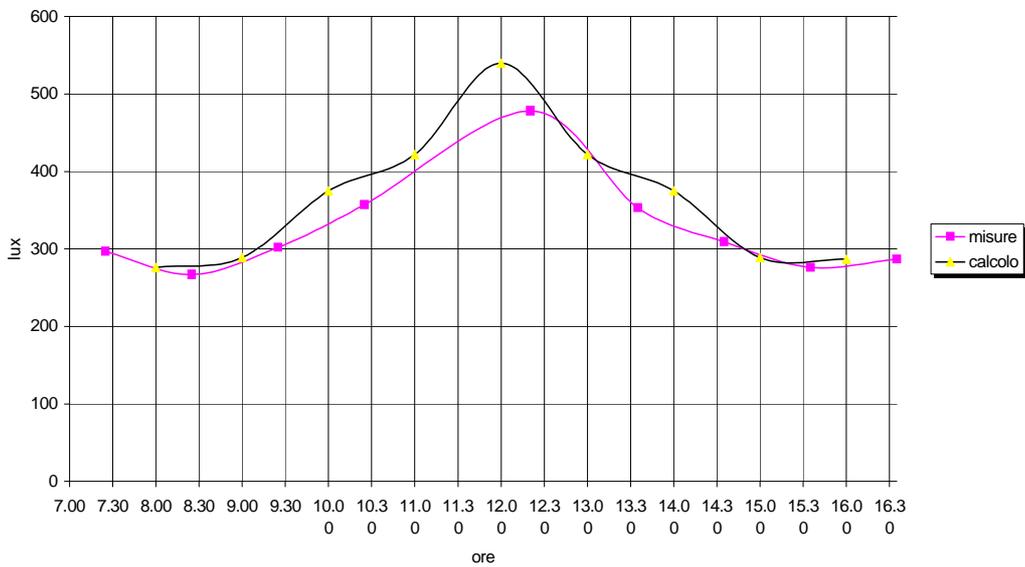


Figura 3.48. Roma, febbraio, est, radiazione totale, stanza 5x9, finestra 3x2

Confronto orario tra i valori calcolati e quelli misurati: Roma febbraio totale sud, stanza 5x5, finestra 2x2

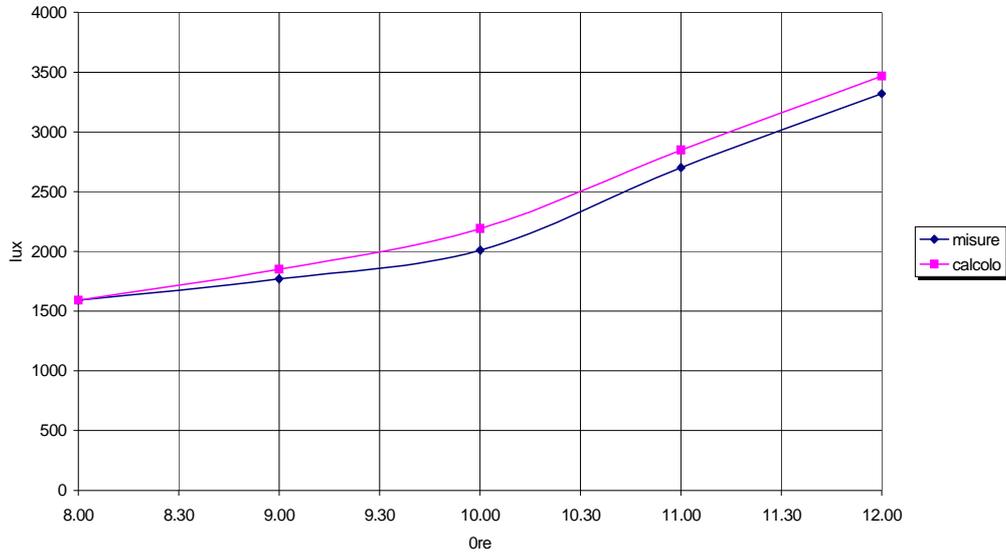


Figura 3.49. Roma, febbraio, sud, radiazione totale, stanza 5x5, finestra 2x2

Confronto orario tra i valori calcolati e quelli misurati: Roma febbraio totale sud, stanza 5x5 finestra 3x2

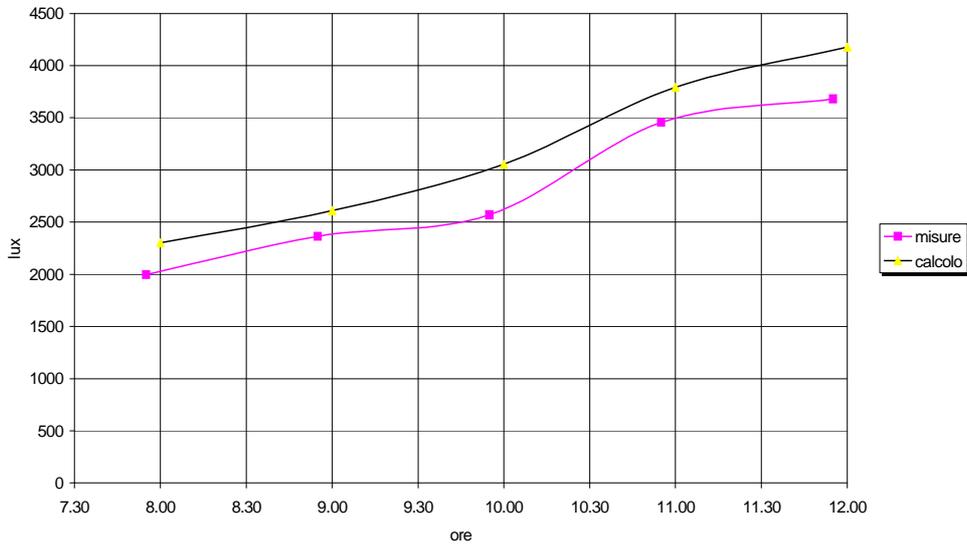


Figura 3.50. Roma, febbraio, sud, radiazione totale, stanza 5x5, finestra 3x2

Confronto orario tra i valori calcolati e quelli misurati: Roma febbraio totale sud, stanza 5x7 finestra 2x2

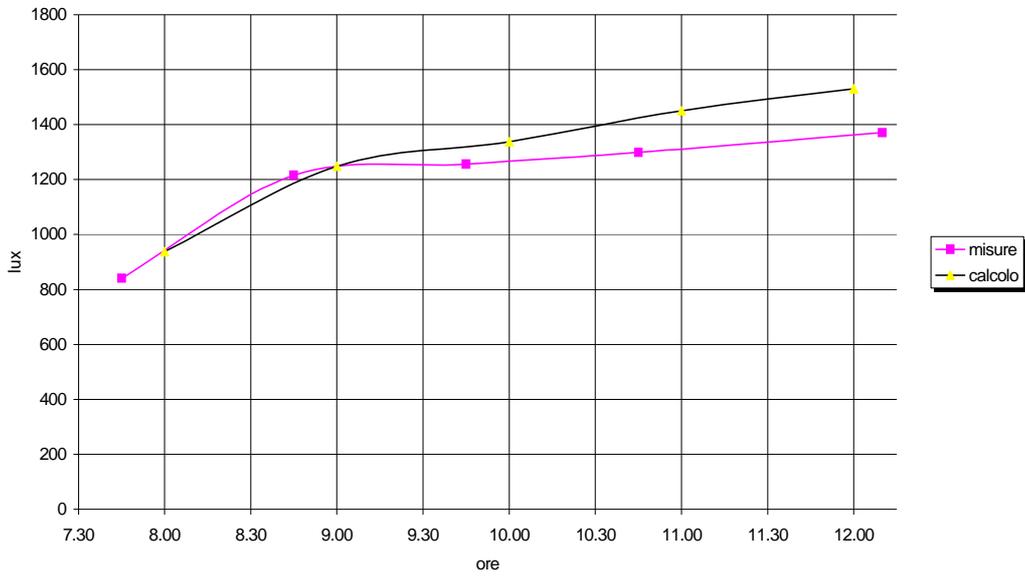


Figura 3.51. Roma, febbraio, sud, radiazione totale, stanza 5x7, finestra 2x2

Confronto orario tra i valori calcolati e quelli misurati: Roma febbraio totale sud, stanza 5x5 finestra 5x2

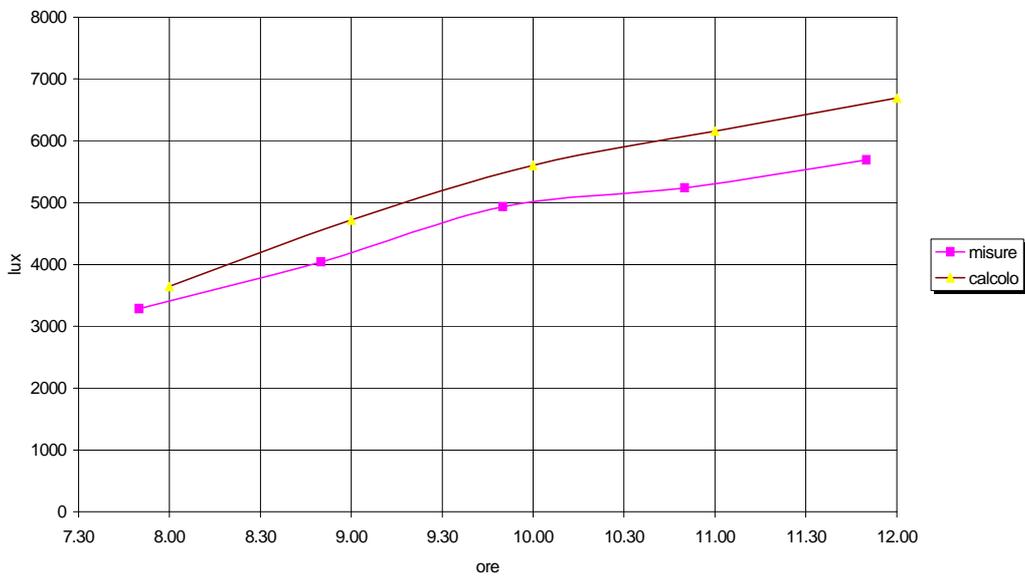


Figura 3.52. Roma, febbraio, sud, radiazione totale, stanza 5x5, finestra 5x2

Confronto orario tra i valori calcolati e quelli misurati: Roma febbraio totale sud,
stanza 5x7 finestra 5x2

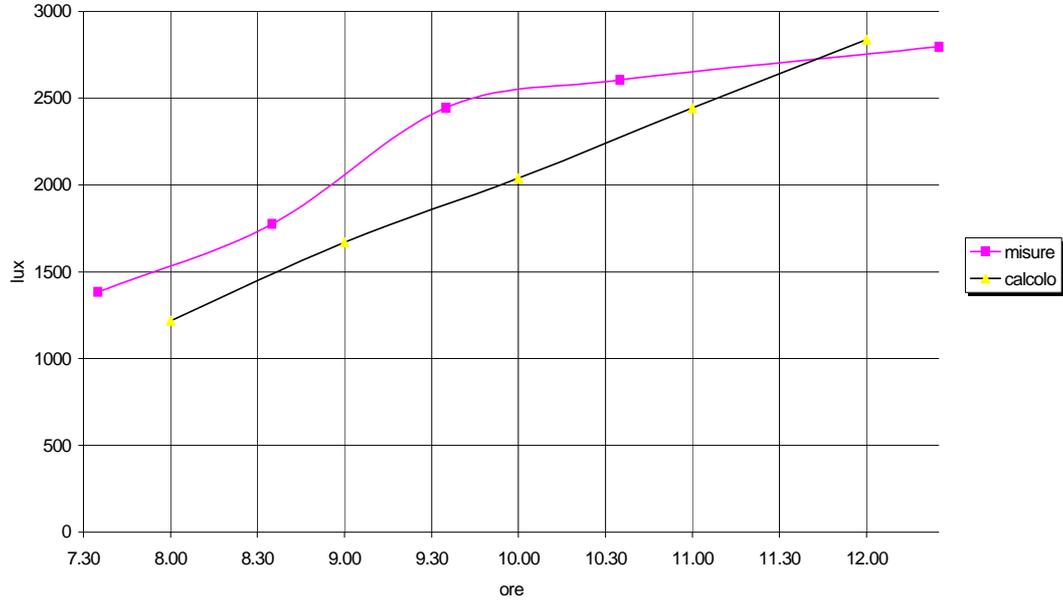


Figura 3.53. Roma, febbraio, sud, radiazione totale, stanza 5x7, finestra 5x2

Confronto orario tra i valori calcolati e quelli misurati: Roma febbraio totale sud,
stanza 5x7 finestra 3x2

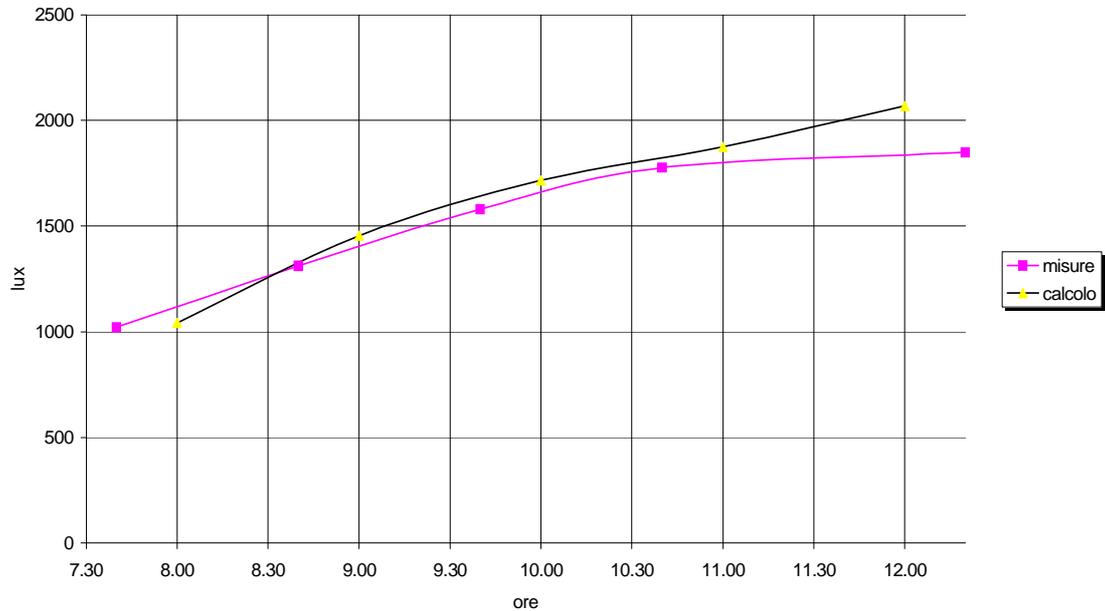


Figura 3.54. Roma, febbraio, sud, radiazione totale, stanza 5x7, finestra 3x2

Confronto orario tra i valori calcolati e quelli misurati: Roma febbraio totale sud, stanza 5x9 finestra 2x2

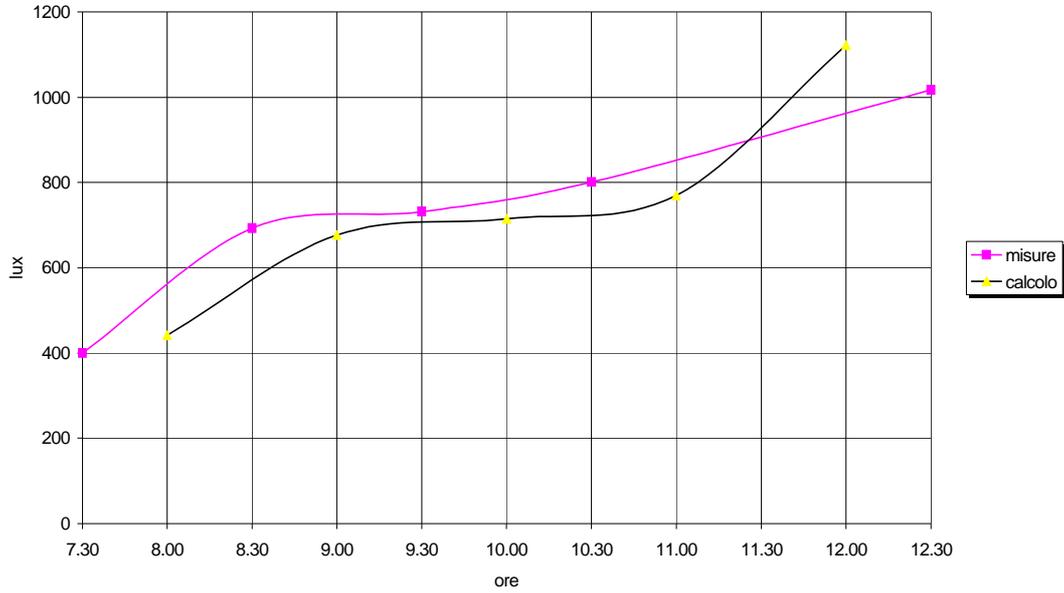


Figura 3.55. Roma, febbraio, sud, radiazione totale, stanza 5x9, finestra 2x2

Confronto orario tra i valori calcolati e quelli misurati: Roma febbraio totale sud, stanza 5x9 finestra 3x2

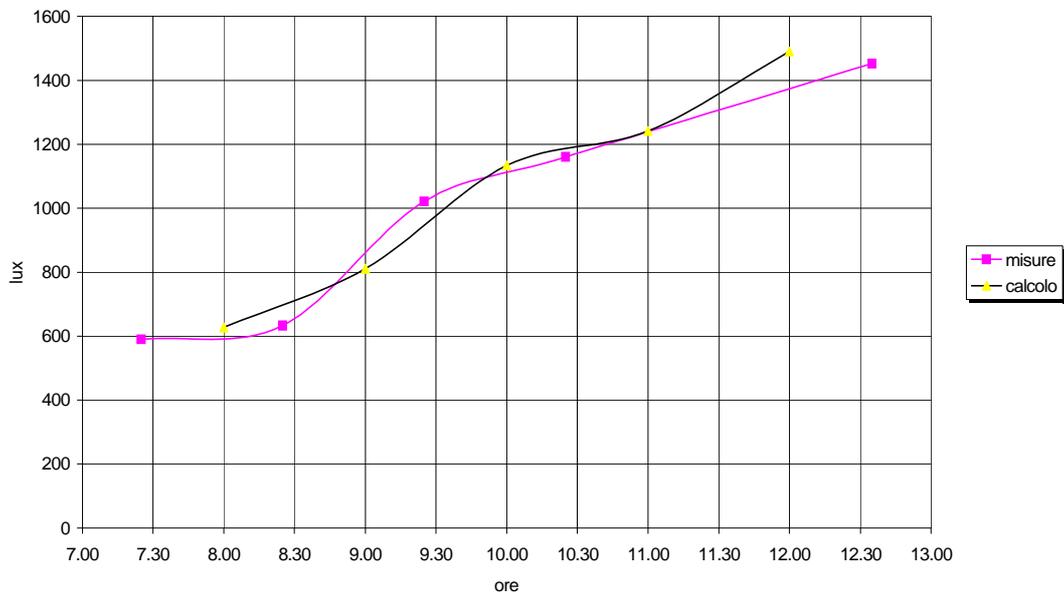


Figura 3.56. Roma, febbraio, sud, radiazione totale, stanza 5x9, finestra 3x2

Confronto orario tra i valori calcolati e quelli misurati: Roma febbraio totale sud, stanza 5x9 finestra 5x2

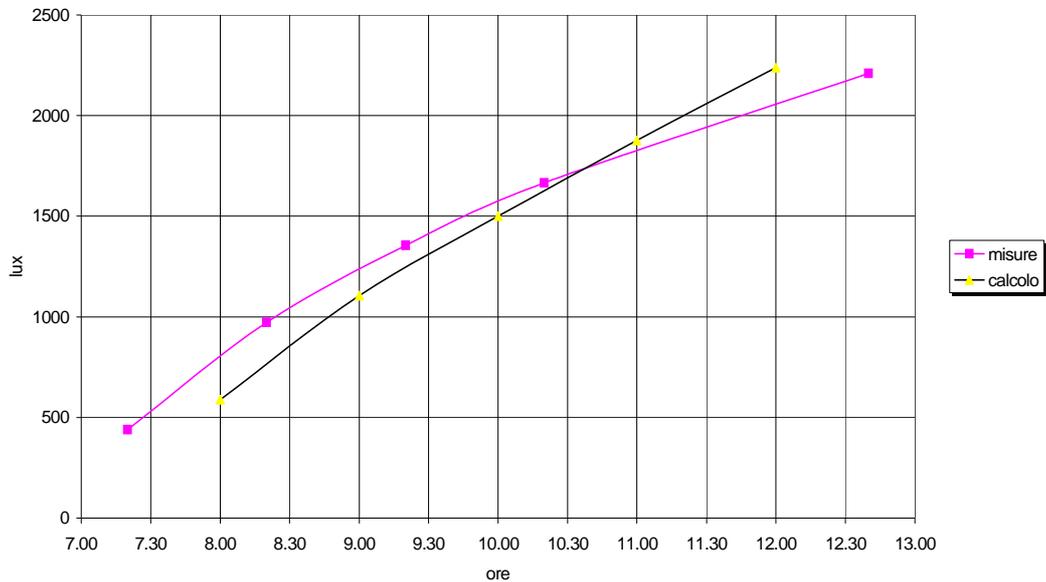


Figura 3.57. Roma, febbraio, sud, radiazione totale, stanza 5x9, finestra 5x2

Lo scarto relativo tra i valori calcolati e quelli ottenuti dalle sessioni di misura sperimentali è, in genere, sensibilmente variabile. Si tratta comunque di variazioni massime del 20%, imputabili alle approssimazioni ed alle ipotesi del programma di calcolo utilizzato: il flusso luminoso entrante viene ad esempio considerato a composizione spettrale uniforme, e così la sua riflessione sulle superfici interne risulta uniforme su tutto lo spettro del visibile; inoltre, le superfici interne sono per ipotesi perfettamente diffondenti mentre in realtà i materiali utilizzati hanno caratteristiche in parte riflettenti.

Il modello sperimentale realizzato costituisce quindi un utile strumento di indagine e ricerca; esso presenta, rispetto al metodo di calcolo, il vantaggio di non avere alcun tipo di limitazione per quanto riguarda la geometria dell'ambiente: uno dei limiti dei programmi di calcolo illuminotecnico è rappresentato proprio dall'impossibilità di simulare ambienti dall'architettura complessa o con presenza di numerose superfici trasparenti.

Capitolo 4

Risultati ed ottimizzazione

Lo scopo di questo lavoro è quello di definire, se possibile, dei parametri che consentano una semplificazione nella determinazione delle caratteristiche dimensionali delle superfici trasparenti di un ambiente al variare delle sue dimensioni, della sua esposizione, della latitudine a cui si trova, nell'ottica del rispetto delle condizioni di illuminamento previste, da progetto, sul piano di lavoro. La complessità del problema affrontato è dovuta principalmente all'elevato numero di variabili che influiscono sulla determinazione dello stato di illuminamento dell'ambiente interno.

La determinazione di parametri di questo tipo consente la generalizzazione di risultati, e questo permette di definire linee guida a carattere comunque generale che consentano un approccio sostenibile alla progettazione con la luce naturale.

Estensione dei risultati ottenuti e validati per Roma ad altre latitudini

L'estensione dei risultati ottenuti per Roma ad altre latitudini è stata ottenuta reiterando il processo descritto, sia in termini di misura sperimentale, sia di simulazione numerica. In particolare, la procedura seguita si è basata sul calcolo di altezza e azimuth solare per diverse località (Tab. 4.1-6), situate a differenti latitudini (Bolzano, Roma e Messina), per mesi di specifico interesse (giugno e dicembre, mesi in cui si verificano solstizio ed equinozio)

Tabella 4.1. Altezza e azimuth solare, Bolzano, giugno

GIUGNO BOLZANO					
Ore	Altezza	Azimut	Ore	Altezza	Azimut
1	0.0	0.0	13	64.3	33.3
2	0.0	0.0	14	56.9	57.2
3	0.0	0.0	15	47.4	73.6
4	0.0	0.0	16	37.2	86.1
5	6.9	116.7	17	26.8	96.7
6	16.6	106.7	18	16.6	106.7
7	26.8	96.7	19	6.9	116.7
8	37.2	86.1	20	0.0	0.0
9	47.4	73.6	21	0.0	0.0
10	56.9	57.2	22	0.0	0.0
11	64.3	33.3	23	0.0	0.0
12	67.4	0	24	0.0	0.0

Tabella 4.2. Altezza e azimuth solare, Roma, giugno

GIUGNO ROMA					
Ore	Altezza	Azimut	Ore	Altezza	Azimut
1	0.0	0.0	13	67.6	38.6
2	0.0	0.0	14	58.9	62.8
3	0.0	0.0	15	48.4	78.0
4	0.0	0.0	16	37.4	89.2
5	5.2	117.2	17	26.3	98.8

6	15.4	107.9	18	15.4	107.9
7	26.3	98.8	19	5.2	117.2
8	37.4	89.2	20	0.0	0.0
9	48.4	78.0	21	0.0	0.0
10	58.9	62.8	22	0.0	0.0
11	67.6	38.6	23	0.0	0.0
12	71.4	0.0	24	0.0	0.0

Tabella 4.3. Altezza e azimut solare, Messina, giugno

GIUGNO MESSINA					
Ore	Altezza	Azimut	Ore	Altezza	Azimut
1	0.0	0.0	13	70.6	45.6
2	0.0	0.0	14	60.5	69.0
3	0.0	0.0	15	49.1	82.4
4	0.0	0.0	16	37.3	92.2
5	3.3	117.4	17	25.6	100.6
6	14.1	108.8	18	14.1	108.8
7	25.6	100.6	19	3.3	117.4
8	37.3	92.2	20	0.0	0.0
9	49.1	82.4	21	0.0	0.0
10	60.5	69.0	22	0.0	0.0
11	70.6	45.6	23	0.0	0.0
12	75.4	0.0	24	0.0	0.0

Tabella 4.4. Altezza e azimut solare, Bolzano, dicembre

DICEMBRE BOLZANO					
Ore	Altezza	Azimut	Ore	Altezza	Azimut
1	0.0	0.0	13	19.2	14.5
2	0.0	0.0	14	15.4	28.4
3	0.0	0.0	15	9.4	41.1
4	0.0	0.0	16	1.8	52.6
5	0.0	0.0	17	0.0	0.0
6	0.0	0.0	18	0.0	0.0

7	0.0	0.0	19	0.0	0.0
8	1.8	52.6	20	0.0	0.0
9	9.4	41.1	21	0.0	0.0
10	15.4	28.4	22	0.0	0.0
11	19.2	14.5	23	0.0	0.0
12	20.5	0	24	0.0	0.0

Tabella 4.5. Altezza e azimut solare, Roma, dicembre

DICEMBRE ROMA					
Ore	Altezza	Azimut	Ore	Altezza	Azimut
1	0.0	0.0	13	23	14.9
2	0.0	0.0	14	18.9	29
3	0.0	0.0	15	12.4	41.6
4	0.0	0.0	16	4.2	52.8
5	0.0	0.0	17	0.0	0.0
6	0.0	0.0	18	0.0	0.0
7	0.0	0.0	19	0.0	0.0
8	4.2	52.8	20	0.0	0.0
9	12.4	41.6	21	0.0	0.0
10	18.9	29	22	0.0	0.0
11	23	14.9	23	0.0	0.0
12	24.5	0.0	24	0.0	0.0

Tabella 4.6. Altezza e azimut solare, Messina, dicembre

DICEMBRE MESSINA					
Ore	Altezza	Azimut	Ore	Altezza	Azimut
1	0.0	0.0	13	26.9	15.4
2	0.0	0.0	14	22.4	29.7
3	0.0	0.0	15	15.4	42.2
4	0.0	0.0	16	6.6	53.1
5	0.0	0.0	17	0.0	0.0
6	0.0	0.0	18	0.0	0.0
7	0.0	0.0	19	0.0	0.0

8	6.6	53.1	20	0.0	0.0
9	15.4	42.2	21	0.0	0.0
10	22.4	29.7	22	0.0	0.0
11	15.4	15.4	23	0.0	0.0
12	6.6	0.0	24	0.0	0.0

Si è successivamente eseguito il calcolo dell'illuminamento naturale, da cui si sono ottenuti i seguenti risultati:

- determinazione della distribuzione dell'illuminamento naturale all'interno dell'ambiente confinato per ogni ora relativa al periodo interessato al variare della latitudine;
- rappresentazione dei contributi di radiazione diretta e diffusa (e quindi anche globale) in funzione dell'angolo di incidenza.

Dall'analisi di dati ottenuti da misure e simulazioni, in relazione alla eventuale possibilità di definire una correlazione tra latitudine e periodi dell'anno, si possono indicare le seguenti considerazioni:

- una unica relazione che rappresenti tutta la casistica esaminata non esiste, ovvero non si può individuare un metodo univoco per definire e quindi calcolare, a parità di condizioni geometrico-costruttive dell'ambiente confinato e del suo orientamento, l'illuminamento di una stanza, prescindendo dalla sua locazione geografica;
- le uniche relazioni che possono in un certo senso rendere più agevole il calcolo delle condizioni di illuminamento riguardano il mese di giugno con orientazione est e sud e dicembre con orientazione est, considerando però tutti gli scarti relativi precedentemente definiti;
- dall'analisi dei dati di confronto orari si nota come non si possa definire una relazione univoca che leghi i valori di illuminamento calcolati, ovvero non si può parlare di indipendenza (totale) rispetto alla latitudine delle città in esame.

Analisi parametrica

In questa sezione, si affronta il problema della ricerca di possibili parametri utili all'ottimizzazione delle fasi di progettazione e verifica degli ambienti confinati in relazione alla possibilità di massimizzare l'utilizzo della luce naturale.

I parametri d'interesse devono correlare le caratteristiche geometrico-costruttive dell'ambiente in esame con le caratteristiche di illuminamento necessarie ad una adeguata vivibilità dello stesso e, nel caso di utilizzo per attività lavorative, ai requisiti richiesti dalle norme e dalle leggi attualmente in vigore.

La necessità fondamentale è quella di riuscire ad integrare tra loro i diversi parametri descrittivi del fenomeno luminoso in ambiente, e di ottenere un sistema di calcolo abbastanza elastico che consenta nello stesso tempo un'univoca determinazione dei fattori in gioco. L'aleatorietà dei casi

possibili ed una necessaria generalità, che non leghi lo sviluppo a ipotesi troppo restrittive, sono virtù indispensabili per una trattazione che abbia nell'intento quello di poter arrivare a definire delle linee guida, che siano uno strumento d'uso "sul campo".

Le diverse caratteristiche che rappresentano una situazione tipo possono essere distinte in quattro gruppi:

- *costruttive*: dimensione della stanza (come variabile è stata considerata la lunghezza della stanza, mentre sono state considerate costanti la larghezza e l'altezza), dimensione della finestra (la lunghezza, l'altezza è stata mantenuta costante);
- *esposizione*: nord, sud, est, ovest (della parete esterna, quella con la superficie trasparente);
- *periodo*: mese;
- *tempi*: ora.

Da quanto indicato, risulta difficoltoso riuscire ad individuare una relazione che possa correlare tutte le variabili in modo semplice e soprattutto univoco, senza quindi perdere di generalità o introdurre ipotesi troppo limitative. Si è tentato quindi di definire un parametro che operasse prevalentemente sulle caratteristiche geometrico-costruttive dell'ambiente.

Si è introdotta quindi il parametro **K** definito come:

K = lunghezza finestra / altezza finestra

che può assumere, mantenendo l'altezza pari a 2 metri, i valori 1, 1.5, 2, 2.5 a seconda delle geometrie considerate nel caso in studio, ma che ricopre una buona generalità delle possibili situazioni.

In Fig. 4.1-9 sono riportati dei diagrammi con in ascisse il rapporto tra la superficie della finestra e quella del pavimento della stanza e in ordinate i valori dell'illuminamento. Si è scelta per la parete esterna l'esposizione sud, e si sono costruiti dei grafici relativi ad orari definiti, e K variabile; si è inoltre considerata la componente diretta della radiazione solare, perché generalmente è quella che è caratterizzata da comportamento non lineare. Dall'analisi dei diagrammi, si nota come non sia possibile ottenere una relazione univoca per le diverse situazioni. In effetti, però, la variazione relativa dell'illuminamento tra i diversi K risulta essere minima nei mesi di giugno ed agosto e questo potrebbe far pensare di fittare le curve ottenendo una serie di curve crescenti nel verso dell'incremento del rapporto in ascisse con uno scarto relativamente piccolo. Quest'analisi perde di significato nel momento in cui si passa a considerare i valori di novembre: a causa dell'altezza solare, che rispetto ai mesi estivi risulta essere minore, la componente diretta ha infatti un'influenza maggiore sul comportamento luminoso dell'ambiente. Ciò comporta che l'errore che si manifesta nell'operare come fatto per i casi precedenti assume un valore non più trascurabile, fino a manifestare la sua rilevanza nel caso in cui si fittano le curve relative al diagramma di novembre ore 12.

La scelta di rappresentare i valori ottenuti nel modo indicato si è quindi rilevata infruttuosa dal punto di vista dell'ottenimento di diagrammi facilmente interpretabili e che potessero illustrare in modo univoco le situazioni considerate. Si è passati dalla rappresentazione dei dati descritti ad una in cui si è mantenuto costante il valore di K e si sono illustrate le diverse situazioni al variare del tempo. Si sono considerate tutte le esposizioni, tutte le possibili combinazioni geometrico-costruttive dell'ambiente, e i quattro K precedentemente definiti. Per quanto riguarda la scelta dei periodi da analizzare, è necessario ricordare che esiste una simmetria tra i mesi dell'anno, e si è

optato quindi per analizzare il sistema in giugno, agosto, novembre. I rimanenti mesi possono essere valutati mediante l'uso di metodi di interpolazione.

I grafici ottenuti sono rappresentati in Fig. 4.10-68.

Nel sistema rappresentato si osserva come si siano ottenute una serie di curve di miglior interpretazione rispetto ai tentativi precedentemente effettuati: il loro impiego nella ricerca delle caratteristiche costruttive dell'ambiente confinato risulta essere semplificato. Il criterio d'utilizzo di questi grafici è fondato sulla ricerca della geometria costruttiva che consente di garantire un livello di illuminamento minimo nell'ambiente. Imponendo questo limite e dovendo, ad esempio, dimensionare la superficie trasparente, avendo imposto la superficie della stanza, si entra dalle ordinate con il valore dei lux e, scegliendo il K, si ottengono, con le ascisse, le dimensioni effettive della finestra. Il sistema può essere utilizzato quindi sia in fase di progetto che in fase di verifica variando le ipotesi di ingresso. Questi diagrammi hanno consentito quindi una generalizzazione della problematica affrontata, ed hanno permesso di definire delle linee guida per la progettazione della luce naturale, riportate nel successivo Cap. 5.

Roma diretta sud giugno al variare di k ore 8

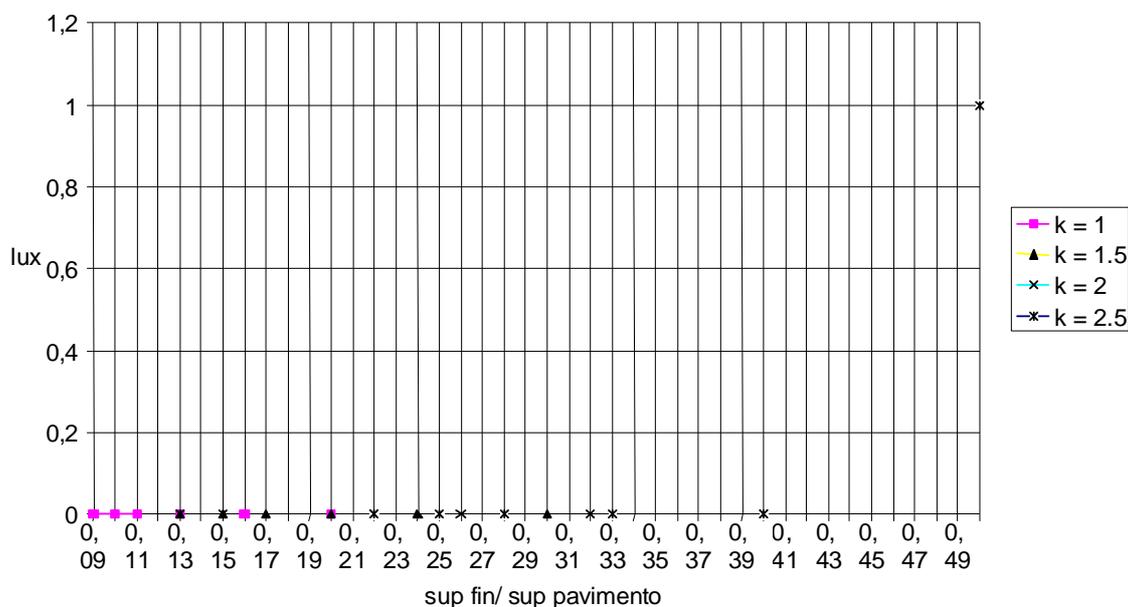


Figura 4.1. Roma, giugno, sud, radiazione diretta, ore 8

Roma diretta sud giugno al variare di k ore 10

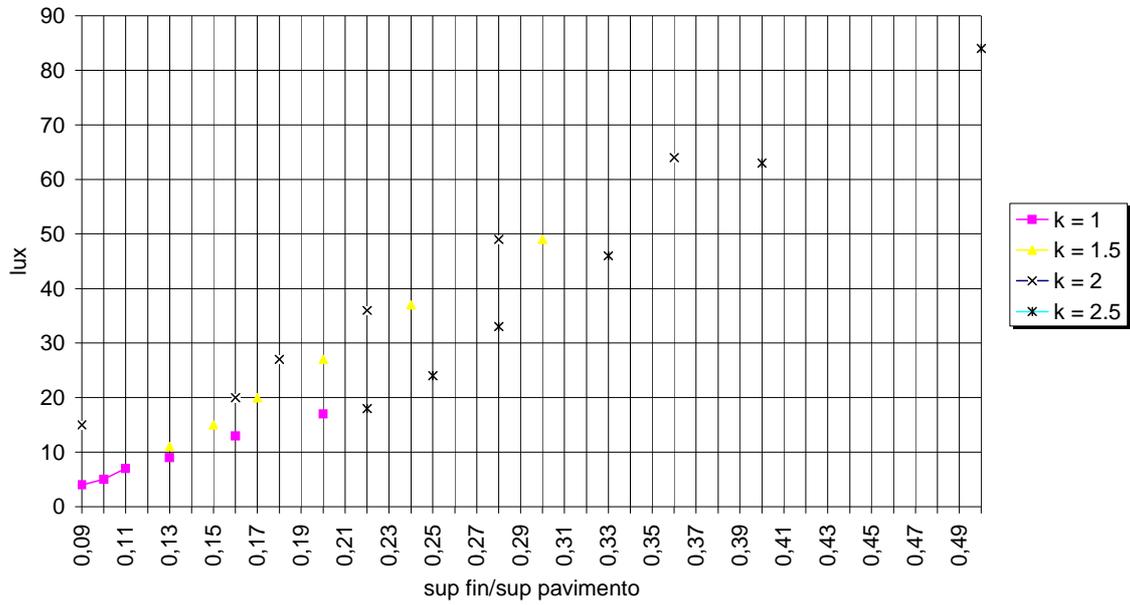


Figura 4.2. Roma, giugno, sud, radiazione diretta, ore 10

Roma diretta sud giugno al variare di K, ore 12

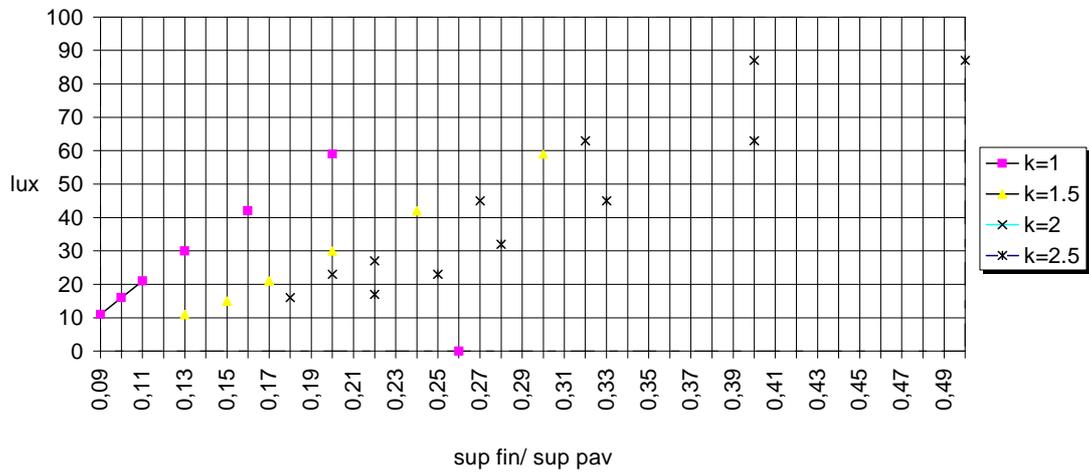


Figura 4.3. Roma, giugno, sud, radiazione diretta, ore 12

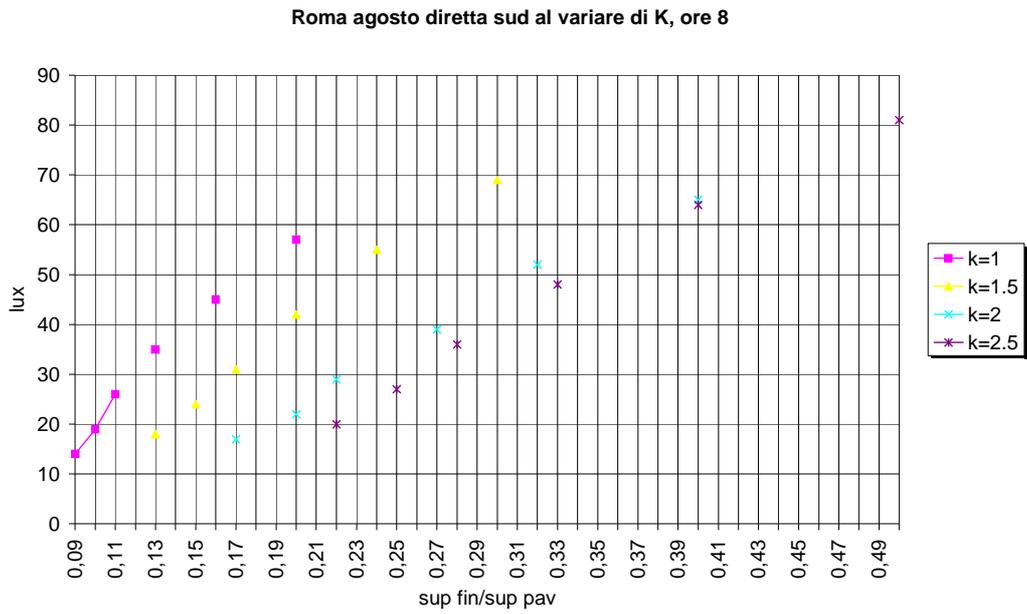


Figura 4.4. Roma, agosto, sud, radiazione diretta, ore 8

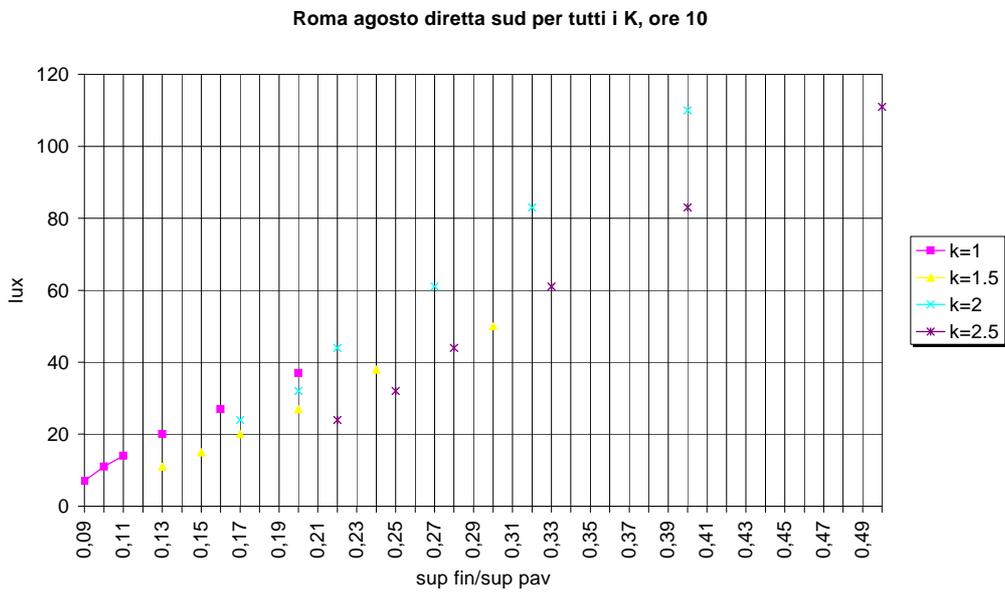


Figura 4.5. Roma, agosto, sud, radiazione diretta, ore 10

Roma agosto diretta sud per tutti i K, ore 11

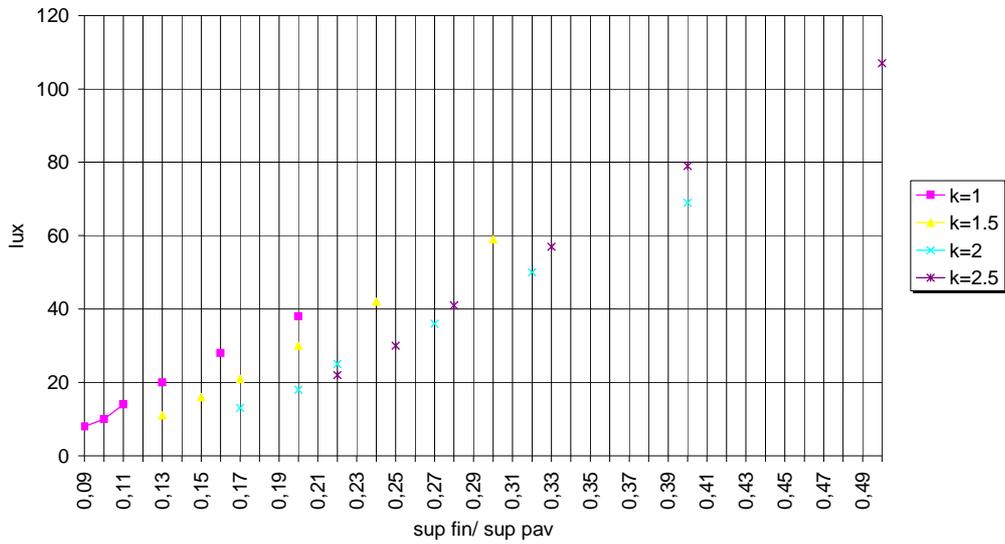


Figura 4.6. Roma, agosto, sud, radiazione diretta, ore 12

Roma novembre diretta sud per tutti i K, ore 8

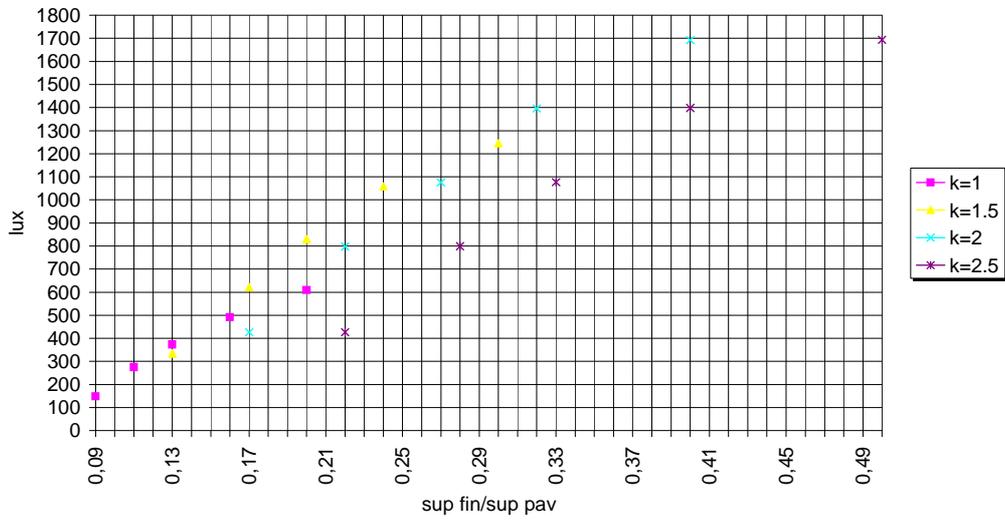


Figura 4.7. Roma, novembre, sud, radiazione diretta, ore 8

Roma novembre diretta sud per tutti i k, ore 10

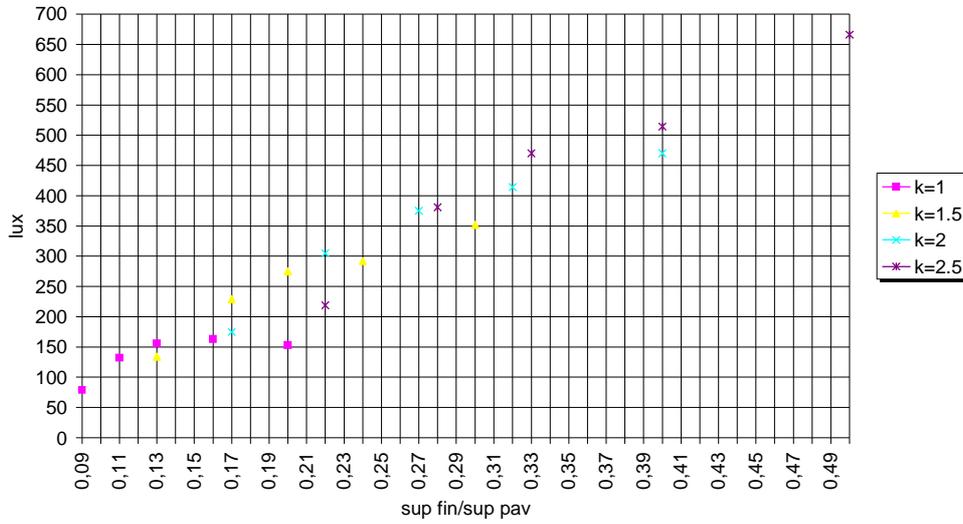


Figura 4.8. Roma, novembre, sud, radiazione diretta, ore 10

Roma novembre diretta sud per tutti i k, ore 12

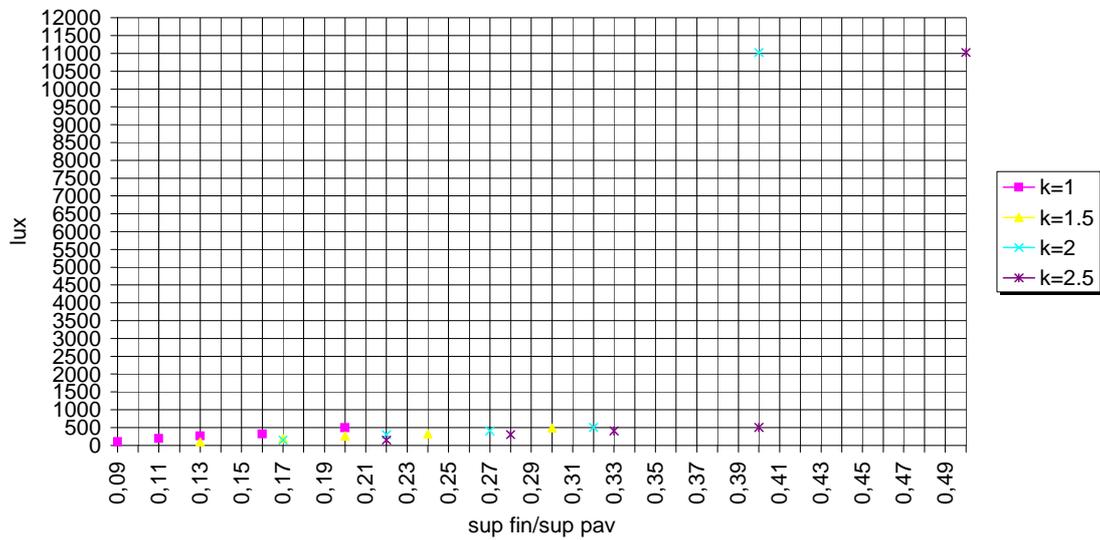


Figura 4.9. Roma, novembre, sud, radiazione diretta, ore 12

Roma giugno totale sud k=1

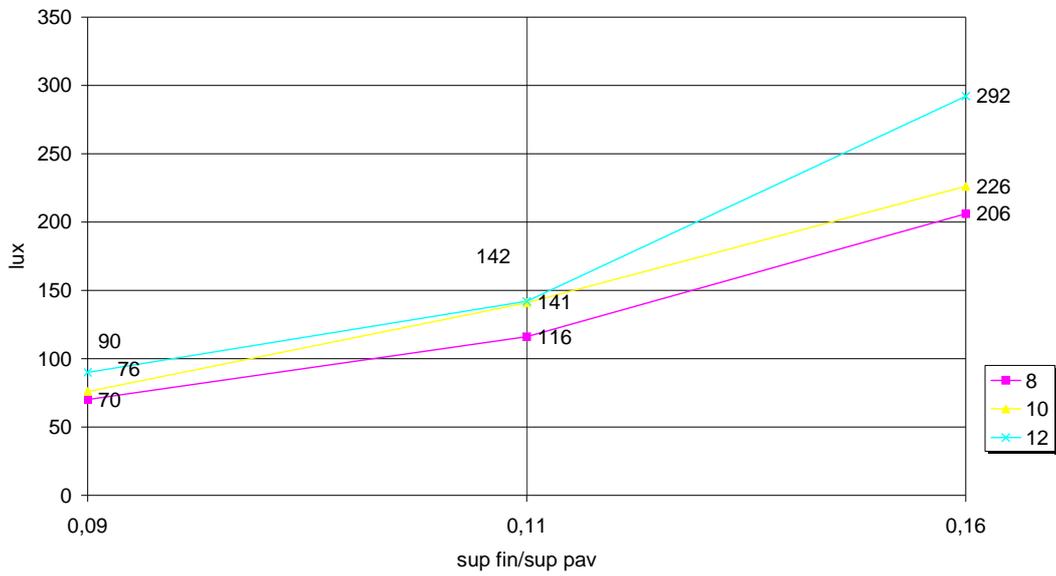


Figura 4.10. Roma, giugno, sud, radiazione totale, K=1

Roma giugno totale sud K=1.5

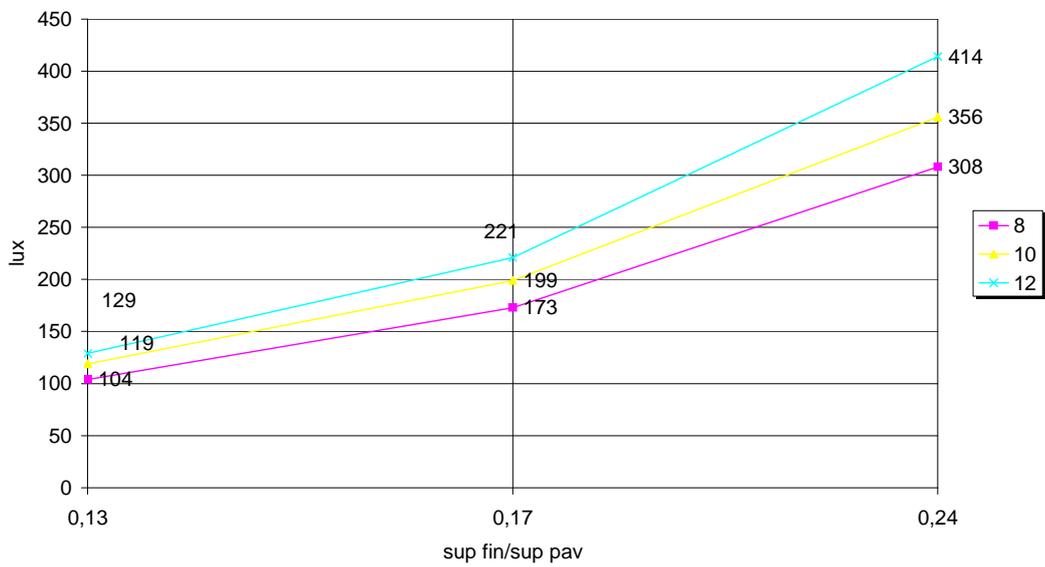


Figura 4.11. Roma, giugno, sud, radiazione totale, K=1.5

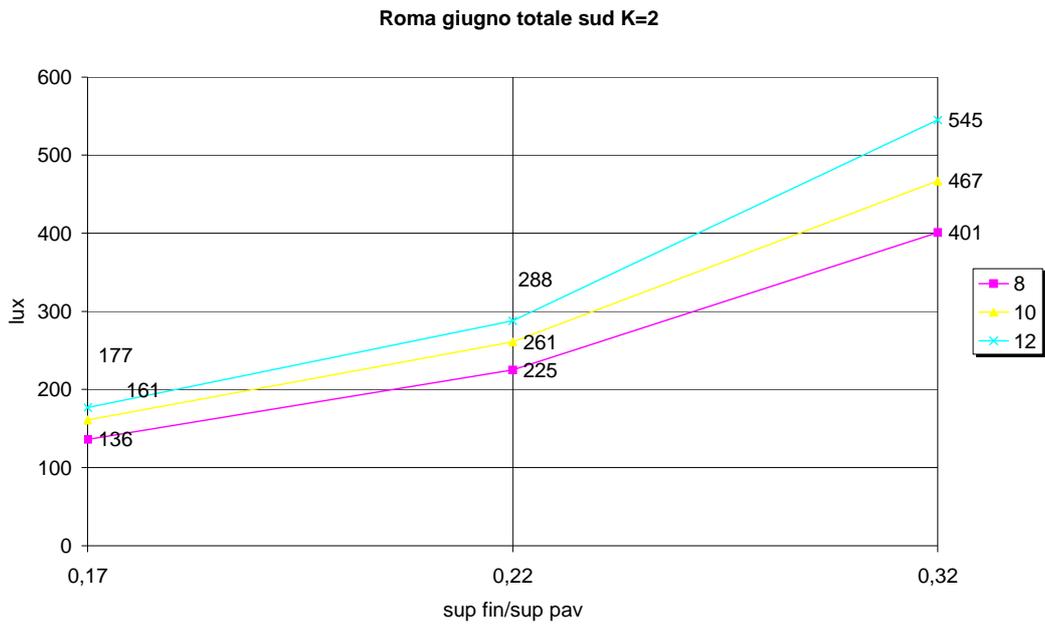


Figura 4.12. Roma, giugno, sud, radiazione totale, K=2

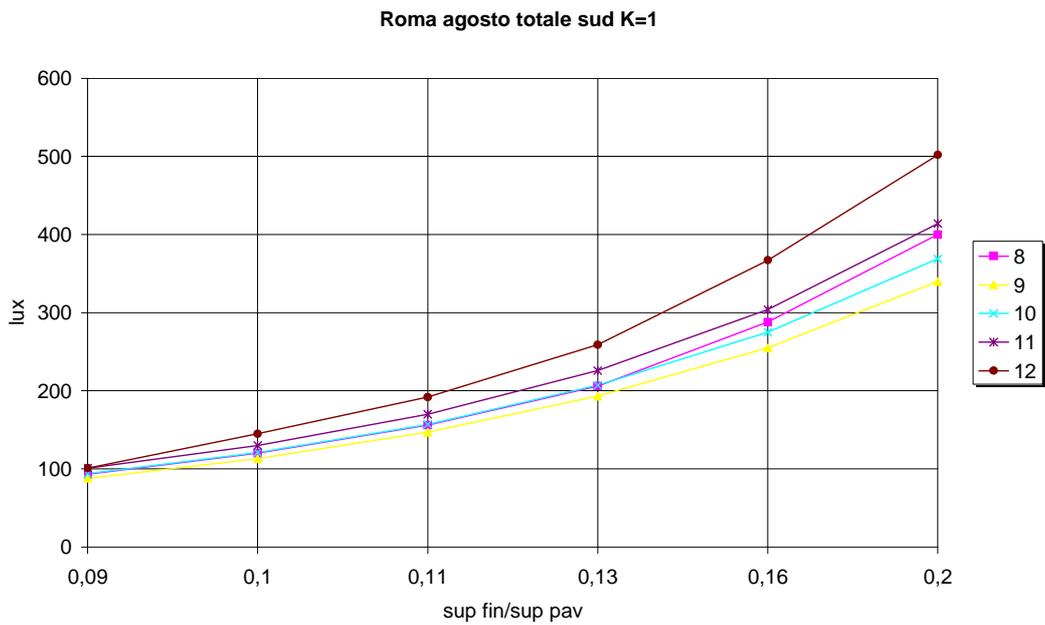


Figura 4.13. Roma, agosto, sud, radiazione totale, K=1

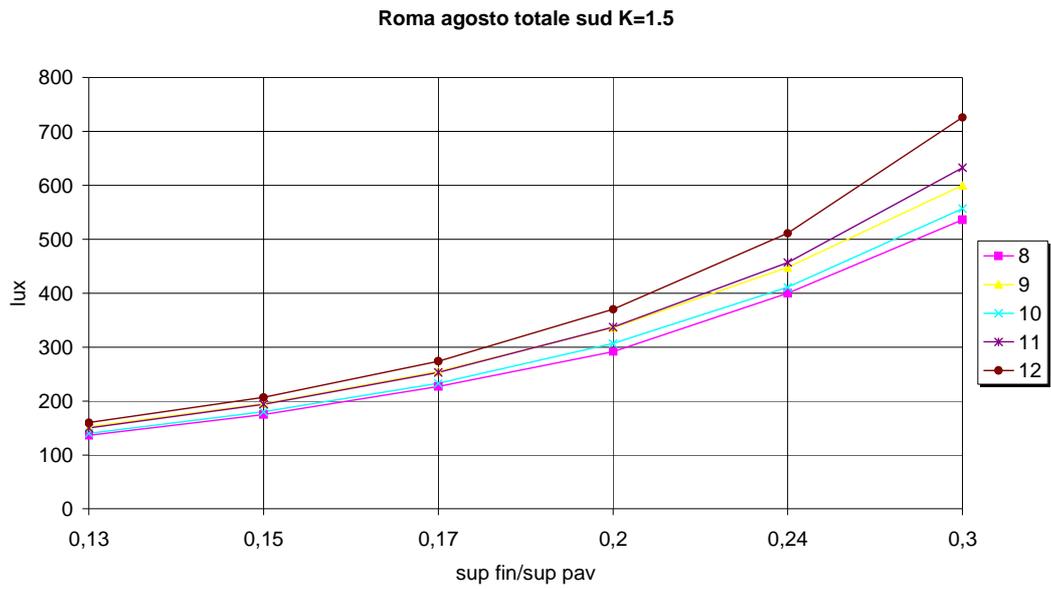


Figura 4.14. Roma, agosto, sud, radiazione totale, K=1.5

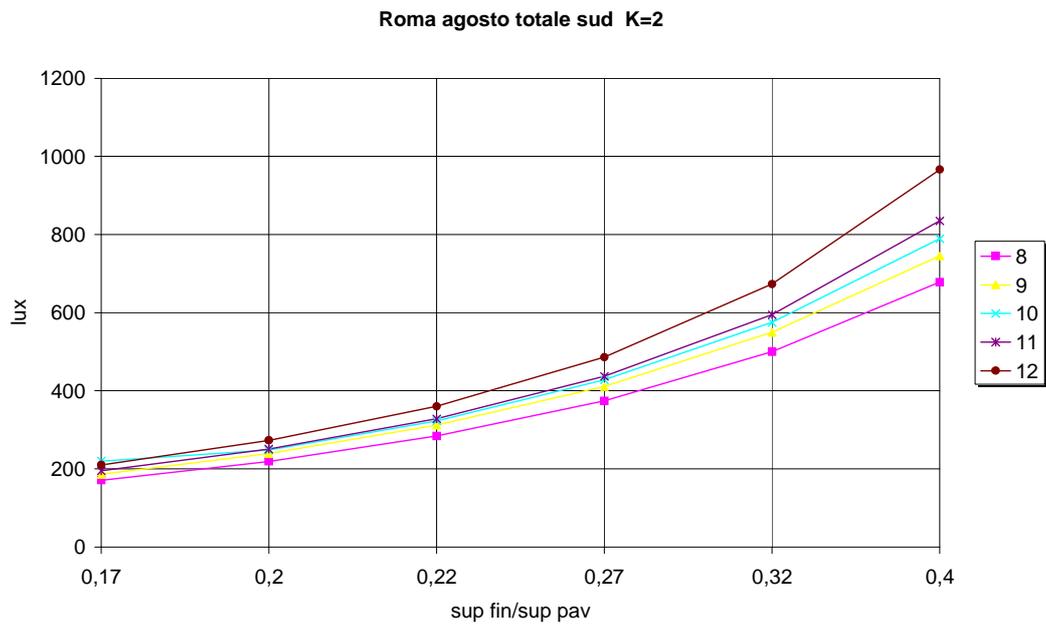


Figura 4.15. Roma, agosto, sud, radiazione totale, K=2

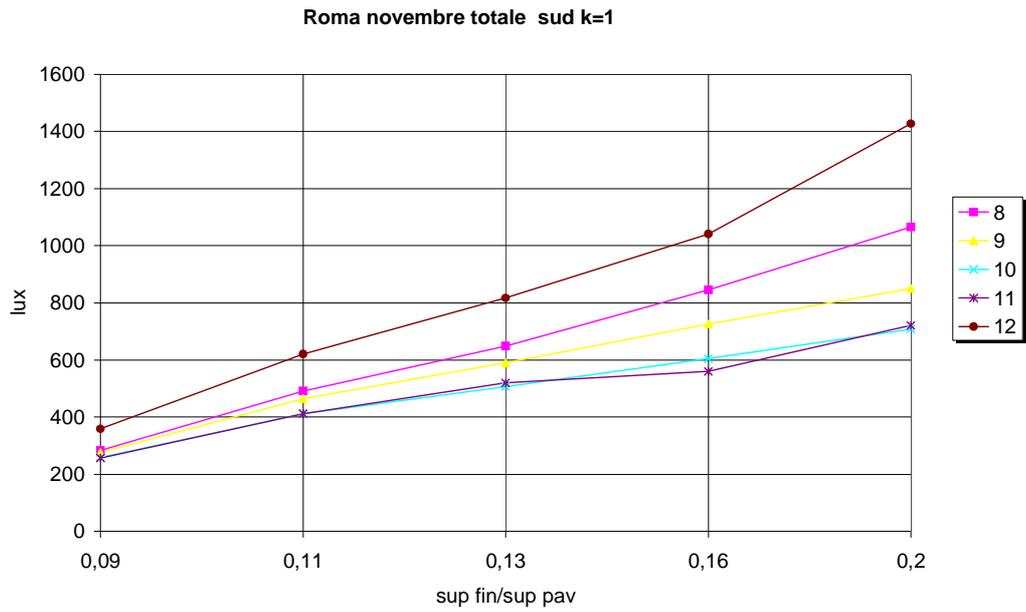


Figura 4.16. Roma, novembre, sud, radiazione totale, K=1

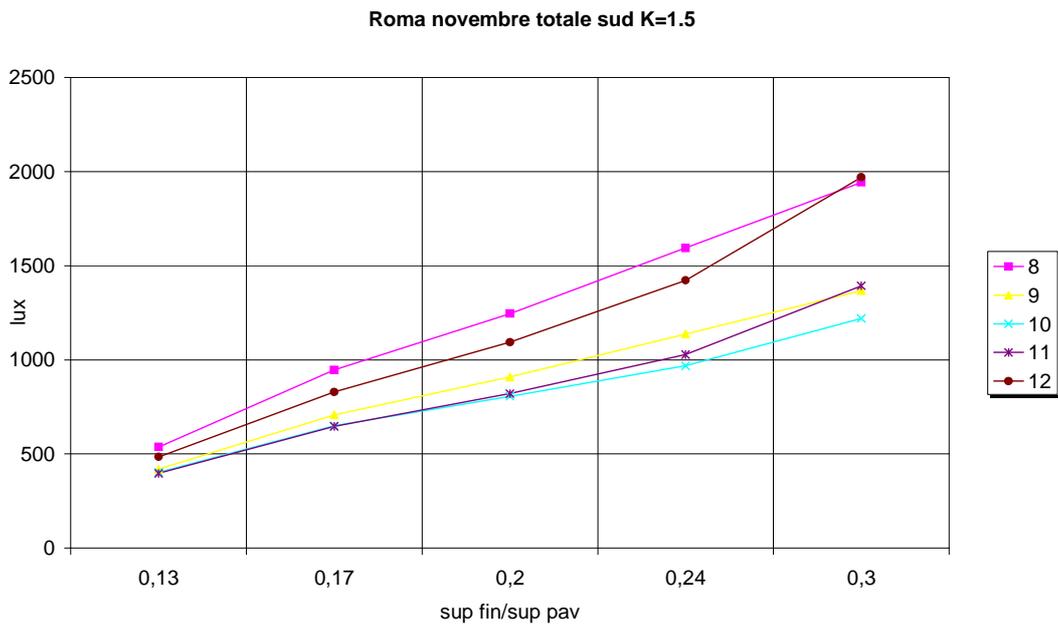


Figura 4.17. Roma, novembre, sud, radiazione totale, K=1.5

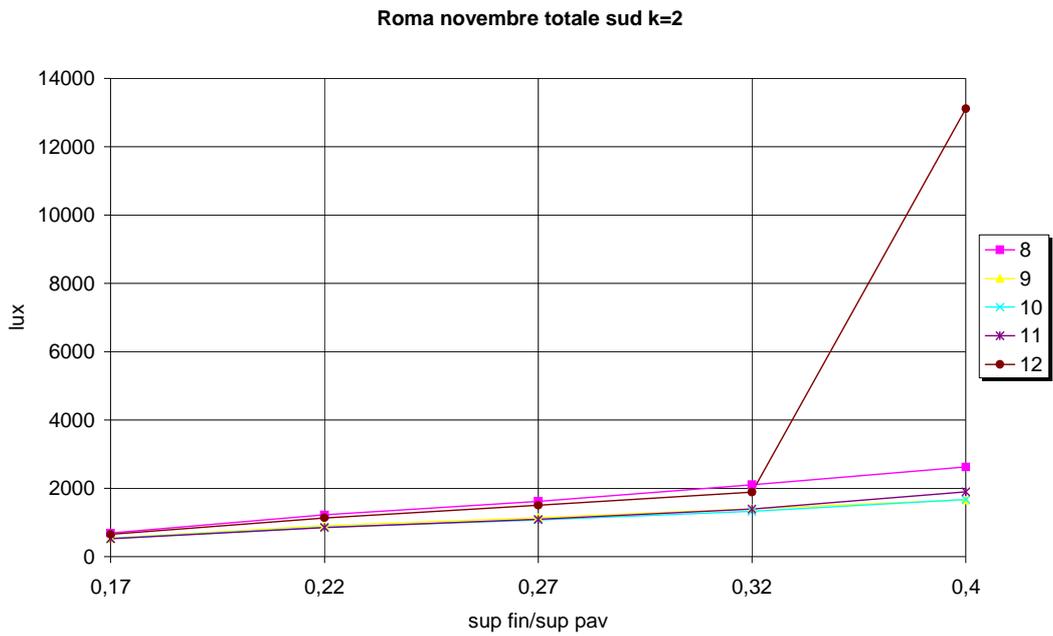


Figura 4.18. Roma, novembre, sud, radiazione totale, K=2

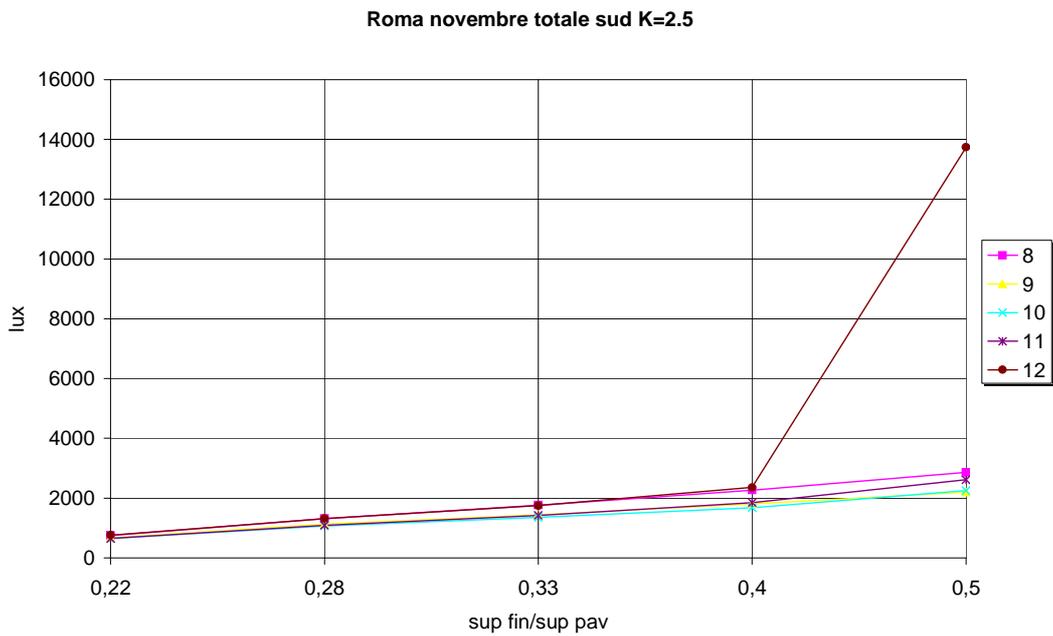


Figura 4.19. Roma, novembre, sud, radiazione totale, K=2.5

Roma giugno diffusa sud K=1

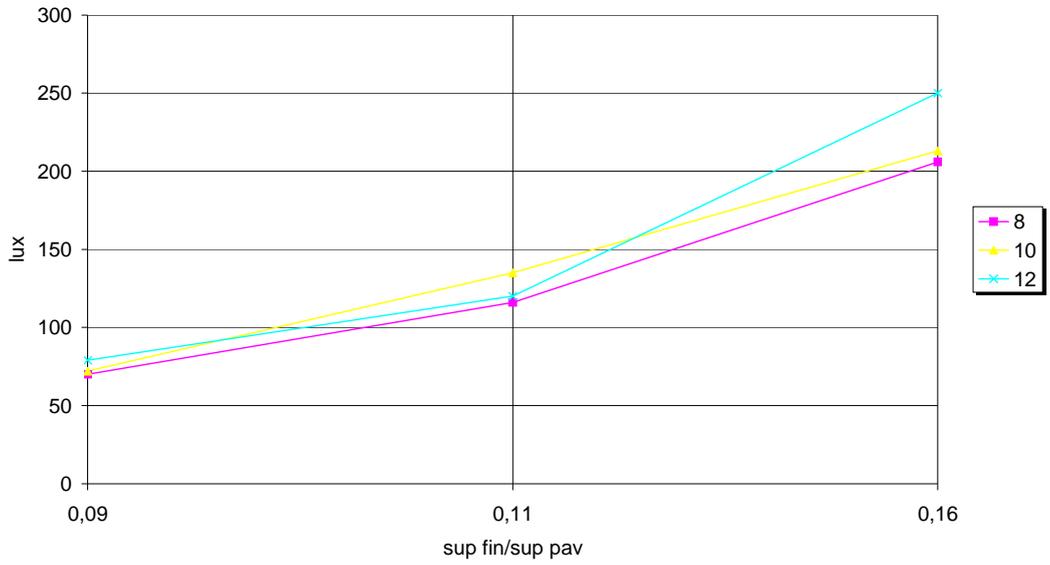


Figura 4.20. Roma, giugno, sud, radiazione diffusa, K=1

Roma giugno diffusa sud K=1.5

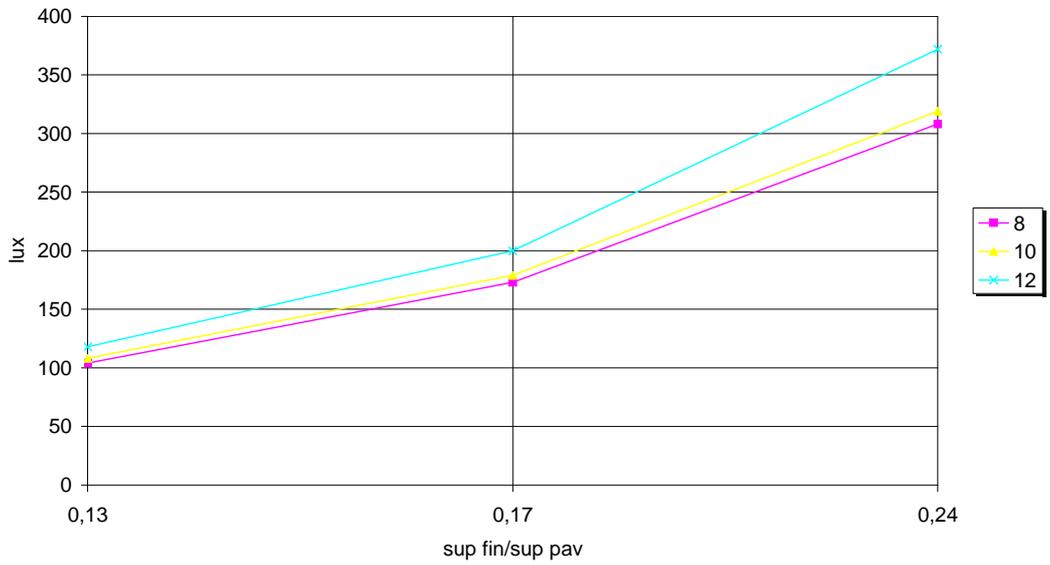


Figura 4.21. Roma, giugno, sud, radiazione diffusa, K=1.5

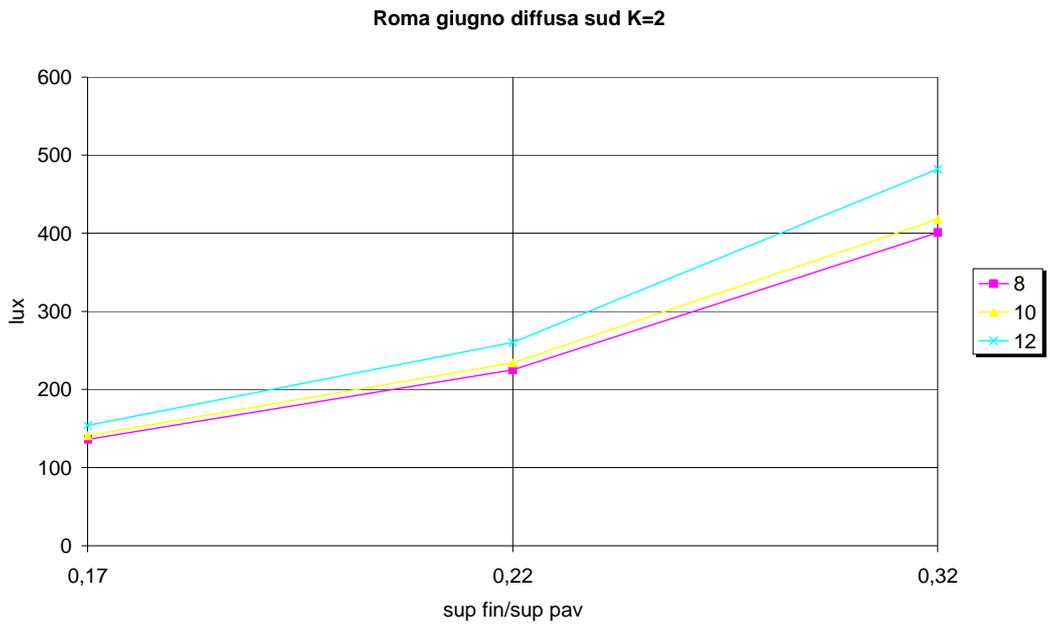


Figura 4.22. Roma, giugno, sud, radiazione diffusa, K=2

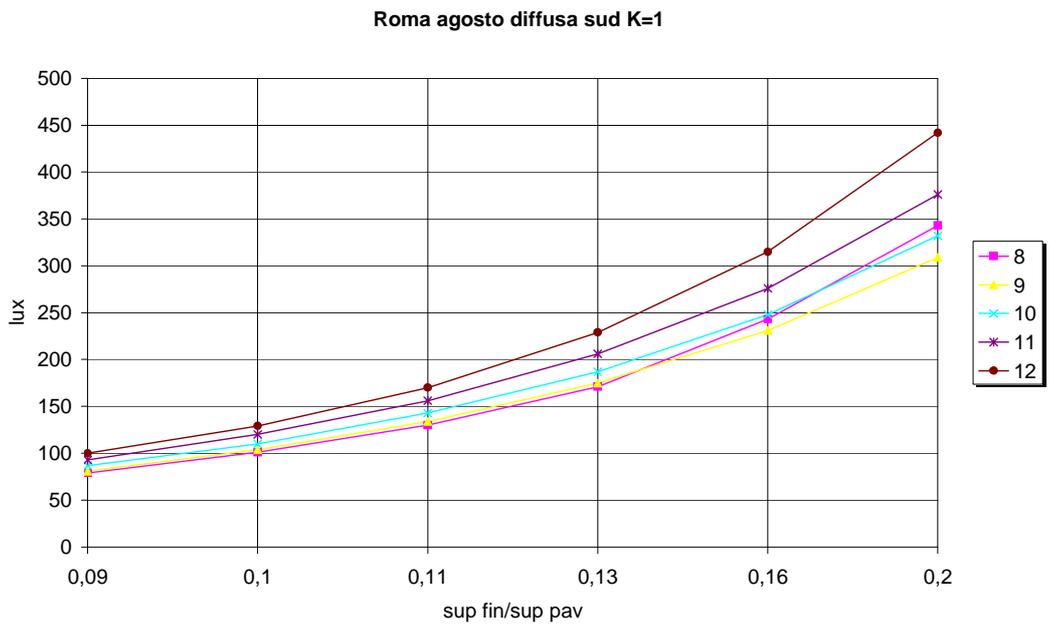


Figura 4.23. Roma, agosto, sud, radiazione diffusa, K=1

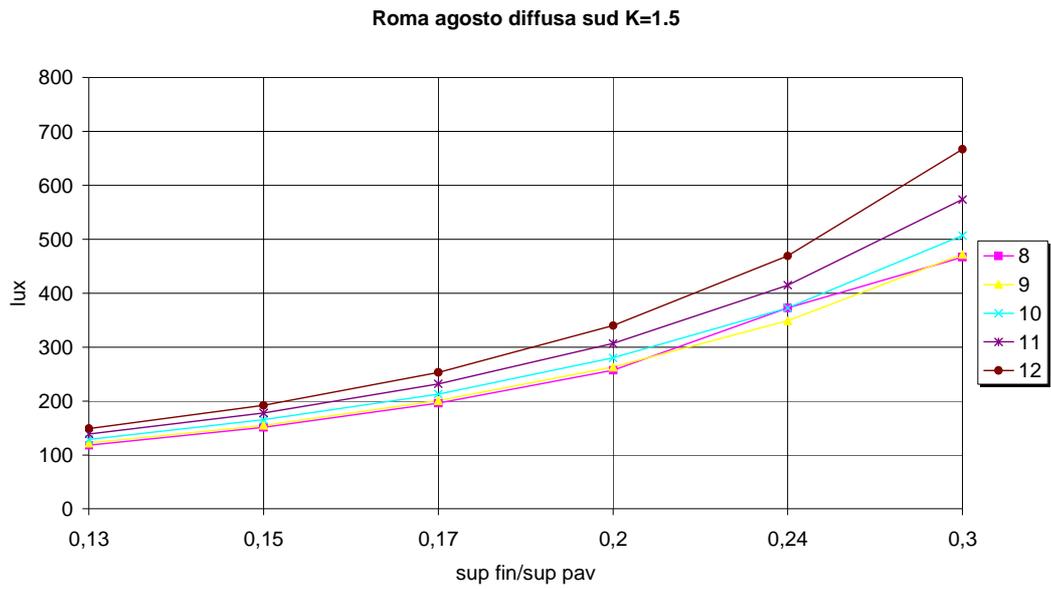


Figura 4.24. Roma, agosto, sud, radiazione diffusa, K=1.5

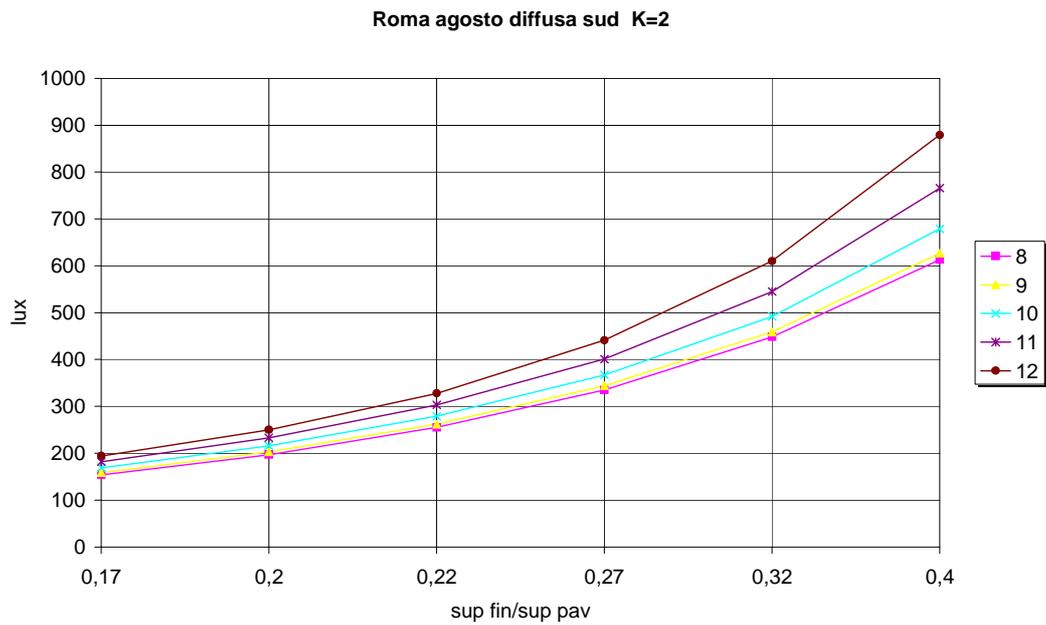


Figura 4.25. Roma, agosto, sud, radiazione diffusa, K=2

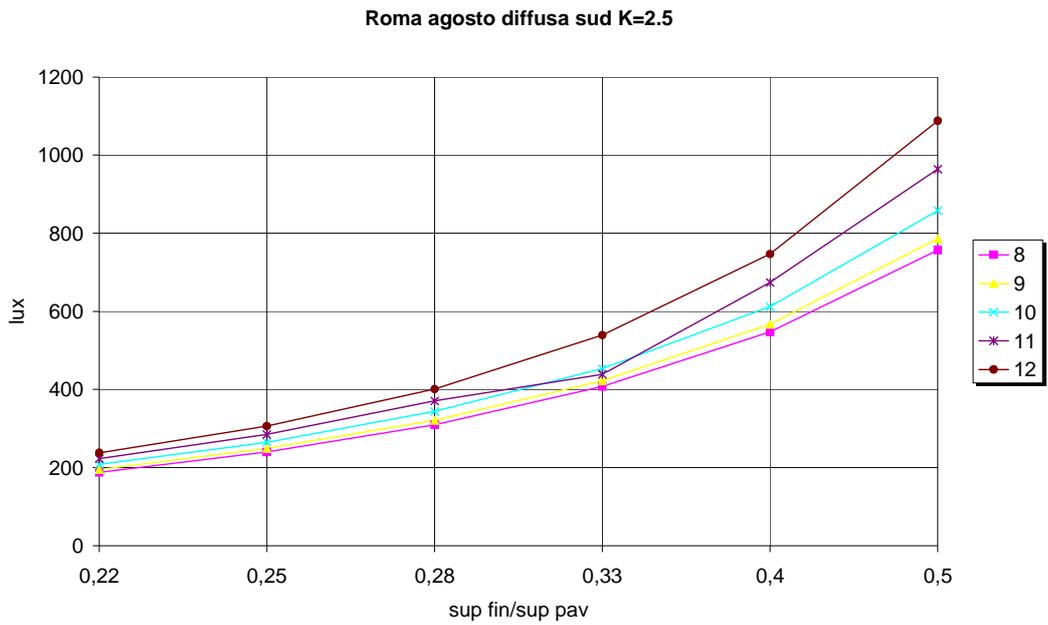


Figura 4.26. Roma, agosto, sud, radiazione diffusa, K=2.5

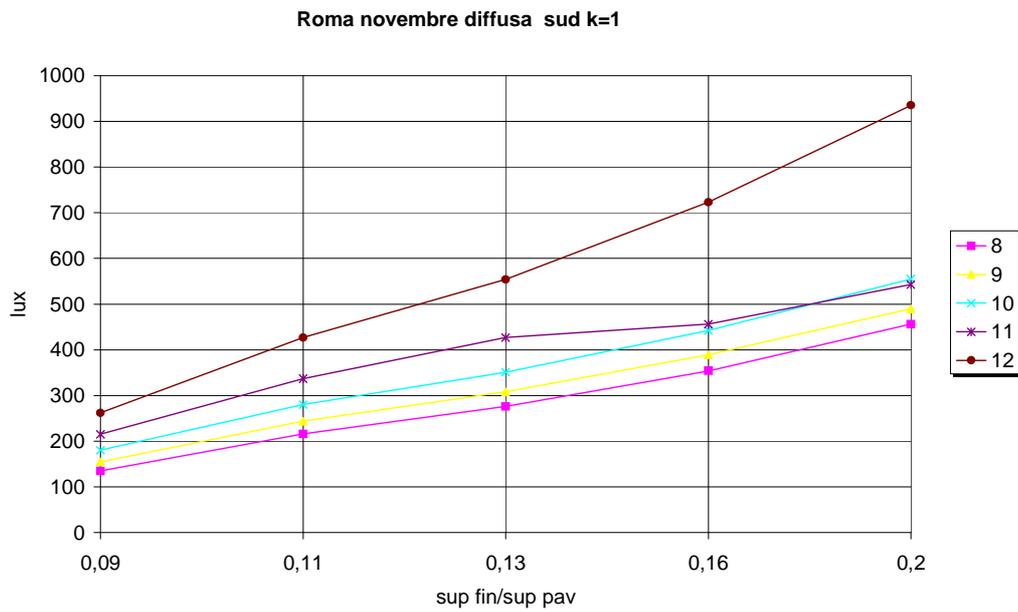


Figura 4.27. Roma, novembre, sud, radiazione diffusa, K=1

Roma novembre diffusa sud K=1.5

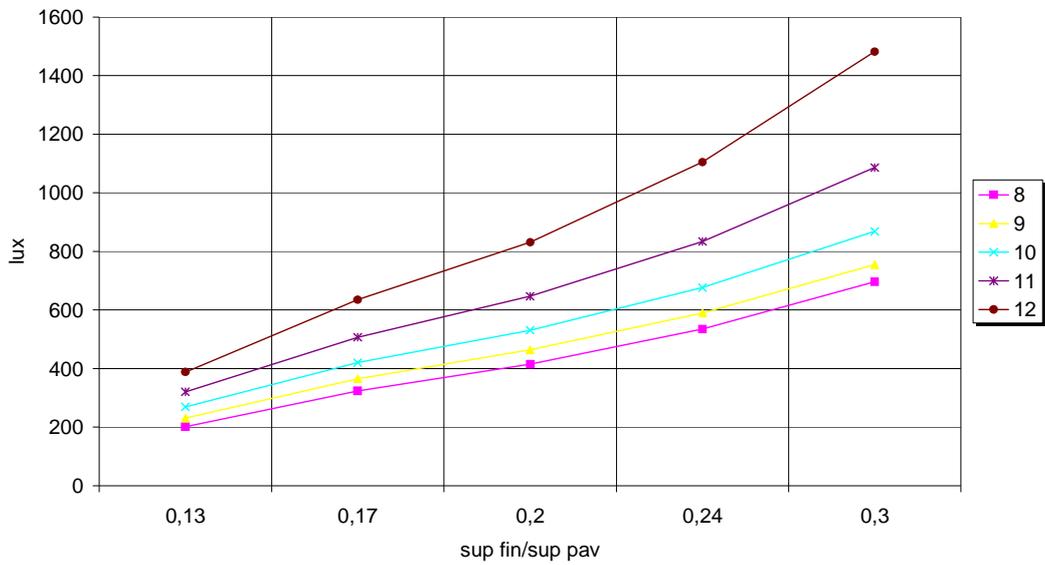


Figura 4.28. Roma, novembre, sud, radiazione diffusa, K=1.5

Roma novembre diffusa sud k=2

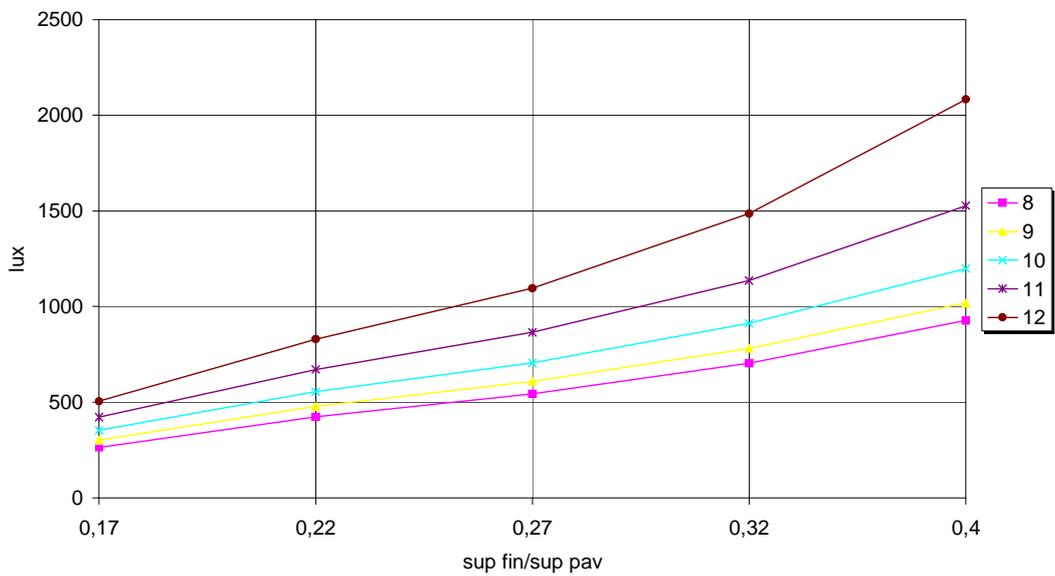


Figura 4.29. Roma, novembre, sud, radiazione diffusa, K=2

Roma giugno diretta sud K=1

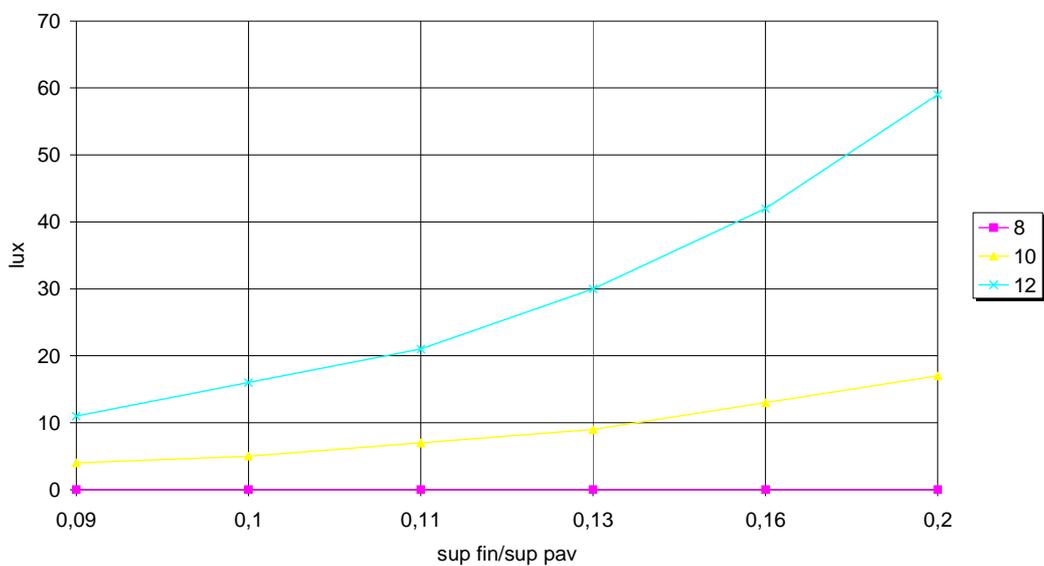


Figura 4.30. Roma, giugno, sud, radiazione diretta, K=1

Roma giugno diretta sud K=1.5

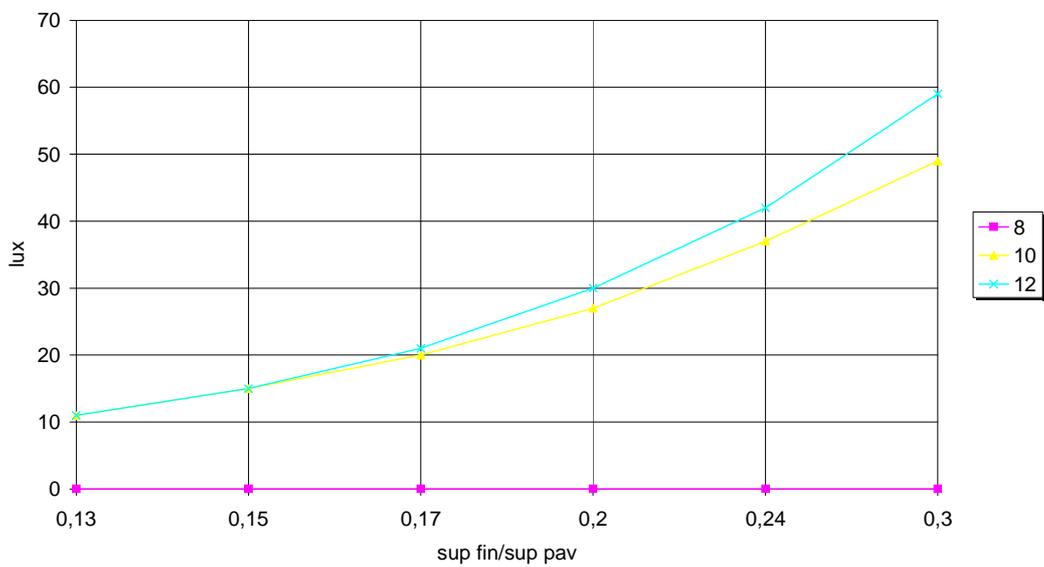


Figura 4.31. Roma, giugno, sud, radiazione diretta, K=1.5

Roma giugno diretta sud K=2

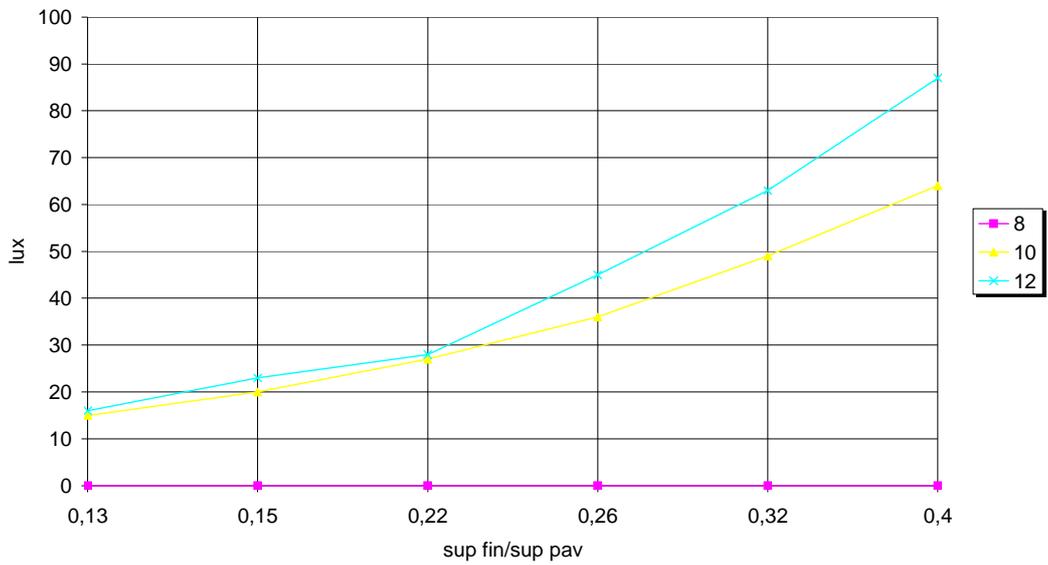


Figura 4.32. Roma, giugno, sud, radiazione diretta, K=2

Roma giugno diretta sud K=2.5

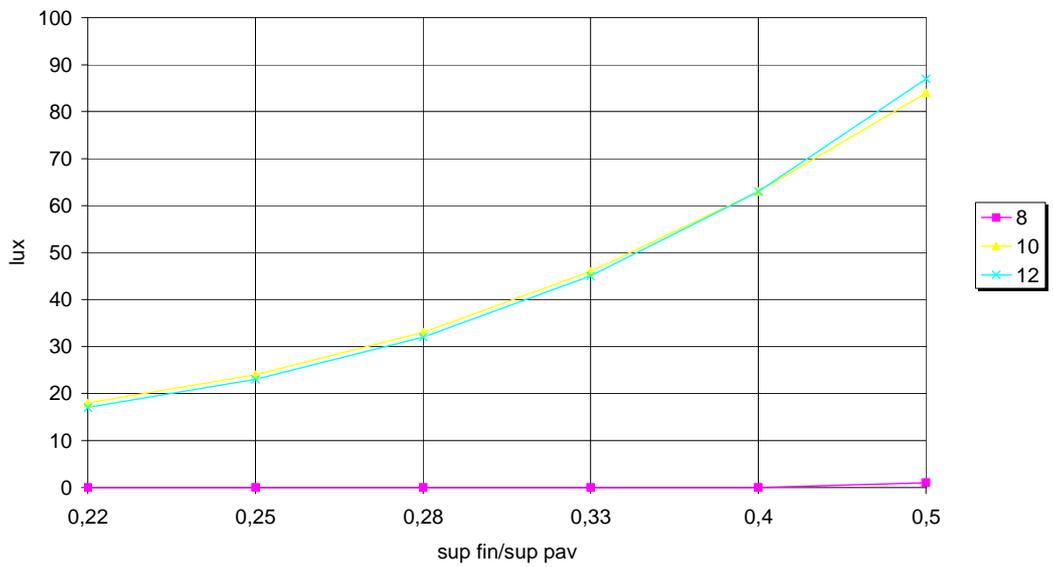


Figura 4.33. Roma, giugno, sud, radiazione diretta, K=2.5

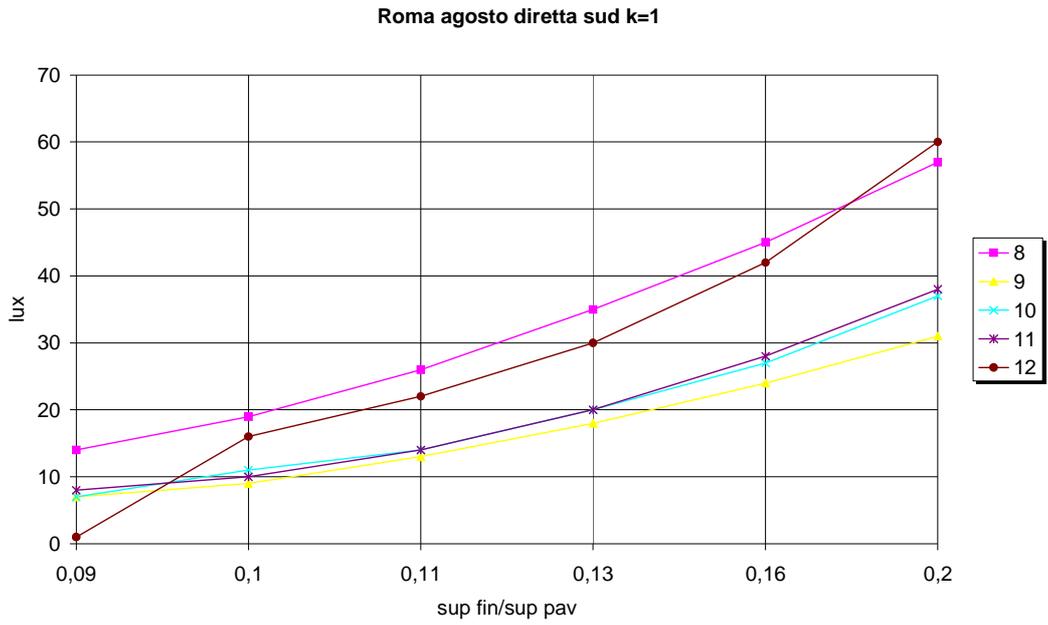


Figura 4.34. Roma, agosto, sud, radiazione diretta, K=1

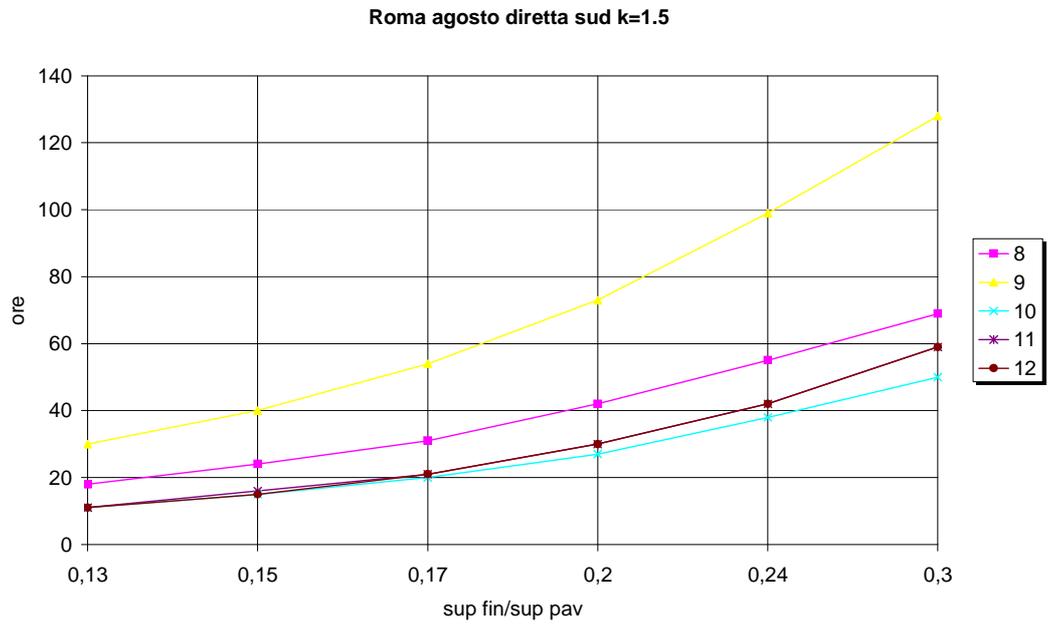


Figura 4.35. Roma, agosto, sud, radiazione diretta, K=1.5

Roma agosto diretta sud K=2

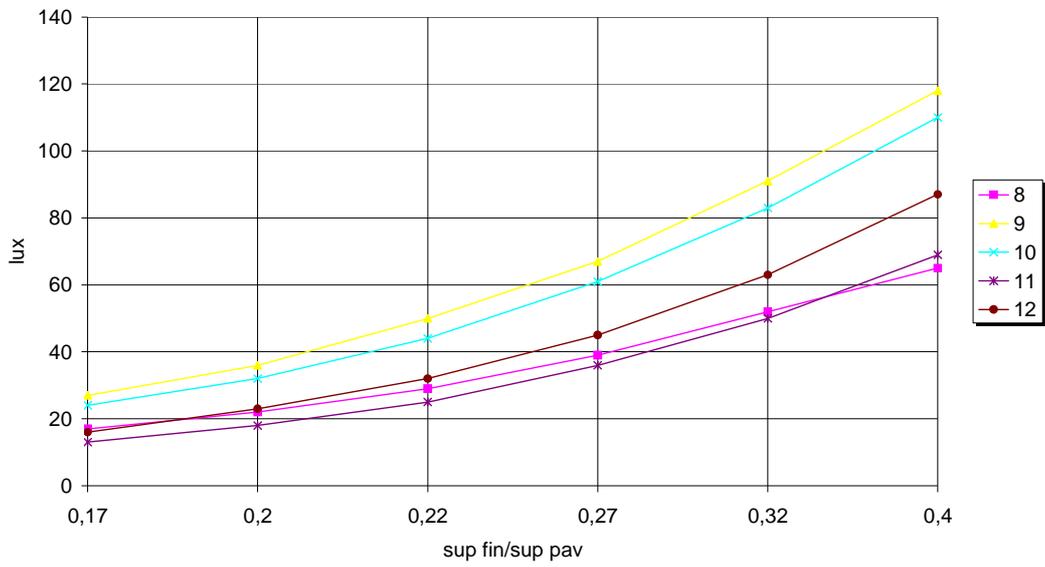


Figura 4.36. Roma, agosto, sud, radiazione diretta, K=2

Roma agosto diretta sud K=2.5

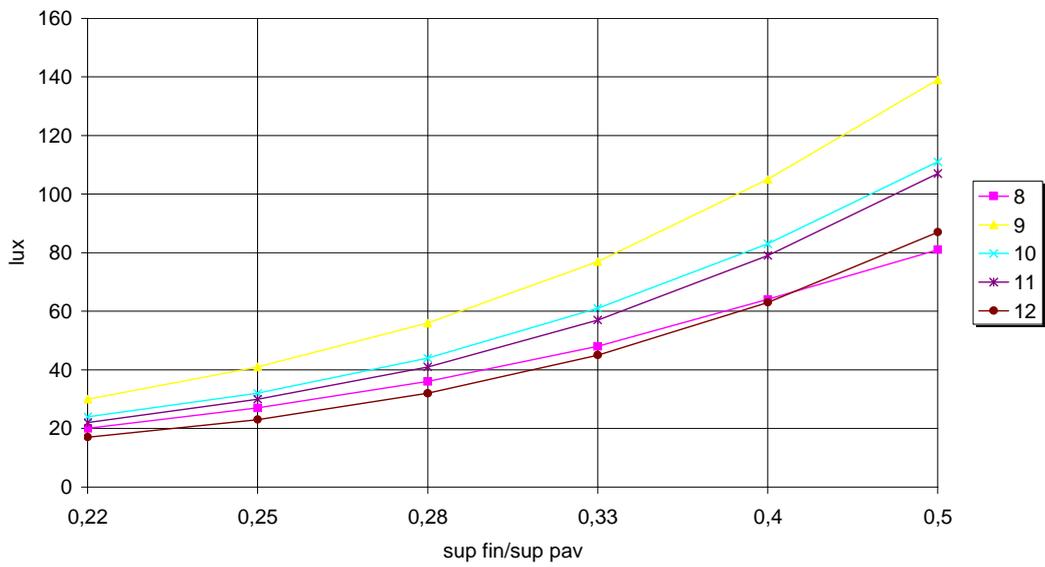


Figura 4.37. Roma, agosto, sud, radiazione diretta, K=2.5

Roma novembre diretta sud K=1

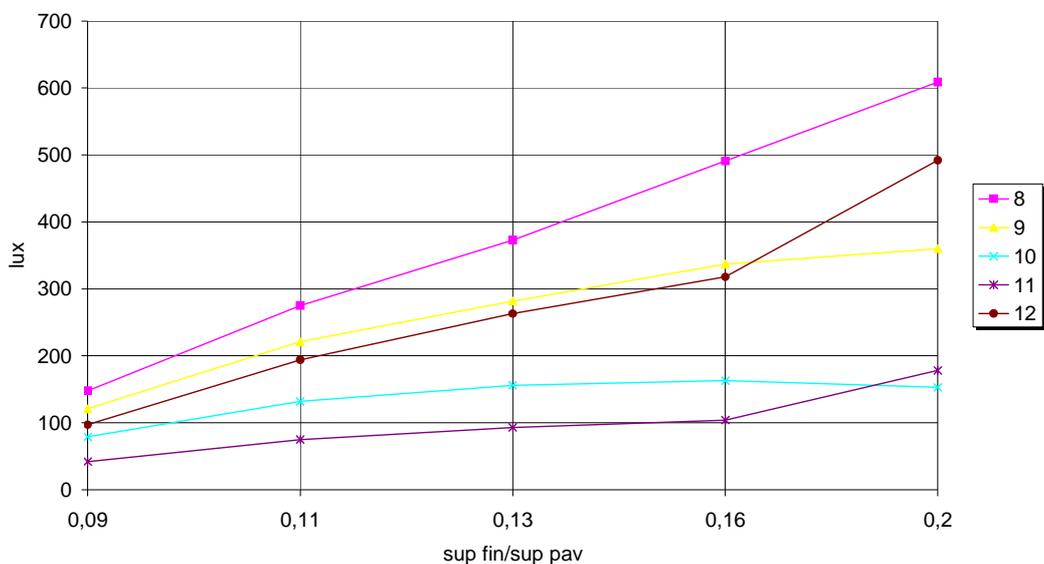


Figura 4.38. Roma, novembre, sud, radiazione diretta, K=1

Roma novembre diretta sud K=1.5

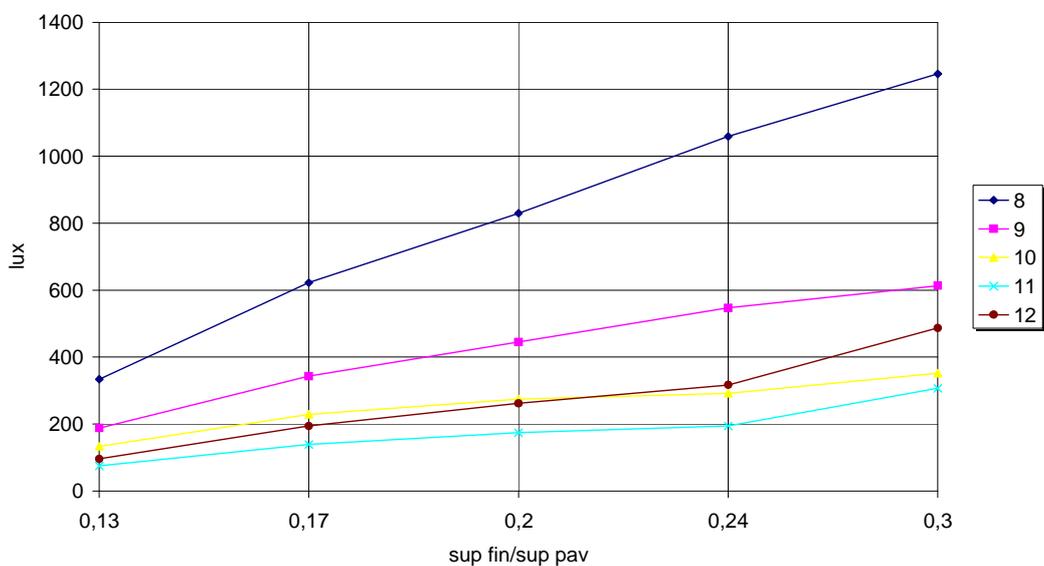


Figura 4.39. Roma, novembre, sud, radiazione diretta, K=1.5

Roma novembre diretta sud K=2

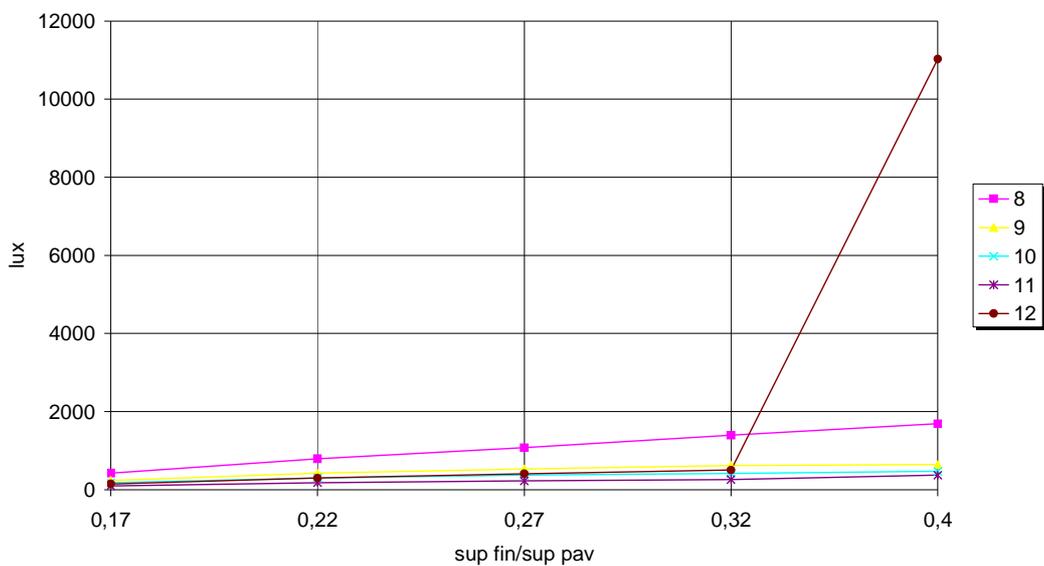


Figura 4.40. Roma, novembre, sud, radiazione diretta, K=2

Roma novembre diffusa sud K=2.5

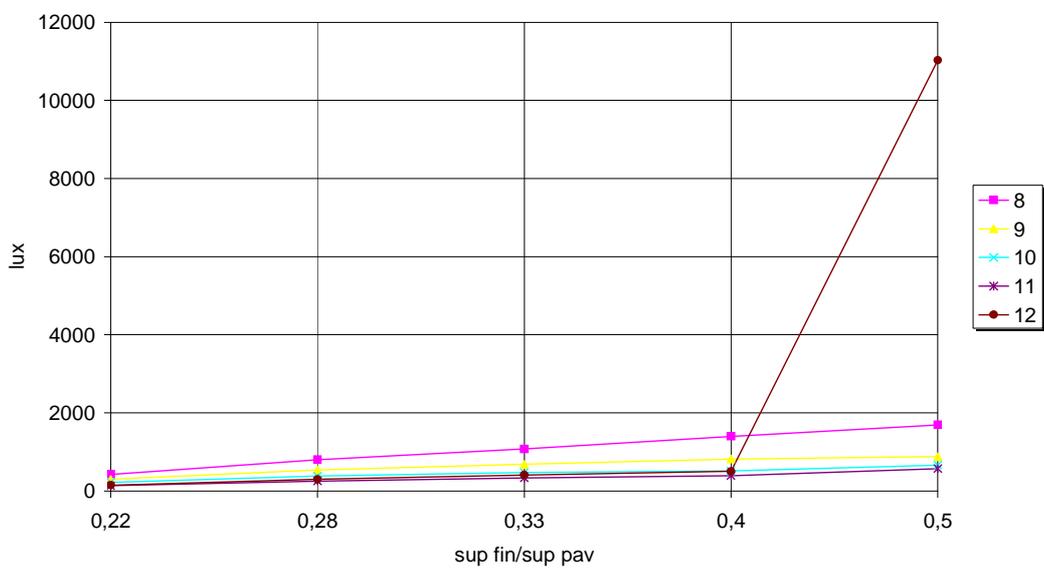


Figura 4.41. Roma, novembre, sud, radiazione diretta, K=2.5

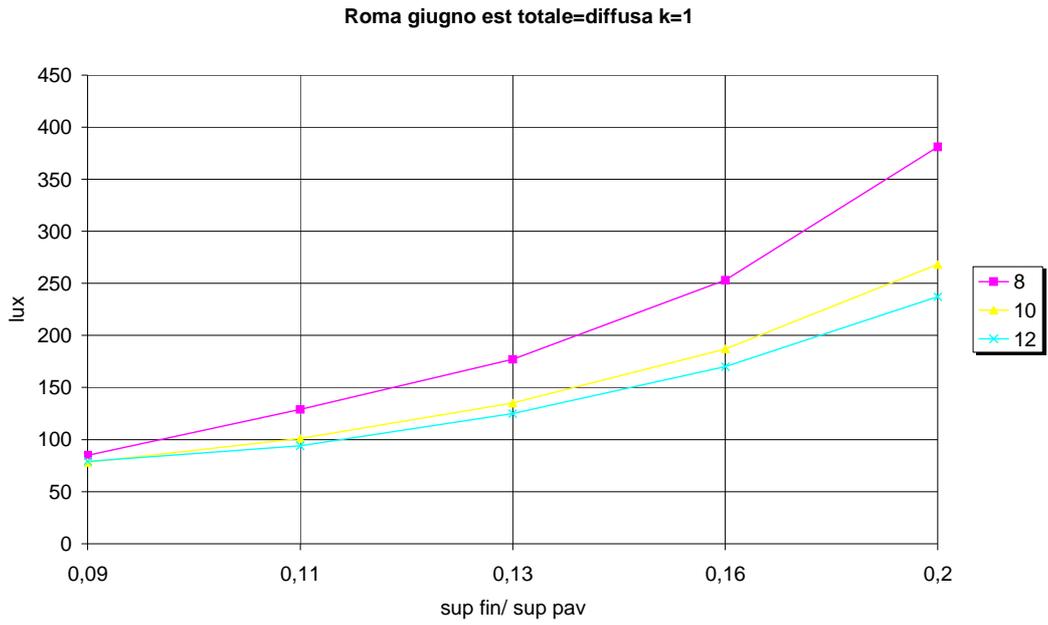


Figura 4.42. Roma, giugno, est, radiazione totale, K=1

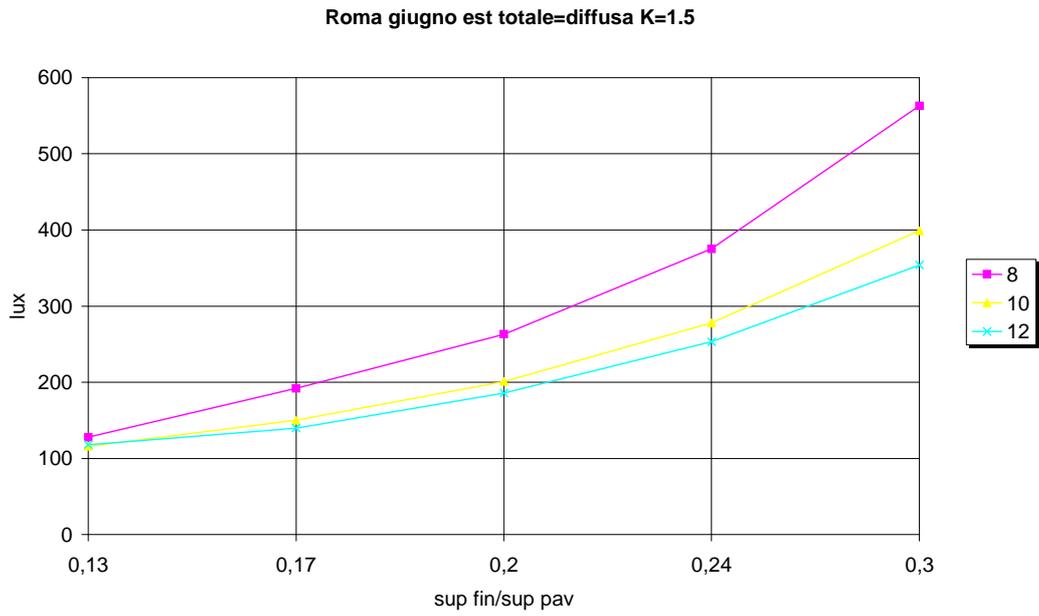


Figura 4.43. Roma, giugno, est, radiazione totale, K=1.5

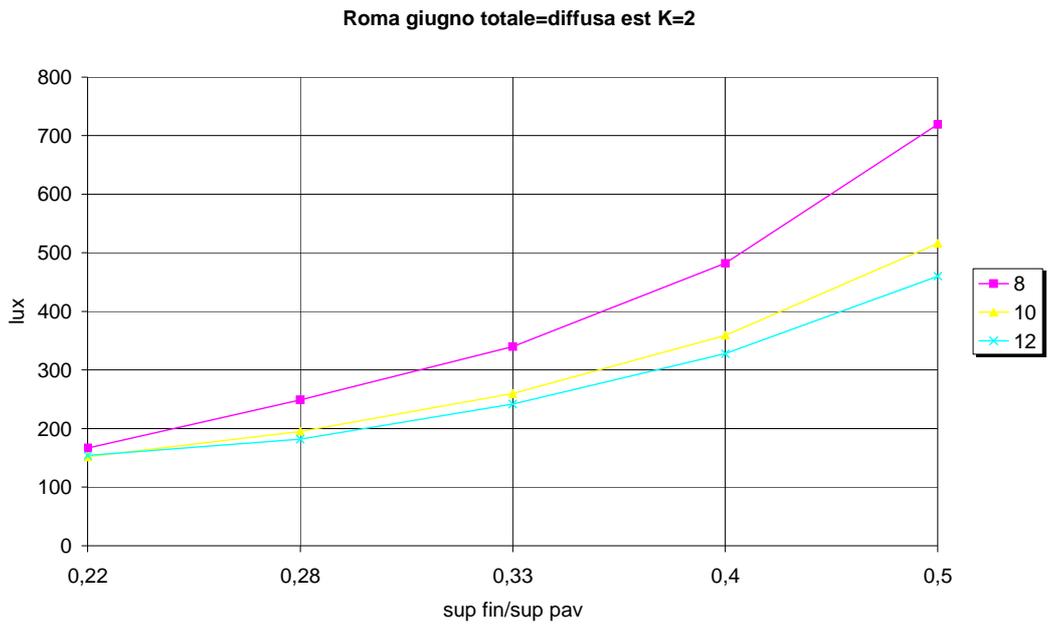


Figura 4.44. Roma, giugno, est, radiazione totale, K=2

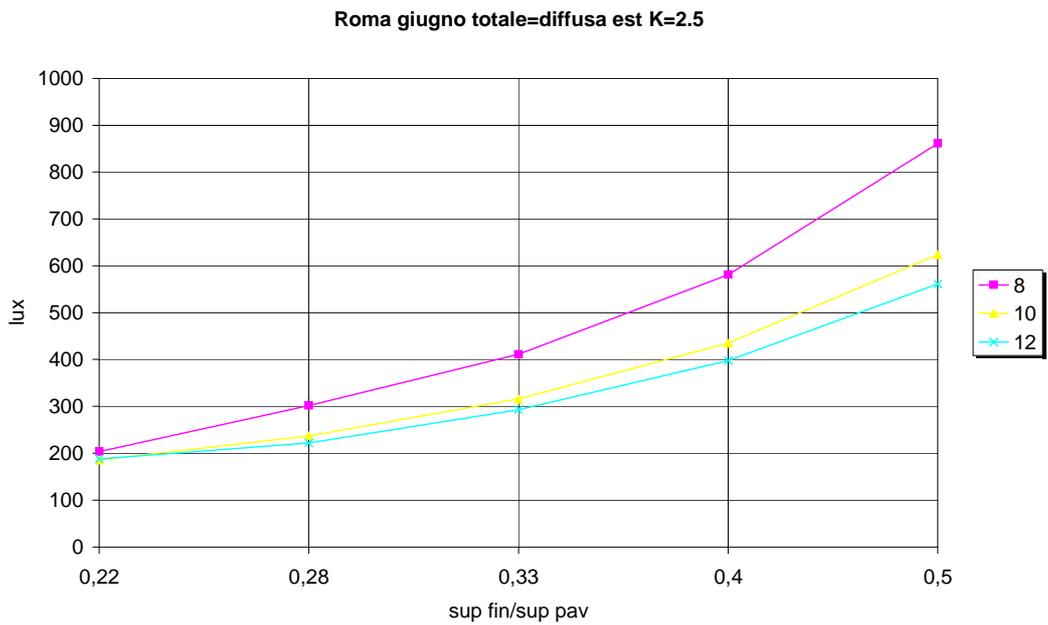


Figura 4.45. Roma, giugno, est, radiazione totale, K=2.5

Roma agosto totale=diffusa est K=1

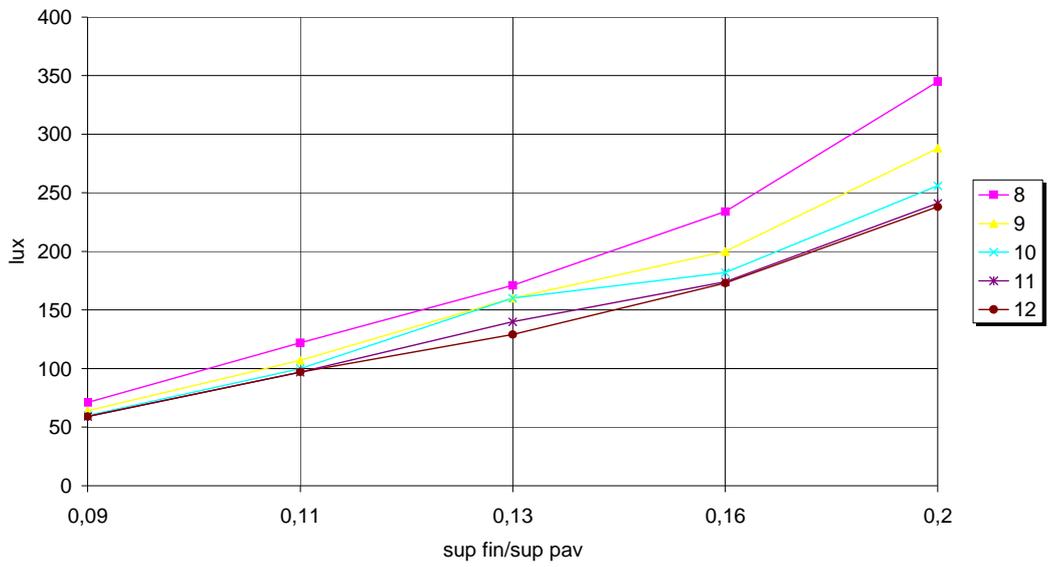


Figura 4.46. Roma, agosto, est, radiazione totale, K=1

Roma agosto totale=diffusa est K=1.5

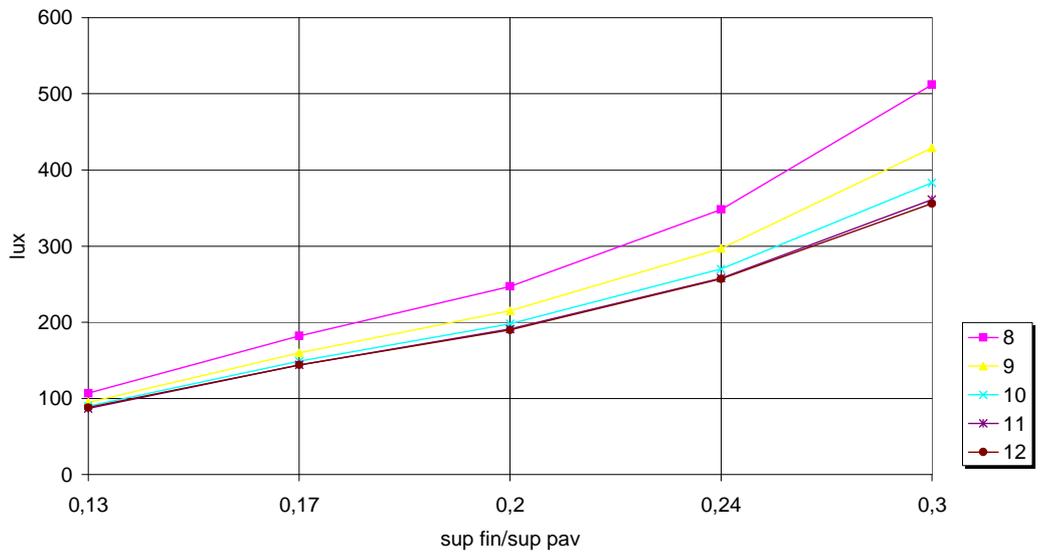


Figura 4.47. Roma, agosto, est, radiazione totale, K=1.5

Roma agosto totale=diffusa est K=2

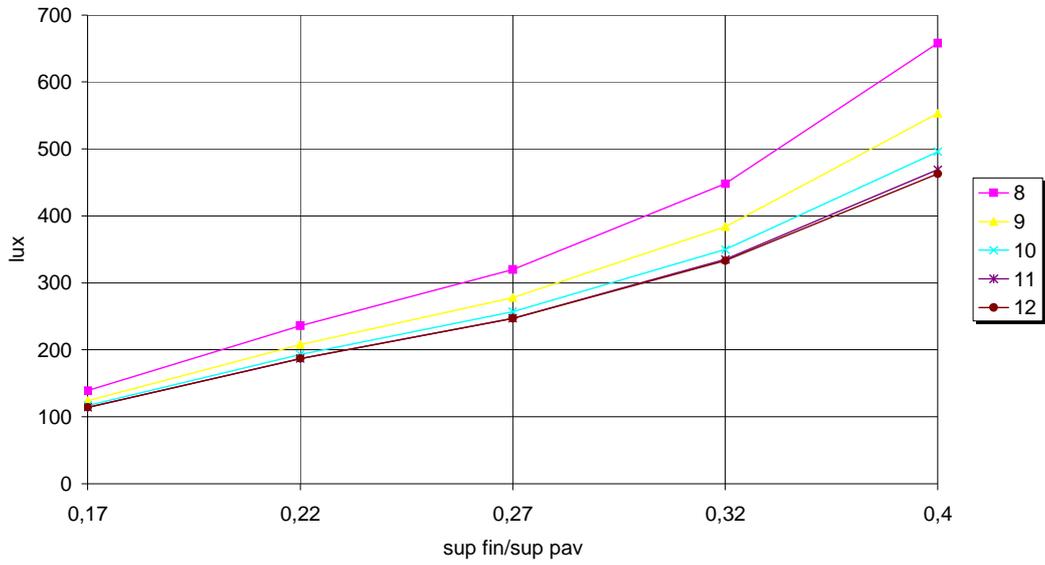


Figura 4.48. Roma, agosto, est, radiazione totale, K=2

Roma agosto totale=diffusa est K=2.5

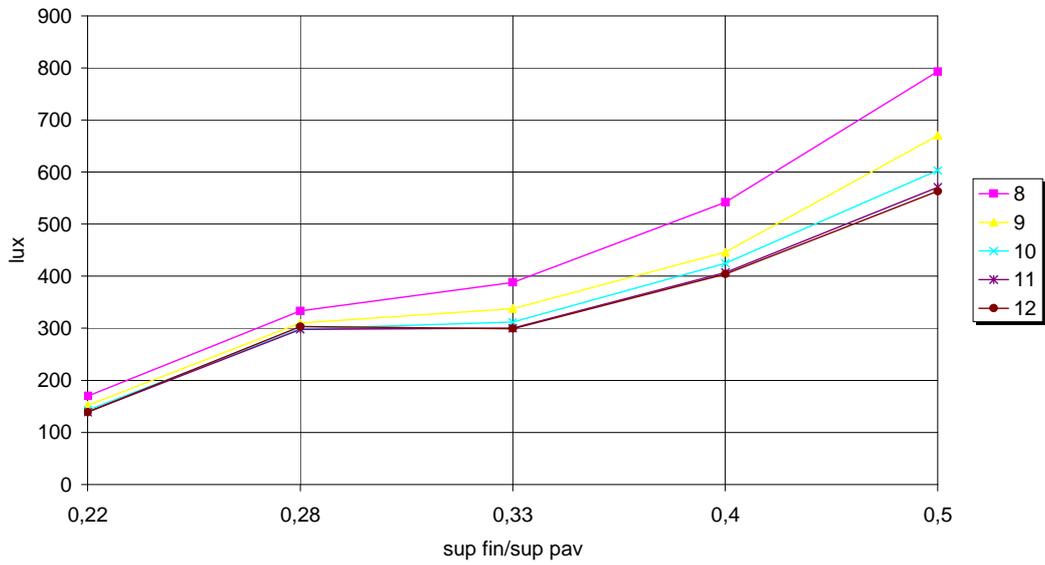


Figura 4.49. Roma, agosto, est, radiazione totale, K=2.5

Roma novembre totale=diffusa est K=1

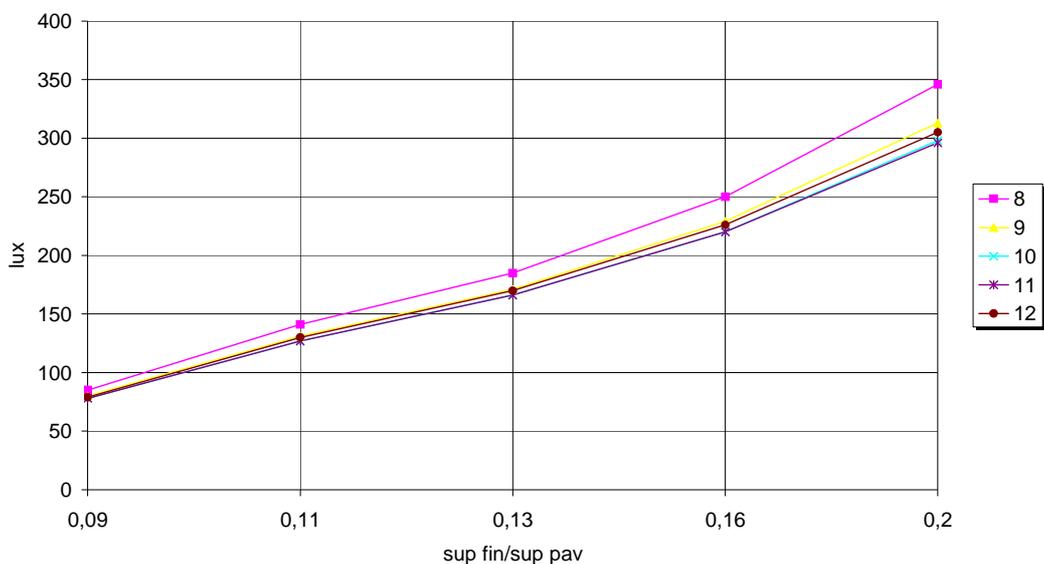


Figura 4.50. Roma, novembre, est, radiazione totale, K=1

Roma novembre totale=diffusa est K=1.5

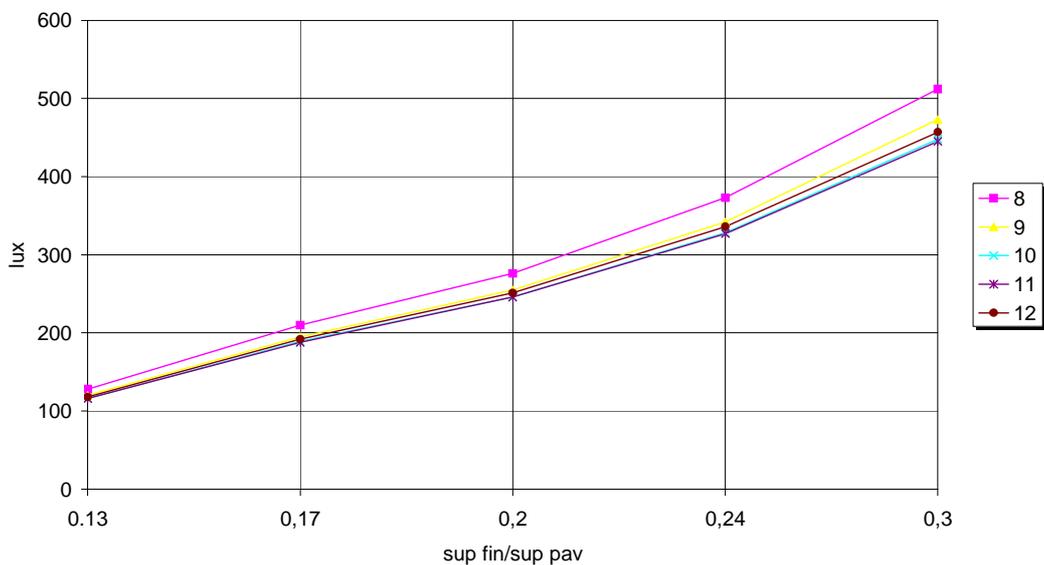


Figura 4.51. Roma, novembre, est, radiazione totale, K=1.5

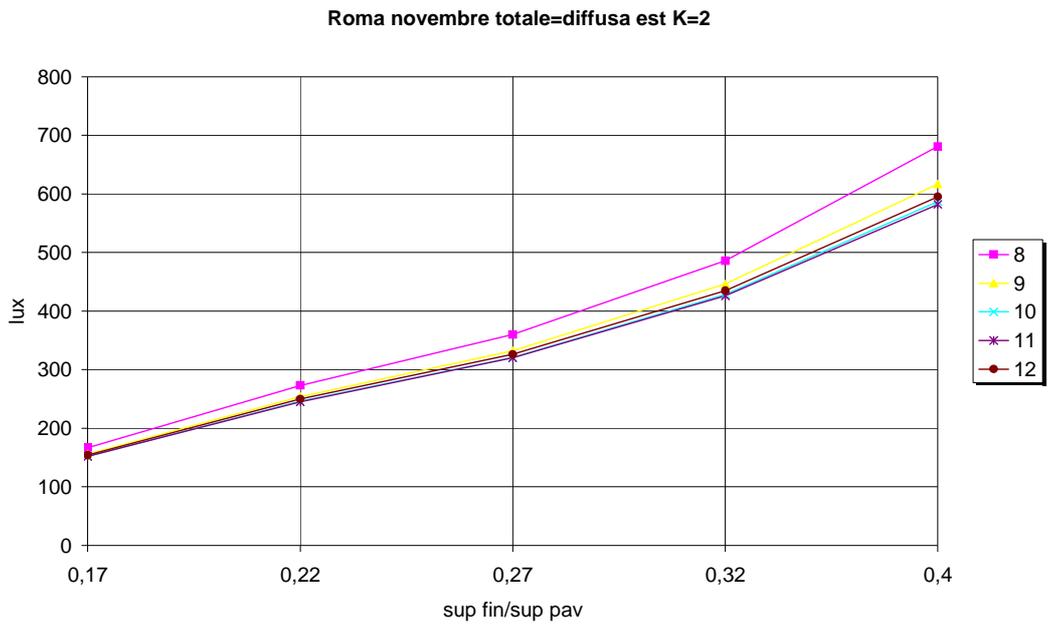


Figura 4.52. Roma, novembre, est, radiazione totale, K=2

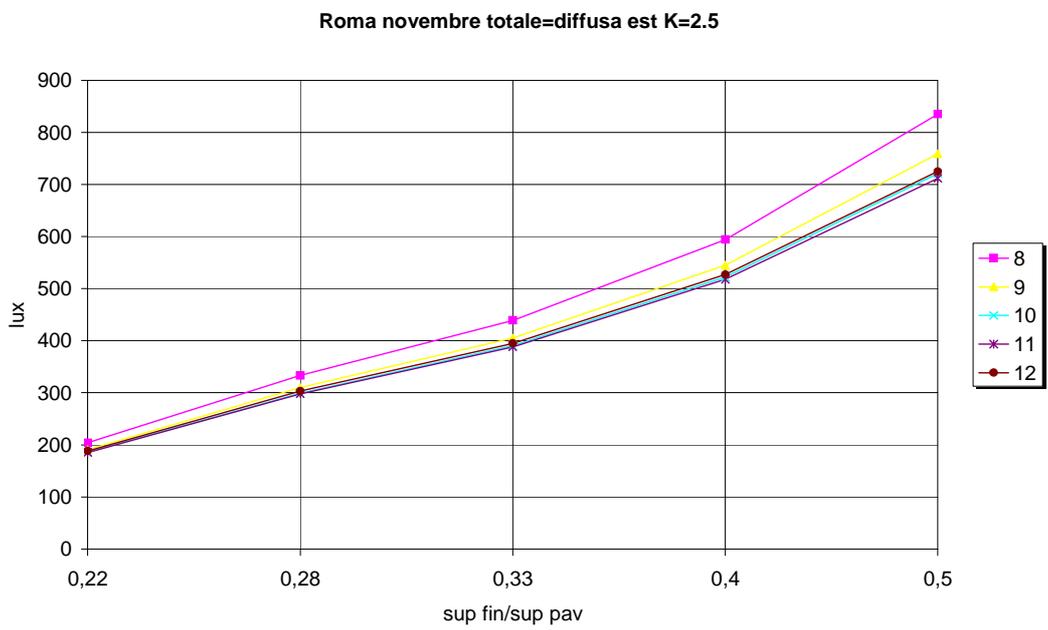


Figura 4.52. Roma, novembre, est, radiazione totale, K=2.5

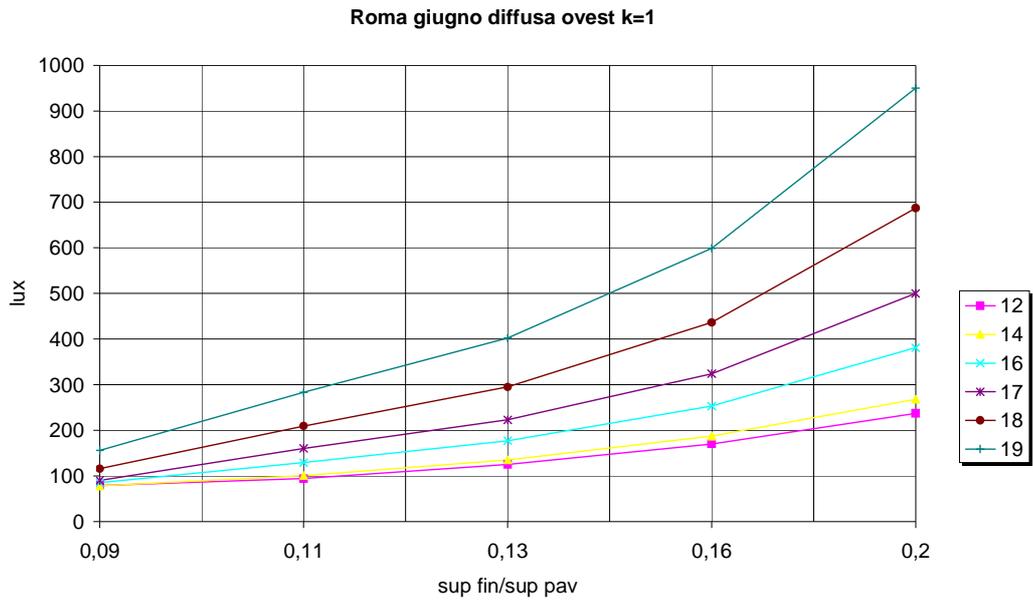


Figura 4.53. Roma, giugno, ovest, radiazione diffusa, K=1

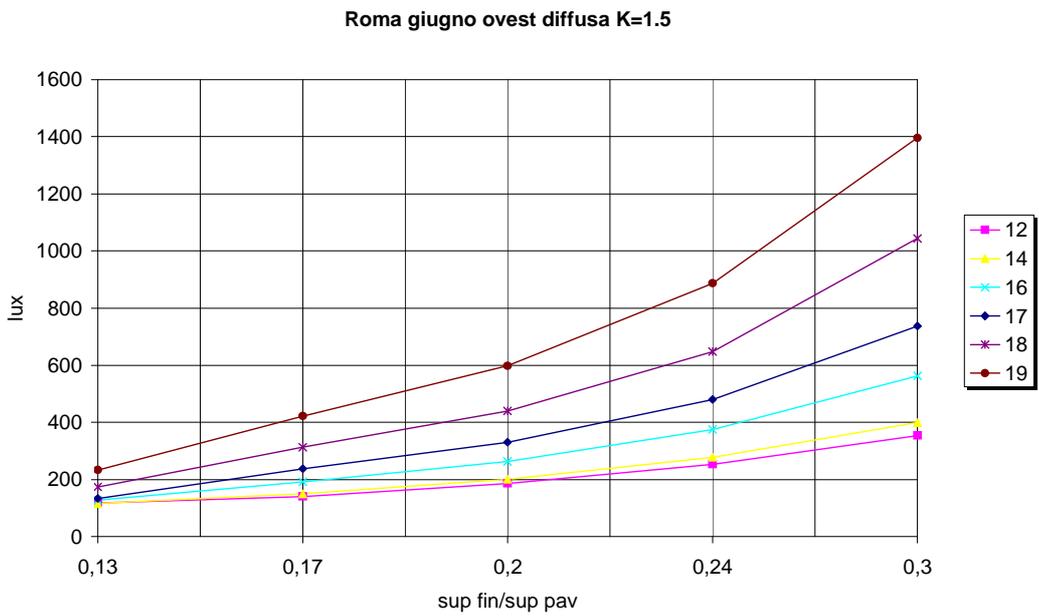


Figura 4.54. Roma, giugno, ovest, radiazione diffusa, K=1.5

Roma giugno ovest diffusa K=2

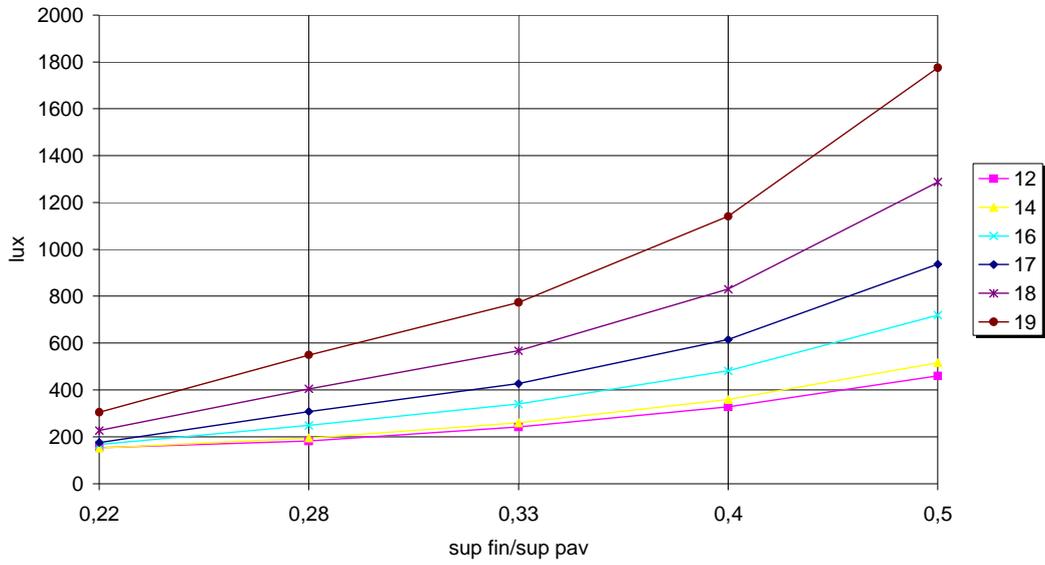


Figura 4.55. Roma, giugno, ovest, radiazione diffusa, K=2

Roma diffusa giugno ovest K=2.5

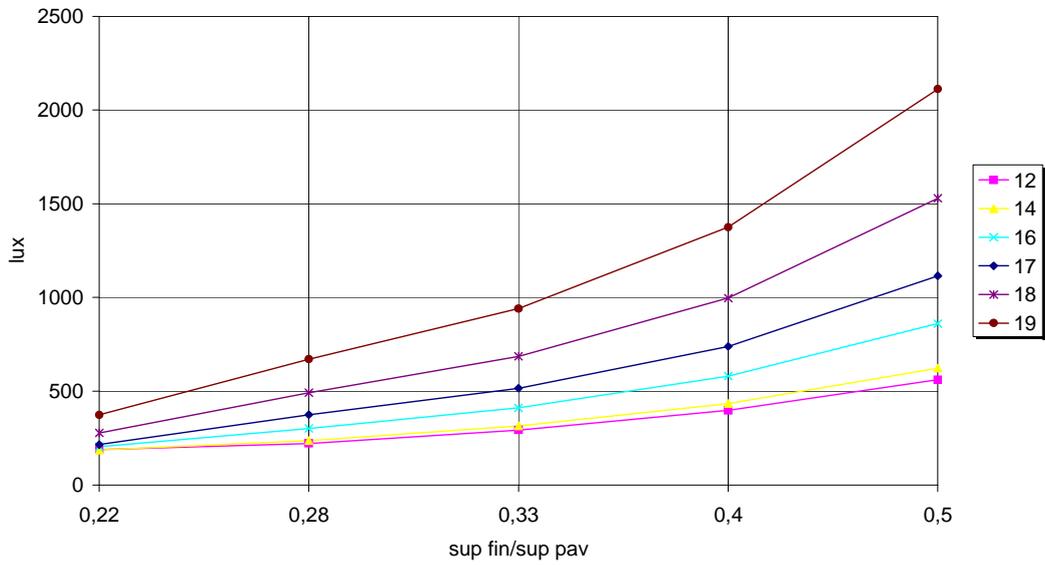


Figura 4.56. Roma, giugno, ovest, radiazione diffusa, K=2.5

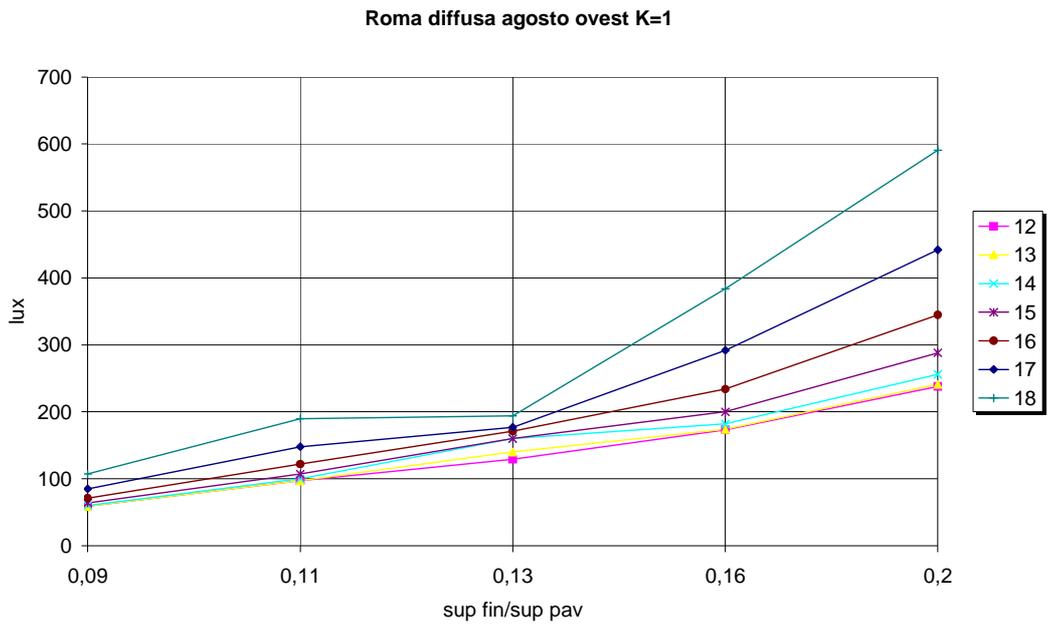


Figura 4.57. Roma, agosto, ovest, radiazione diffusa, K=1

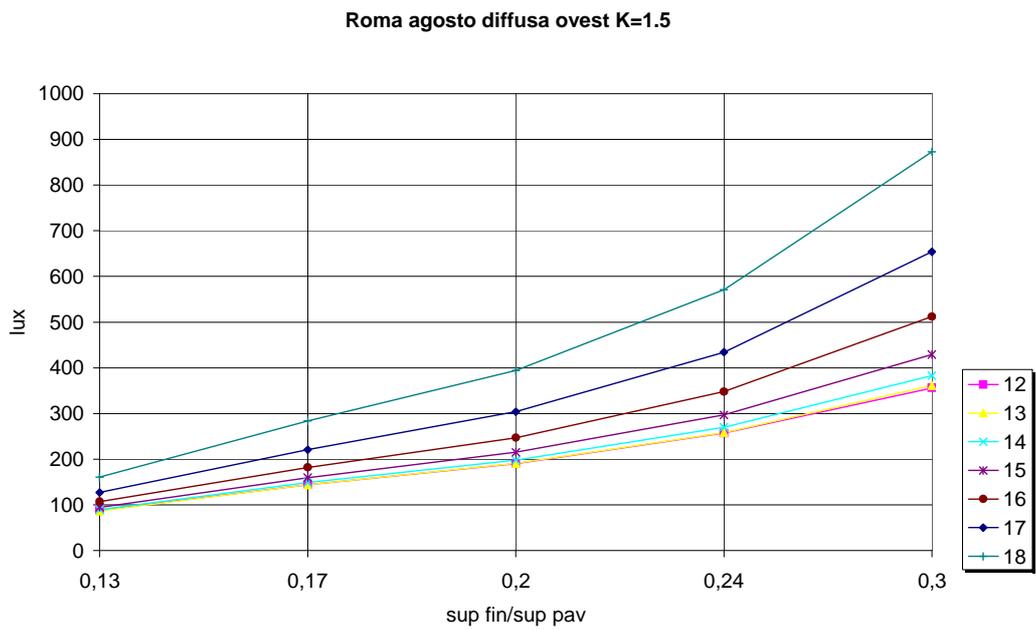


Figura 4.58. Roma, agosto, ovest, radiazione diffusa, K=1.5

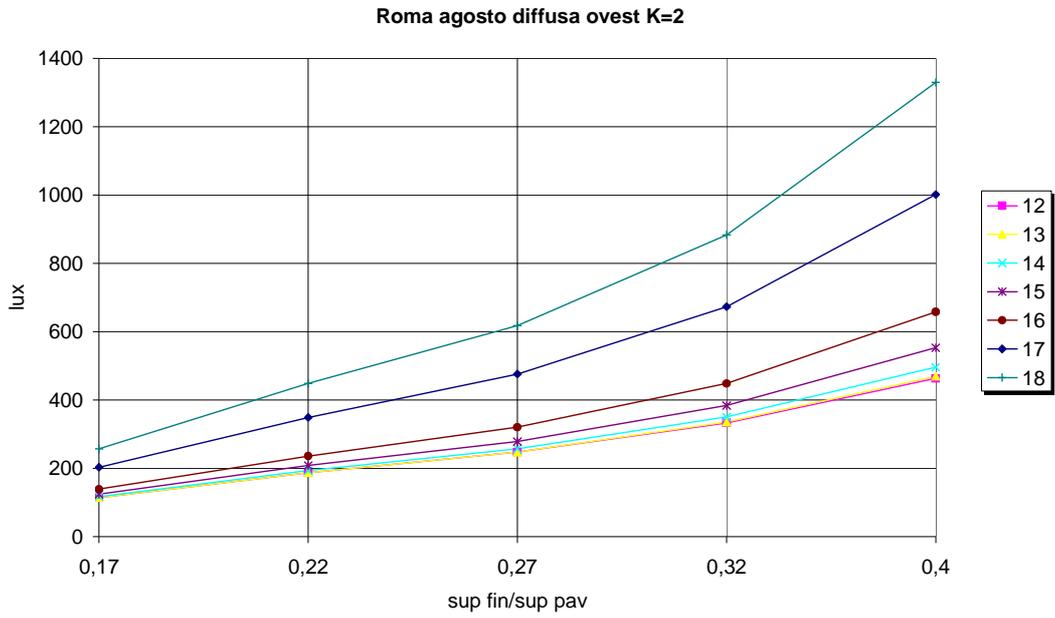


Figura 4.59. Roma, agosto, ovest, radiazione diffusa, K=2

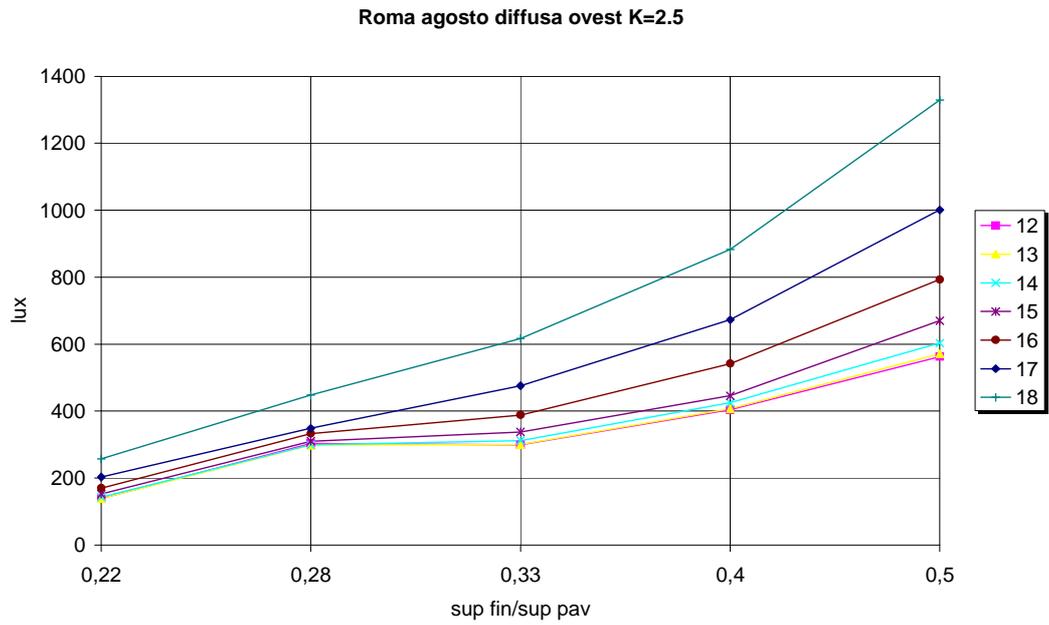


Figura 4.60. Roma, agosto, ovest, radiazione diffusa, K=2.5

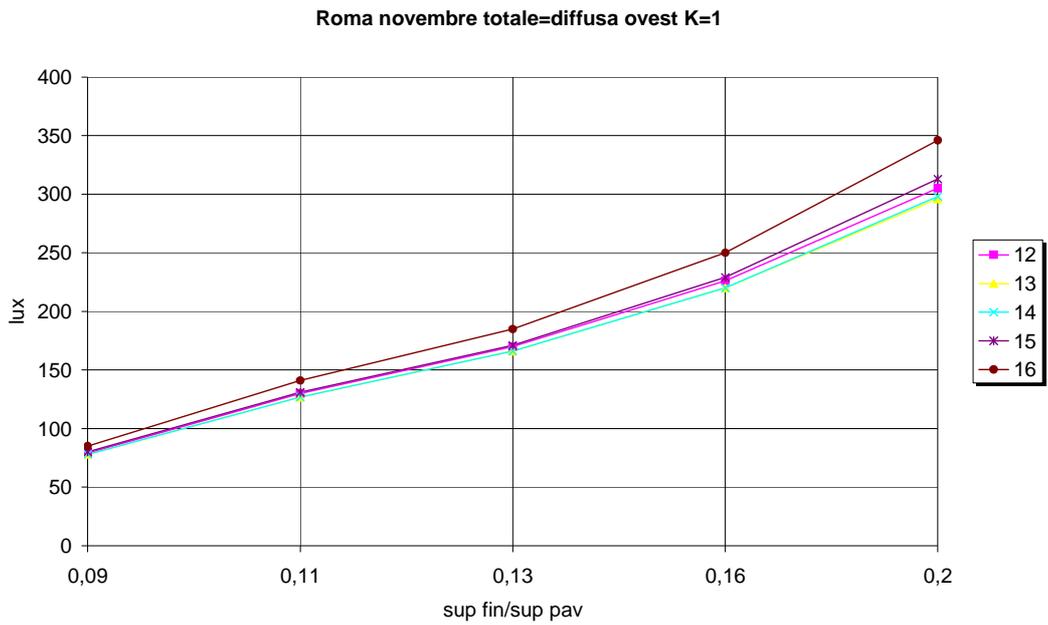


Figura 4.61. Roma, novembre, ovest, radiazione diffusa, K=1

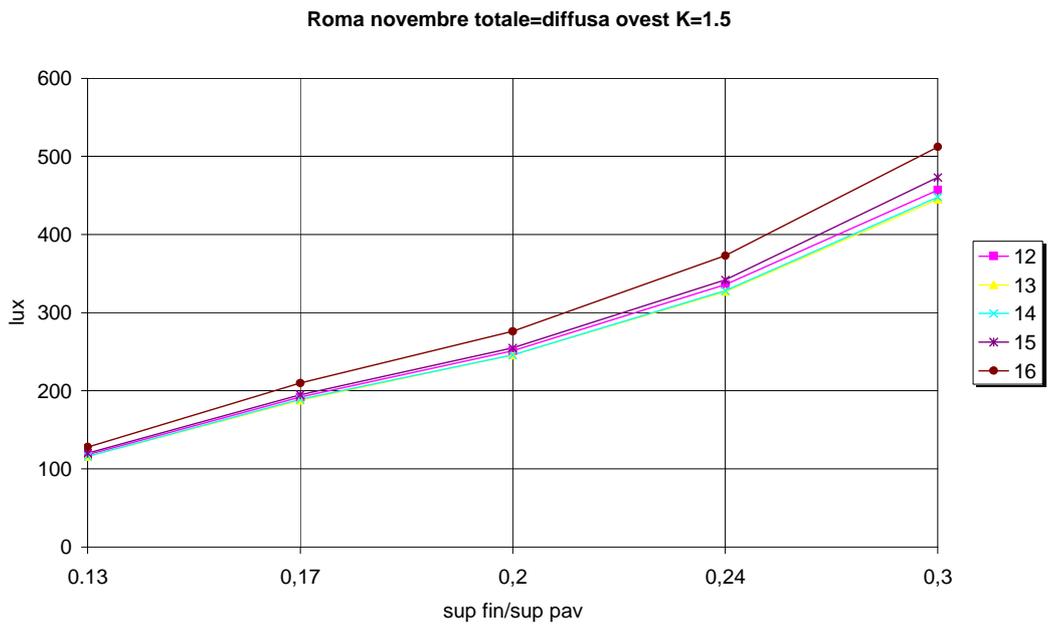


Figura 4.62. Roma, novembre, ovest, radiazione diffusa, K=1.5

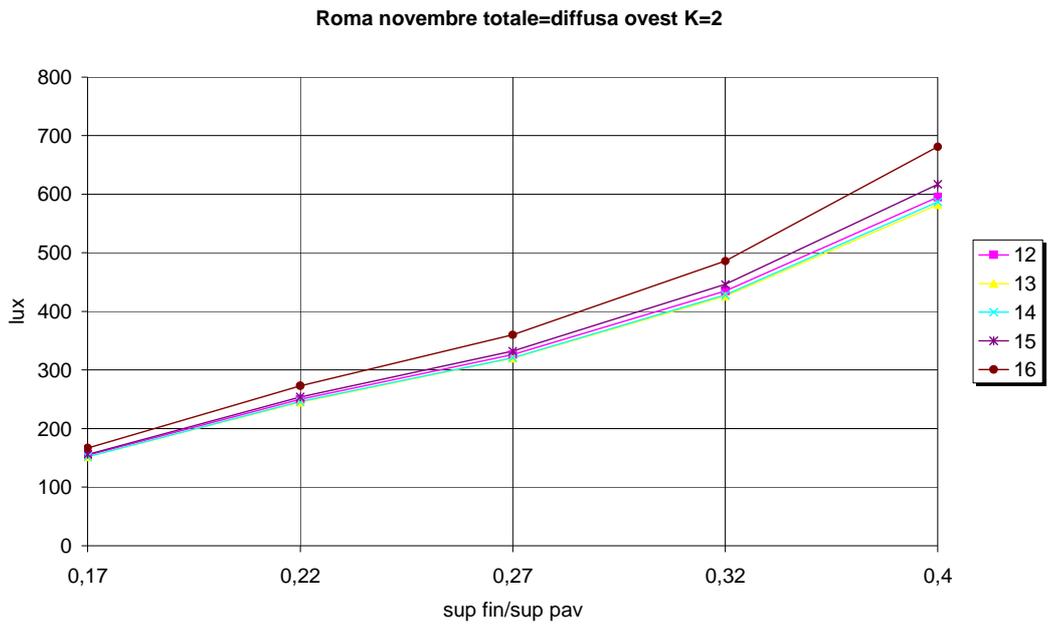


Figura 4.63. Roma, novembre, ovest, radiazione diffusa, K=2

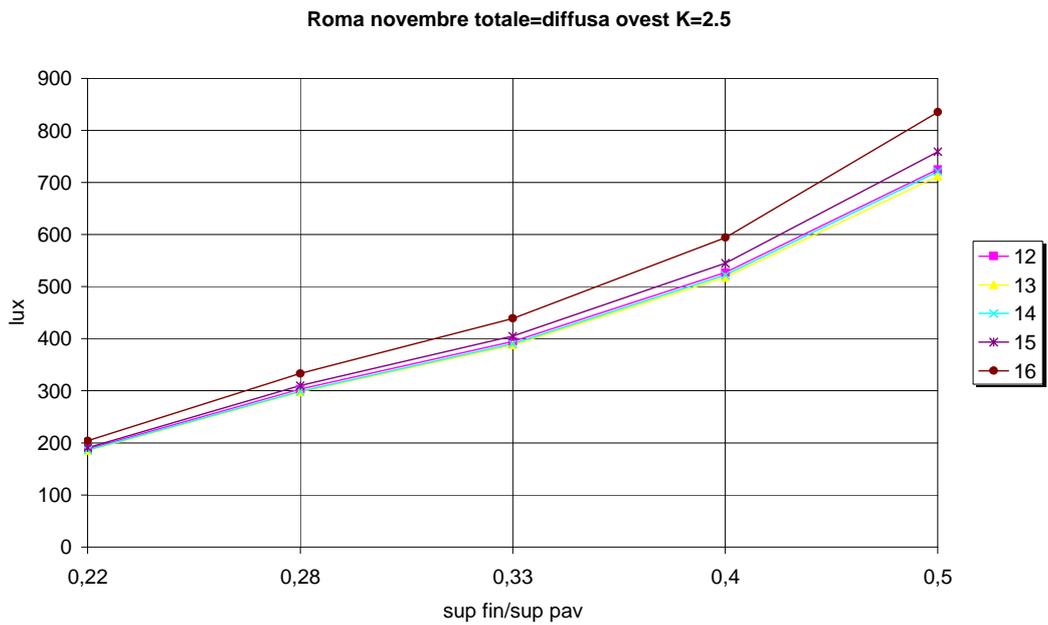


Figura 4.64. Roma, novembre, ovest, radiazione diffusa, K=2.5

Roma diretta giugno ovest K=1

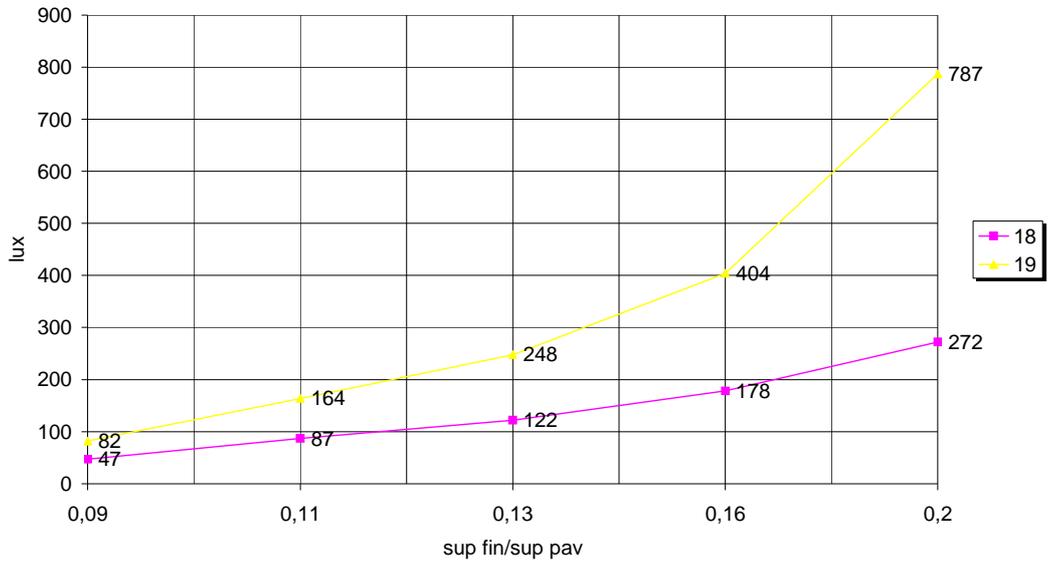


Figura 4.65. Roma, giugno, ovest, radiazione diretta, K=1

Roma diretta giugno ovest K=1.5

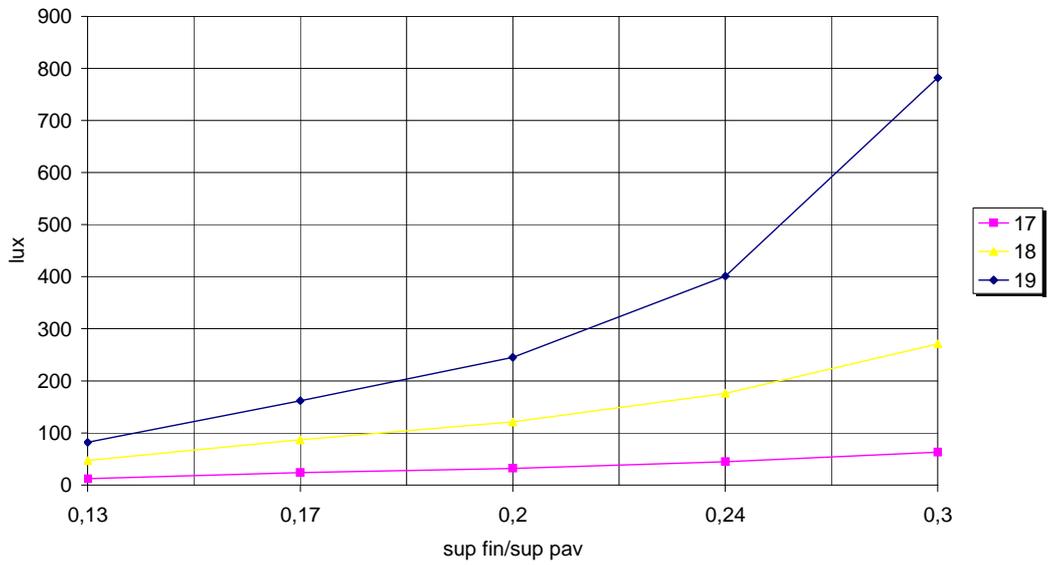


Figura 4.66. Roma, giugno, ovest, radiazione diretta, K=1.5

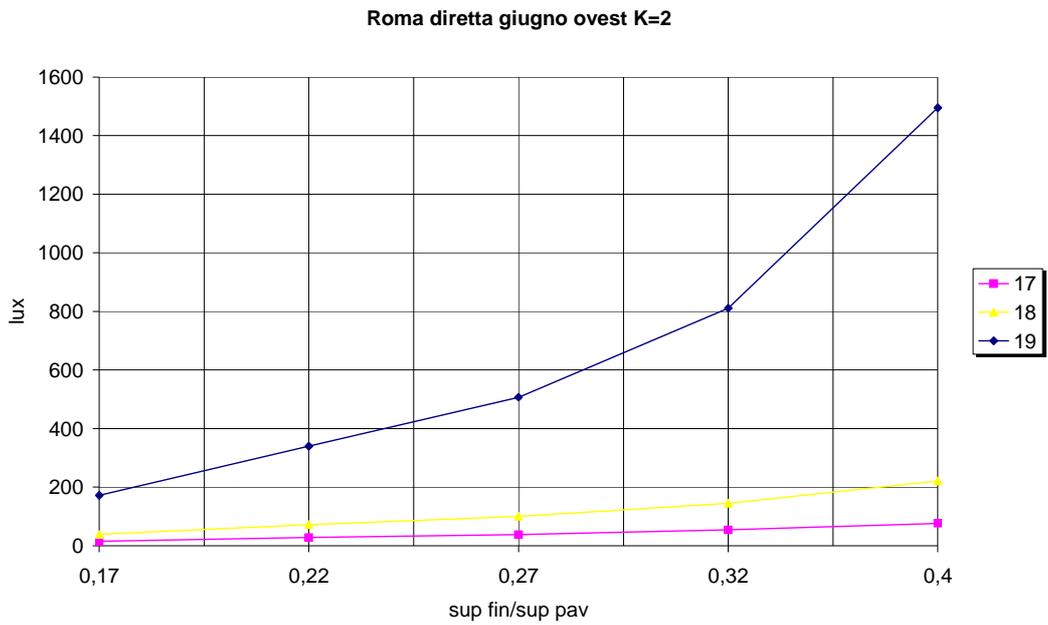


Figura 4.67. Roma, giugno, ovest, radiazione diretta, K=2

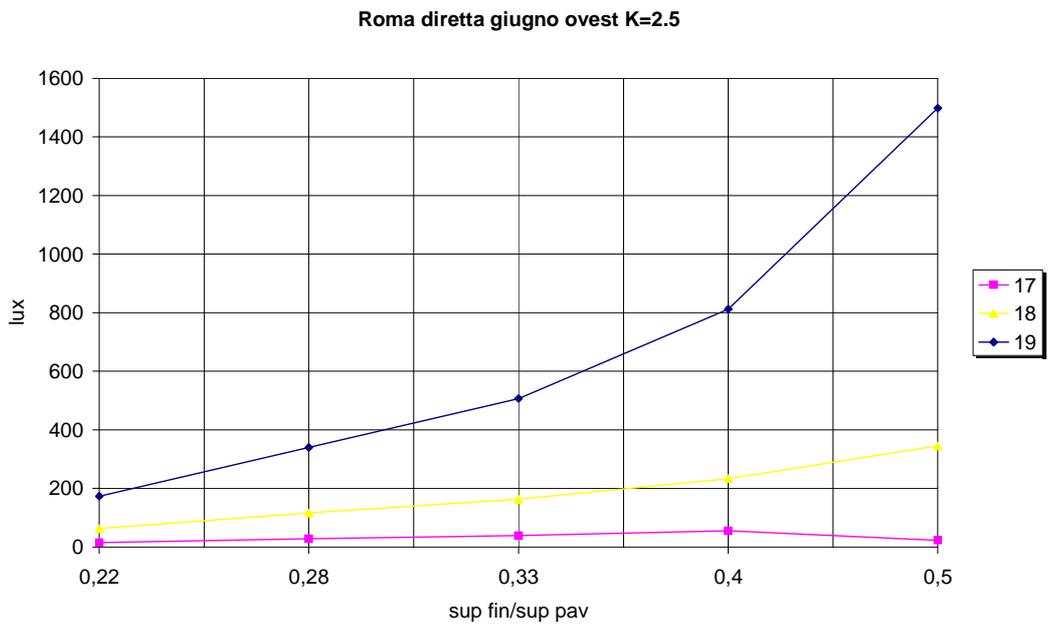


Figura 4.68. Roma, giugno, ovest, radiazione diretta, K=2.5

Considerazioni finali

Alla luce di quanto mostrato, si può concludere che:

- il modello sperimentale realizzato costituisce un utile strumento di ricerca; esso presenta, rispetto al metodo di calcolo, il vantaggio di non avere alcun tipo di limitazione sulla geometria dell'ambiente. Le differenze riscontrate dal confronto dei dati di simulazione e di misura (20% circa) sono imputabili alle numerose ipotesi ed approssimazioni che limitano il campo di analisi del metodo analitico. Il vantaggio che si ottiene dall'uso di un modello reale è legato alla possibilità di rappresentare con sufficiente cura le caratteristiche della struttura cui fa riferimento, a patto che le superfici interne siano trattate con gli stessi materiali utilizzati nella realtà; non risulta inoltre necessario utilizzare fattori correttivi per passare dai valori di illuminamento misurati a quelli simulati;
- l'introduzione del parametro K , definito come rapporto tra l'altezza della finestra e la sua lunghezza, ha comportato la possibilità di una nuova rappresentazione dei dati relativi all'illuminamento di un ambiente confinato. Si è riusciti a definire una diversa metodica di correlazione tra le numerose variabili che intervengono nell'analisi del problema in oggetto. Si sono ottenuti diagrammi di facile interpretazione e di diretto impiego nella ricerca e nella verifica delle caratteristiche costruttive dell'ambiente. I dati rappresentati nei diagrammi corrispondono ai valori d'illuminamento dei punti più sfavoriti dell'ambiente, che al variare dei casi, non sempre coincidono; la metodologia adottata consente di garantire quindi che nell'ambiente vi sia almeno il livello d'illuminamento imposto da progetto. I diagrammi individuati possono essere utilizzati in modi differenti: per i nostri obiettivi, rappresentano la base per la definizione di linee guida per un uso consapevole della luce naturale in ambienti confinati, presentate nel Capitolo successivo;
- la parametrizzazione individuata rende possibile l'analisi a sostegno e al limite in sostituzione di software complessi per una valutazione di massima dell'ambiente luminoso: la possibilità di riferirsi solamente ai punti di interesse per i sistemi di controllo dell'ambiente luminoso, permette una notevole semplificazione dei calcoli delle caratteristiche d'illuminamento al variare delle condizioni esterne.

Capitolo 5

Linee guida per la progettazione con la luce naturale

La progettazione con la luce naturale è un processo integrativo, in cui ogni decisione progettuale va ad influire sugli altri aspetti della progettazione degli edifici. Questa guida è stata sviluppata con l'intenzione di definire e caratterizzare per la luce naturale l'intero processo progettuale di un edificio, dalla genesi dell'idea progettuale alla realizzazione, e presenta strumenti e tecniche progettuali che possono aiutare il progettista a realizzare un "edificio illuminato naturalmente" (daylit building).

La guida si compone di 4 parti: un'introduzione, in cui vengono sinteticamente evidenziati i vantaggi della luce naturale, una parte descrittiva sulla disponibilità della luce naturale in Italia, con alcune rapide considerazioni sulle indicazioni progettuali in relazione a climi e condizioni di cielo, ed infine lo sviluppo dell'intero processo progettuale, che si compone di 9 passi, di cui sono stati sviluppati solo gli aspetti concernenti in senso stretto la luce naturale (cioè, i primi 5 passi), sebbene si ritenga opportuna la necessità di un continuo confronto tra i tecnici dei diversi settori della progettazione.

Queste linee guida non hanno come obiettivo quello di rispondere a tutti i quesiti che possono nascere da ciascuna esperienza progettuale, ma possono rappresentare un indirizzo ed una guida per le questioni che più frequentemente si pongono in praticamente tutte le esperienze progettuali. Esse sono adatte per le nuove realizzazioni, ed in particolare risultano direttamente e semplicemente applicabili per la progettazione di ambienti di tipo commerciale (dagli uffici alle scuole, ai laboratori, e agli altri ambienti di lavoro), sebbene, se impiegate con una certa attenzione, possano rappresentare una guida anche per gli edifici residenziali.

Queste linee guida sono strutturate in modo da fornire suggerimenti, indicazioni, strumenti e procedure per indirizzare e semplificare le scelte decisionali, e per rendere possibile l'integrazione delle diverse discipline per una progettazione integrata e sostenibile. Le indicazioni riportate sono evidentemente limitate agli aspetti relativi alla luce naturale. Nell'analisi del processo progettuale, ciascuno dei 5 passi specificamente orientati alla progettazione della luce naturale è stato sviluppato indicando, seguendo lo stile di linee guida esistenti in altri Paesi:

- obiettivo: definisce lo scopo del passo all'interno dell'intero processo progettuale;
- idee-chiave: rappresentano un elenco di suggerimenti, indicazioni, considerazioni, regole empiriche e distinzioni per lo sviluppo del passo progettuale;
- strumenti (se necessari): rappresentano un elenco delle potenziali strade da seguire nell'analisi delle problematiche e delle scelte da effettuare; a volte, sono stati riportati dei semplici strumenti di calcolo per l'elaborazione di opportuni parametri di progetto;
- lista di controllo (se necessaria): è una sequenza dei passi fondamentali da seguire per lo sviluppo del singolo passo del processo progettuale; include le possibili integrazioni e sovrapposizioni con le altre attività progettuali.

I vantaggi della luce naturale

Tutti gli edifici sono soggetti alla luce naturale. Con l'espressione "edificio illuminato naturalmente" si intende un edificio appositamente progettato per sfruttare in modo efficiente la

luce naturale attraverso opportune componenti e strategie di controllo. Lo scopo della progettazione con la luce naturale consiste nel minimizzare il consumo energetico degli edifici e nel massimizzare il benessere all'interno degli spazi confinati.

I benefici introdotti dalla progettazione con la luce naturale possono essere sintetizzati secondo lo schema riportato in Fig. 5.1:

- *Miglioramento della qualità della visione*: la qualità della visione si riferisce alle prestazioni visive, al benessere visivo e alla facilità con cui si svolge il compito visivo in ambiente. La luce naturale rappresenta la migliore sorgente di luce per la visione, sia in termini di quantità (livelli di illuminamento), sia in termini di qualità (resa cromatica e temperatura di colore).
- *Miglioramento delle condizioni di comfort*: la variabilità della luce naturale durante il giorno rappresenta uno stimolo positivo sia dal punto di vista biologico che psicologico per l'essere umano; ambienti lavorativi illuminati naturalmente risultano meno stressanti e più confortevoli dal punto di vista visivo.
- *Aumento della produttività*: è stato dimostrato che l'esposizione alla luce naturale rende maggiormente produttivi in ambito lavorativo, più efficienti, più sani e più creativi. Ambienti lavorativi all'interno dei quali gli occupanti siano soddisfatti risultano più produttivi, ed i benefici prestazionali associati alla luce naturale possono tradursi in risparmi significativi per le società.
- *Diminuzione dei carichi dovuti alla luce artificiale*: l'impiego di luce artificiale è responsabile dal 30% al 40% del consumo di energia elettrica di un edificio. Una efficiente integrazione di luce naturale e artificiale comporta una significativa riduzione (fino a due terzi) dell'energia impiegata per l'illuminazione.
- *Diminuzione dei carichi termici*: se confrontato con lo spettro di una sorgente di luce artificiale, lo spettro solare si sviluppa maggiormente nel campo del visibile come energia luminosa, rispetto alla zona dell'infrarosso associata all'emissione di calore; se ben progettata per sostituire la luce artificiale, quindi, la luce naturale può comportare un'effettiva riduzione dei carichi termici.
- *Diminuzione dei carichi elettrici di picco*: l'impiego di luce naturale risulta particolarmente adatto per gli edifici commerciali e gli ambienti lavorativi, occupati prevalentemente nelle ore diurne. In periodo estivo, con forte disponibilità di luce naturale ed elevate temperature esterne, la luce naturale può ridurre in modo sostanziale i carichi termici e i carichi elettrici di picco; in periodo invernale, un minore impiego della luce artificiale può comportare una riduzione dei carichi elettrici di picco. Tali riduzioni possono comportare sia degli importanti risparmi, sia una minore necessità di produzione di energia elettrica.

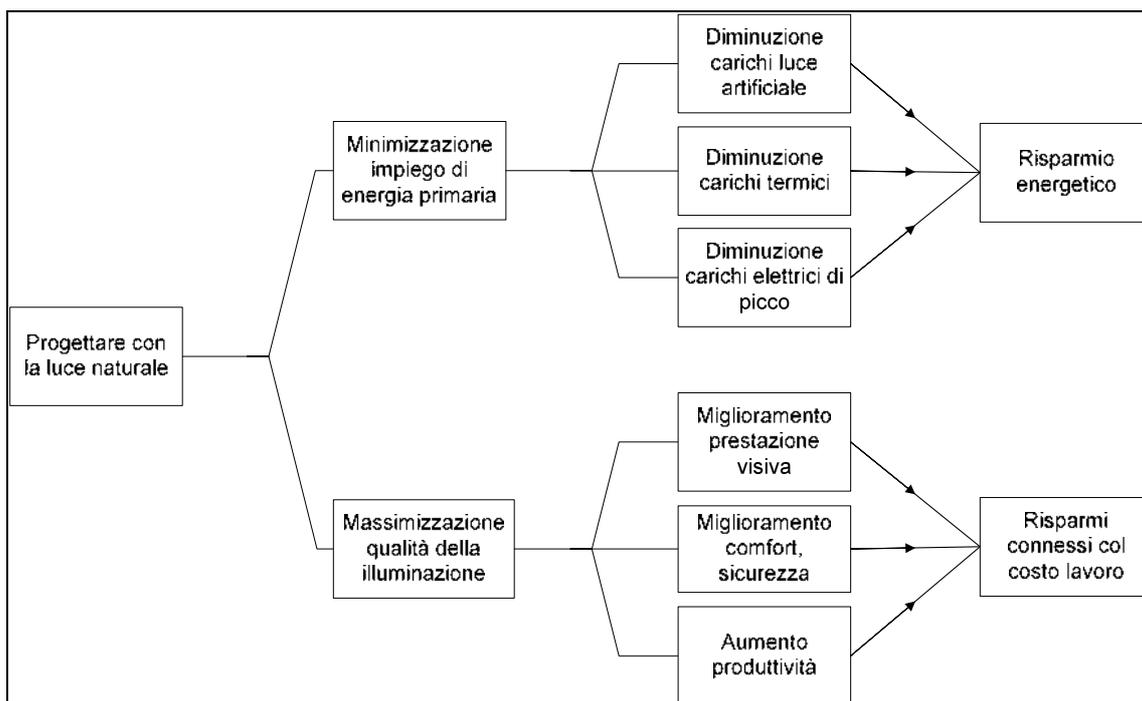


Figura 5.1. Diagramma rappresentante i benefici introdotti dalla progettazione con la luce naturale.

Disponibilità della luce naturale

L'Italia è Paese tradizionalmente noto per il suo forte soleggiamento e la grande disponibilità di luce naturale in tutti i periodi dell'anno. Tale disponibilità risulta certamente in grado di fornire una quantità di illuminamento molto maggiore di quello richiesto per soddisfare le condizioni medie richieste per i compiti visivi in ambiente confinato. In particolare, tutti gli orientamenti possiedono buone potenzialità in termini di luce naturale, purché vengano impiegate le tecniche e le tecnologie più appropriate per utilizzare al meglio la luce naturale.

Ad oggi, non è ancora definibile il clima luminoso di diverse località, per la mancanza di dati rilevati sperimentalmente. È comunque possibile utilizzare un metodo che permette di determinare, per ogni mese, la probabilità con cui si verificano in un'assegnata località le seguenti condizioni di cielo: cielo coperto, cielo coperto intermedio, cielo medio, cielo sereno intermedio, cielo sereno, in funzione dell'indice di soleggiamento, definito come il rapporto tra il numero di ore giornaliere di sole e il numero di ore tra l'alba e il tramonto (durata del giorno).

Un altro strumento disponibile riporta invece delle curve che esprimono la probabilità che in una data località e su una data superficie si abbia un valore di illuminamento minore del valore riportato in ascissa. Per ciascuna località, esistono 12 diagrammi, 6 relativi all'illuminamento globale e 6 all'illuminamento diffuso, corrispondenti a: piano orizzontale, piano verticale Nord, piano verticale Sud, piano verticale Est (mattino) od Ovest (pomeriggio), piano verticale Ovest (mattino) o Est (pomeriggio), piano verticale Est o Ovest (tutto il giorno).

A fronte di questi dati, difficilmente reperibili, esiste da un certo numero di anni ormai un sito internet che consente di ottenere dati di illuminamento annui e dati statistici medi su diversi anni, che possono essere usati come riferimento per la prima fase di progettazione. Per l'Italia, si ottengono tra le varie alternative, immagini del tipo mostrato in Fig. 5.2.

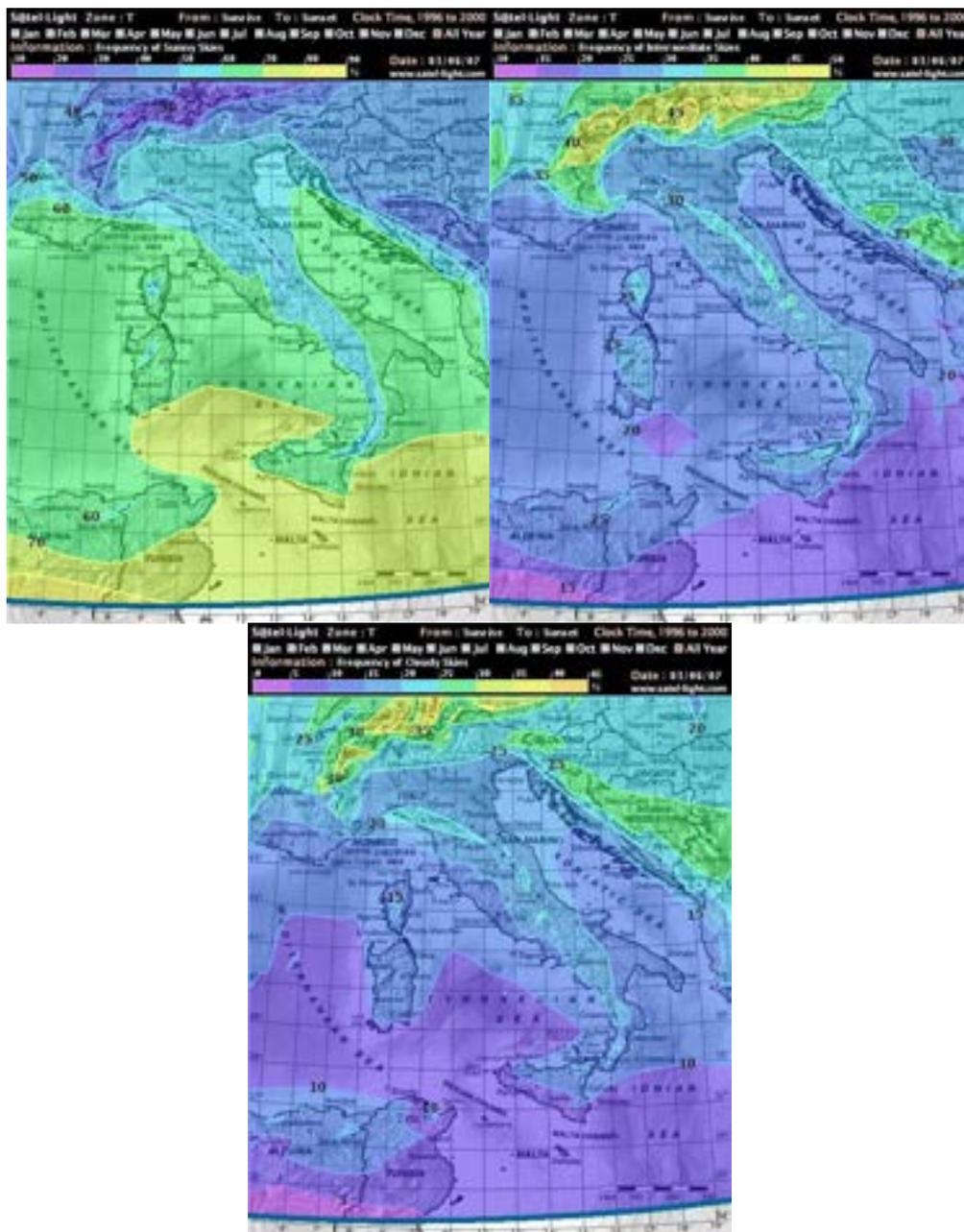


Figura 5.2. Frequenza di distribuzione rispettivamente di cielo sereno, intermedio e coperto

Progettare in zone urbane

La progettazione della luce naturale può risultare complessa in zone urbane a causa della schermatura derivante dalla presenza di edifici vicini; in particolare i piani bassi soffrono di mancanza di luce naturale. Le soluzioni possibili sono generalmente l'inserimento di atri e guide di luce. Per i piani alti, la strategia di illuminazione zenitale è una soluzione efficace ed alternativa/integrativa alla strategia di illuminazione laterale.

Progettare in climi freddi

Attraverso un appropriato impiego di strutture trasparenti ben isolate è possibile impiegare la luce naturale in ambienti confinati senza significativi disperdimenti termici e senza creare all'interno

dell'ambiente zone di discomfort termico. Un approfondito studio degli orientamenti, della disposizione delle superfici trasparenti, e delle relative strategie di schermatura, di un edificio, inoltre, possono portare ad una forte riduzione dei carichi termici estivi e ad una massimizzazione del guadagno solare in periodo invernale.

Progettare con cielo coperto

Il cielo coperto agisce come una sorgente di luce diffusa relativamente chiara, e rappresenta la condizione ideale per la progettazione della luce naturale, in quanto più semplice da controllare rispetto alla condizione di cielo sereno.

In condizioni di cielo coperto, il Sole non è presente, o più propriamente visibile, e i livelli di illuminamento esterno sono generalmente inferiori. Se queste sono le condizioni ambientali prevalenti, una soluzione efficace è rappresentata dall'aumento delle superfici trasparenti, con conseguente aumento di luce naturale all'interno dell'edificio; vanno prese però opportune precauzioni nella scelta degli elementi trasparenti, in modo da evitare eccessivi disperdimenti termici. Le ostruzioni esterne rappresentano pertanto un ostacolo, piuttosto che un vantaggio, come nel caso di climi caldi con cielo sereno. Talvolta, se lo strato nuvoloso è sottile, il cielo coperto uniforme può essere così luminoso da rappresentare una potenziale fonte di abbagliamento.

La strategia di base da seguire in questi casi è quella di consentire l'ingresso della luce naturale diffusa all'interno degli ambienti confinati, risultato che può essere raggiunto attraverso l'illuminazione zenitale e una scelta strategica di dimensioni, posizionamento e tipologia delle superfici trasparenti.

Progettare in climi caldi

La progettazione della luce naturale in climi caldi, caratterizzati da cielo chiaro e sole splendente si basa sulla determinazione di soluzioni che permettano di impiegare la luce escludendo la frazione maggiore possibile di calore dall'edificio. Essendo l'illuminamento esterno spesso molto maggiore di quanto richiesto per l'illuminamento interno, le finestre vengono collocate in modo che la loro vista della volta celeste è ostruita, e la luce viene filtrata e riflessa prima di raggiungere l'elemento trasparente.

Progettare con cielo sereno

La progettazione della luce naturale con cielo sereno è dominata dalla necessità di controllare la radiazione solare diretta, fonte di abbagliamento e carichi termici.

La radiazione solare diretta è in grado di fornire un sufficiente livello di illuminamento in ambienti ampi anche attraverso piccole aperture; essendo caratterizzata da una forte direzionalità, può inoltre essere riflessa e opportunamente guidata all'interno degli ambienti. L'impiego di avanzati riflettenti, o di sistemi innovativi di ridirezionamento della luce rappresentano pertanto metodi efficienti per migliorare la penetrazione della luce in ambiente.

Le aperture vengono generalmente dimensionate sulla base dei bassi livelli di illuminamento associati alle condizioni di cielo coperto; ciononostante, la combinazione di ampie superfici vetrate e radiazione solare diretta possono generare condizioni di abbagliamento insostenibile e di surriscaldamento locale, se non viene contestualmente previsto un efficace sistema di schermatura e di ridirezionamento della luce.

La progettazione della luce come approccio multidisciplinare

Le strategie per un impiego razionale della luce naturale e le strategie progettuali architettoniche sono inseparabili. Progettare con (e per) la luce naturale significa realizzare un'integrazione multidisciplinare tra differenti tecniche e metodologie di progetto: dalla pianificazione urbana alla progettazione degli interni, l'intero processo progettuale degli edifici e tutti gli attori della progettazione devono essere coinvolti. Solo in questo modo è possibile ottenere un'ottimizzazione di tutti gli aspetti isolati per una progettazione integrata e consapevole, cioè l'ottimizzazione del sistema edificio. Un non efficiente coordinamento e integrazione tra le metodologie e le scelte della progettazione possono portare alla realizzazione di ambienti scadenti dal punto di vista della qualità dell'ambiente visivo e conseguentemente non confortevoli, anche in presenza di tecnologie e sistemi di luce naturale innovativi ed evoluti.

La progettazione con la luce naturale persegue diversi obiettivi, in funzione della fase progettuale:

- *Fase concettuale di progettazione*: durante la creazione dello schema dell'edificio, la progettazione della luce naturale influenza e/o viene influenzata dalle decisioni fondamentali sulla forma dell'edificio, sulle dimensioni (proporzioni), e sulle aperture, e sul grado di integrazione e sul ruolo che gli impianti devono avere nell'edificio.
- *Fase progettuale*: durante la fase di progettazione vera e propria, le strategie relative all'impiego della luce naturale devono essere sviluppate per ciascuna zona dell'edificio. La progettazione delle facciate e delle finiture interne, la scelta e il grado di integrazione di sistemi e servizi (compreso l'impianto di illuminazione artificiale) devono essere tutti aspetti connessi con la progettazione della luce naturale.
- *Progetto esecutivo*: la scelta dei materiali e dei prodotti dipende dalla strategia di luce naturale adottata per l'edificio, e i dettagli finali del progetto di luce naturale devono essere definiti assieme al progetto esecutivo;
- *Realizzazione e Vita dell'edificio*: terminata la realizzazione dell'edificio, i sistemi di regolazione e controllo della luce devono essere calibrati, e successivamente inizia la fase di manutenzione dei sistemi.

Sviluppo del processo progettuale con la luce naturale

L'intero processo progettuale può essere suddiviso in 9 passi fondamentali, come mostrato in Fig. 5.3.

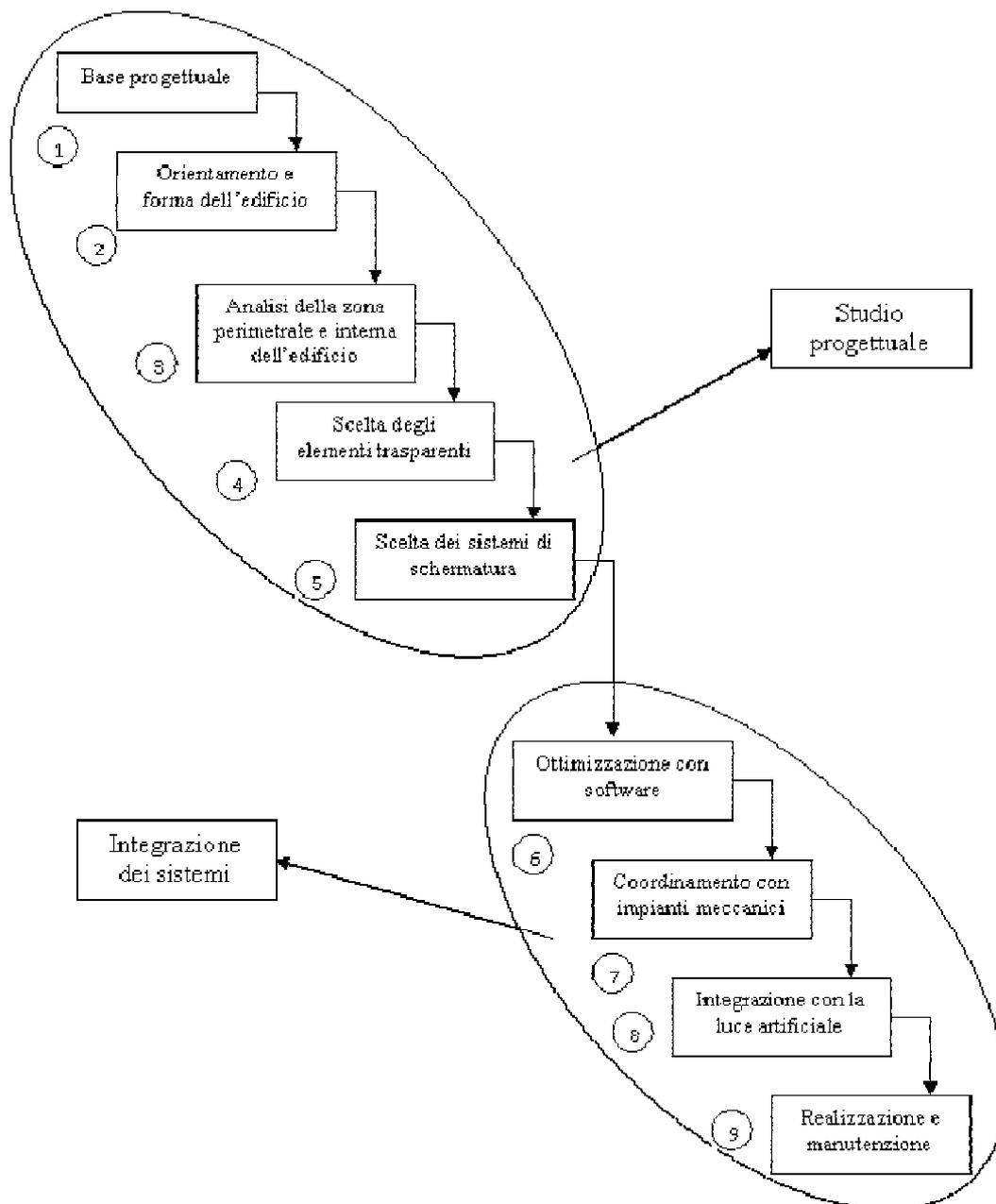


Figura 5.3. Schema progettuale.

PASSO 1: BASE PROGETTUALE

Disponibilità di luce naturale in ambiente confinato e fattibilità della progettazione con la luce naturale

Obiettivo:

- definire la richiesta di luce e stabilire il ruolo che la luce naturale può giocare nel soddisfacimento di tale richiesta

Idee chiave:

- Progettare la luce naturale in funzione del compito visivo
- Caratterizzare la disponibilità e la variabilità ammessa di luce naturale per le differenti porzioni di edificio; definire sulla base di questi criteri l'importanza relativa della luce naturale; ovvero, progettare la funzionalità degli ambienti dell'edificio per gruppi, in funzione della disponibilità di luce naturale; per decisioni sulla variabilità, si può fare riferimento alla seguente Tab. 5.1:

Tabella 5.1. Disponibilità richiesta di luce naturale.

Destinazione d'uso	Livello d'illuminamento	Variabilità ammessa	Facilità di uso della luce naturale
<i>Ospedali</i>	Alto	Basso	Basso
<i>Uffici</i>	Medio	Medio	Medio
<i>Corridoi, sale pasto</i>	Basso	Alto	Alto

- Le finestre devono poter vedere una porzione sufficiente di cielo: se le ostruzioni sono eccessive, questo potrebbe risultare difficile. Per edifici bassi, si può pensare a illuminazione zenitale
- I vetri devono poter trasmettere la luce: no a vetri troppo scuri, che limitano la quantità di luce in ingresso in ambiente in tutti i giorni dell'anno
- Prevedere sistemi automatici per il controllo della luce naturale in ottica di risparmio energetico

Strumenti:

Procedura per un rapido studio di fattibilità (da eseguire per ogni ambiente tipo dell'edificio):

1. Calcolo del rapporto finestra/parete (se non prevedibile, impiegare un valore compreso tra 0.3 e 0.5);
2. Definizione del coefficiente di trasmissione luminosa del vetro
3. Stima del Fattore di Ostruzione, da calcolare con riferimento alla Tab. 5.2:

Tabella 5.2. Stima del Fattore di Ostruzione della Finestra (FO)

Vista verso l'esterno della finestra	FO
$\geq 50\%$	1
$< 50\%$	0.85
$< 30\%$	0.65
$< 10\%$	0.40

4. Calcolo del Fattore di fattibilità della luce naturale, come prodotto dei tre precedenti fattori; se $\geq 25\%$, si può considerare un risparmio energetico significativo; se $< 25\%$, modificare, se possibile, uno dei tre precedenti fattori; se le modifiche non sono possibili, non si ha risparmio energetico, ma si può orientare la progettazione al comfort visivo

PASSO 2: ORIENTAMENTO E FORMA DELL'EDIFICIO

Decisioni su posizionamento, orientamento e forma dell'edificio

Obiettivo:

- definire sito, orientamento e forma dell'edificio, per massimizzare l'immissione di luce naturale e il benessere degli occupanti, e minimizzare abbagliamento e discomfort termico

Idee chiave (posizionamento e orientamento dell'edificio):

- Posizionare e orientare l'edificio in modo da massimizzare la disponibilità della luce naturale;
- Massimizzare l'esposizione Sud, caratterizzata dalla massima disponibilità di radiazione solare;
- Ottimizzare l'esposizione Nord;
- Minimizzare l'esposizione Est-Ovest;
- Prevedere soluzioni trasparenti differenti per ciascun orientamento.

Strumenti:

- Valutare il movimento del Sole rispetto al sito tramite carte solari o formule analitiche;
- Calcolare l'angolo di vista del cielo (o fattore di finestra) per limitare le ostruzioni offerte da elementi esterni, tramite la seguente formula e i successivi diagrammi:

$$\varepsilon = \frac{\text{sen}\alpha_2 - \text{sen}\alpha}{2}$$

avendo posto:

α_2 =angolo piano che sottende la parte visibile di cielo;

α =angolo piano di altitudine che sottende la parte ostruita di cielo.

$\varepsilon=1, 0.5, <0.5$, rispettivamente per superfici vetrate orizzontali (lucernari), prive di ostruzioni, per superfici vetrate verticali (finestre) prive di ostruzioni, per superfici vetrate verticali in presenza di ostruzioni), secondo quanto calcolato dall'applicazione della Fig. 5.4.

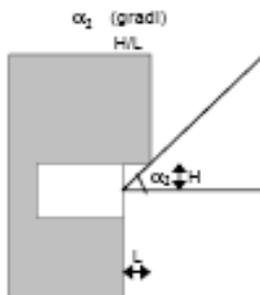
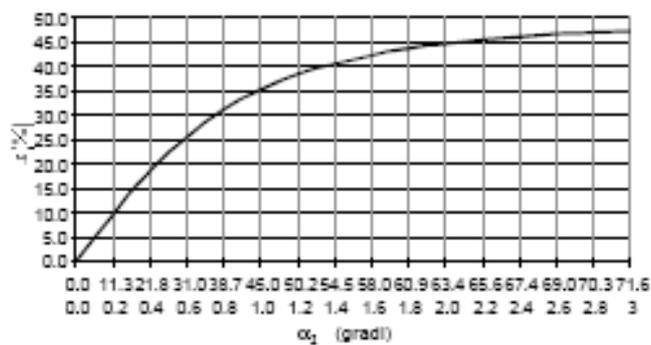
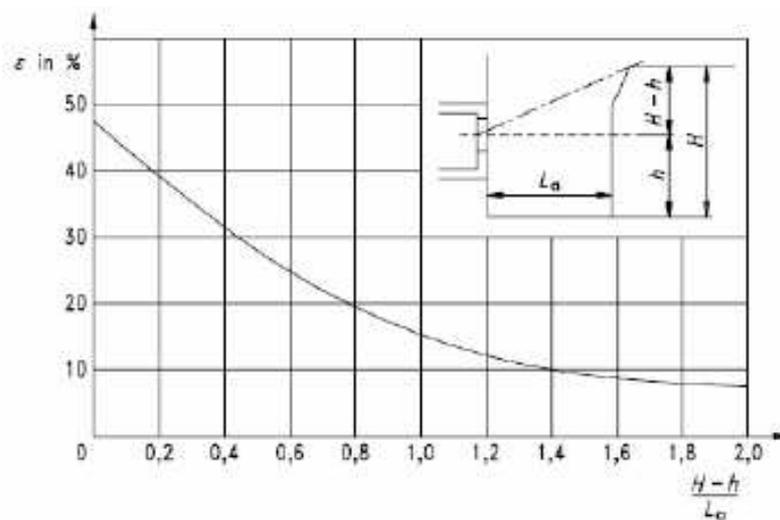


Figura 5.4. Calcolo del fattore finestra.

Idee chiave (forma e struttura dell'edificio):

- Aumentare l'esposizione alla luce naturale (edifici bassi, eventualmente a piano singolo) evitando ambienti troppo alti o deformi (caratterizzati da problemi termici); esposizioni N – S da preferire a E – W
- Progettare la forma dell'edificio, in modo che risulti auto – schermante (ali, balconi, etc...), massimizzando il perimetro di esposizione alla luce naturale (edifici ad H, a T, con atrio, ...);
- Considerare un opportuno spessore della facciata per consentire l'inserimento di elementi schermanti
- Progettare impiegando altri elementi strutturali per schermare e/o per incrementare la quantità di luce naturale entrante (light-shelf, frangisole, etc...)

- Bilanciare le zone di ingresso della luce naturale (illuminazione bilaterale);
- Prevedere, senza sovradimensionare, atri per massimizzare l'illuminazione dall'interno;
- Realizzare ambienti poco profondi per una migliore uniformità e distribuzione della luce; secondo una regola empirica sufficientemente verificata, l'impiego di finestre commerciali permette di illuminare un ambiente fino a una profondità pari a 1.5 – 2 volte l'altezza della finestra rispetto al pavimento; sistemi avanzati consentono di raggiungere una profondità 2 o più volte l'altezza della finestra;
- Considerare anche il colore e la rugosità superficiale delle superfici esterne

PASSO 3: ANALISI DELLA ZONA PERIMETRALE E INTERNA DELL'EDIFICIO

Decisioni su facciate, finestre ed interni

Obiettivo:

- definire facciate, finestre e interni, per massimizzare l'immissione di luce naturale e il benessere degli occupanti, e minimizzare abbagliamento e discomfort termico

Idee chiave (facciate e finestre):

- Scegliere con cura il tipo di strategia di illuminazione (laterale, bilaterale, zenitale, dall'interno, laterale e zenitale...) da prevedere per l'edificio;
- Finestre alte illuminano più in profondità: l'utilizzo di light shelf riflettenti aumentano la profondità d'illuminamento della finestra;
- Finestre a nastro consentono un'illuminazione più uniforme;
- Finestre ampie sono di più difficile gestione (abbagliamento e problemi termici);
- Dimensionare attentamente la superficie trasparente e scegliere il materiale trasparente contemporaneamente, in quanto parametri con controllo inverso sulla luce entrante; un valore di apertura effettiva (pari al prodotto del rapporto finestra/parete per il coefficiente di trasmissione luminosa del vetro) di 0.3 può essere preso come valore di riferimento; non sovradimensionare le aperture
- Mantenere le zone di lavoro lontane dalle grandi superfici vetrate (discomfort termico);
- Separare le zone trasparenti progettate per l'immissione di luce e quelle progettate per consentire un contatto con l'esterno;
- Posizionare le finestre in modo da direzionare la luce verso il soffitto; prevedere un soffitto che guidi la luce verso l'interno degli ambienti;
- Usare tinte chiare ed elevati coefficienti di riflessione per facilitare la diffusione della luce
- Prevedere finestre con elementi schermanti
- Preferire finestre con forme orizzontali
- Preferire finestre con viste verso l'esterno dinamiche piuttosto che statiche
- Sistemare le finestre vicino alle pareti della stanza per facilitare la distribuzione della luce per riflessione delle pareti stesse
- Non utilizzare superfici vetrate laddove non possono essere sfruttate al meglio
- Evitare, laddove non ci siano problemi di tipo termico, finestre troppo scure: diminuiscono la quantità di luce entrante e alterano la qualità della luce
- Progettare il controllo della luce per consentire efficienza energetica

Idee chiave (pianificazione degli spazi):

- Sistemare le attività in funzione delle richieste visive, sia in termini di ambienti all'interno dell'edificio, sia in termini di attività all'interno dello stesso ambiente;

- Sistemare le attività in funzione delle richieste di comfort
- Avere cura delle zone di accesso della luce
- Utilizzare materiali con elevati coefficienti di trasmissione luminosa per creare zone di divisione
- Proteggere gli occupanti da superfici esterne altamente riflettenti;
- Proteggere gli occupanti sensibili da finestre particolarmente luminose
- Mantenere lontano da computer le zone di vista che riflettono finestre particolarmente luminose;
- Preferire le zone ad elevato carico termico (Ovest) come zone di servizio

Idee chiave (progettazione degli ambienti interni):

- Non realizzare zone troppo ampie con colori scuri;
- Cercare di utilizzare superfici con coefficiente di riflessione consigliato: soffitto > 80%, pareti 50-70%, pavimento 20-40%, arredi 25-45%
- Utilizzare materiali con elevato coefficiente di trasmissione luminosa
- Fornire le finestre di elementi di schermatura per consentire una regolazione individuale
- Scegliere i colori sotto la giusta luce (naturale)

Strumenti:

- Impiegare per il dimensionamento delle superfici trasparenti il Fattore medio di luce diurna:

$$\eta_m = \frac{A_v \cdot \tau_1 \cdot \varepsilon \cdot \psi}{A_{tot} \cdot (1 - \rho_{1,m})}$$

dove:

η_m = fattore di luce diurna medio all'interno dell'ambiente;

A_{TOT} = area totale delle superfici interne dell'ambiente [m^2];

A_v = superficie vetrata, priva del telaio [m^2];

τ = fattore di trasmissione luminosa diffusa del materiale trasparente, eventualmente comprendente la presenza di sistemi di controllo e schermatura; tale fattore viene generalmente definito come rapporto tra il flusso luminoso trasmesso ed il flusso luminoso incidente;

$\rho_{1,m}$ = fattore di riflessione medio pesato delle superfici interne dell'ambiente;

ε = fattore di finestra (o angolo di vista del cielo, già discusso in precedenza), definito come frazione di volta celeste intercettata dal baricentro della finestra;

ψ = fattore di riduzione del fattore di finestra, espresso in funzione della posizione della superficie trasparente rispetto al filo esterno della muratura (Fig. 5.5).

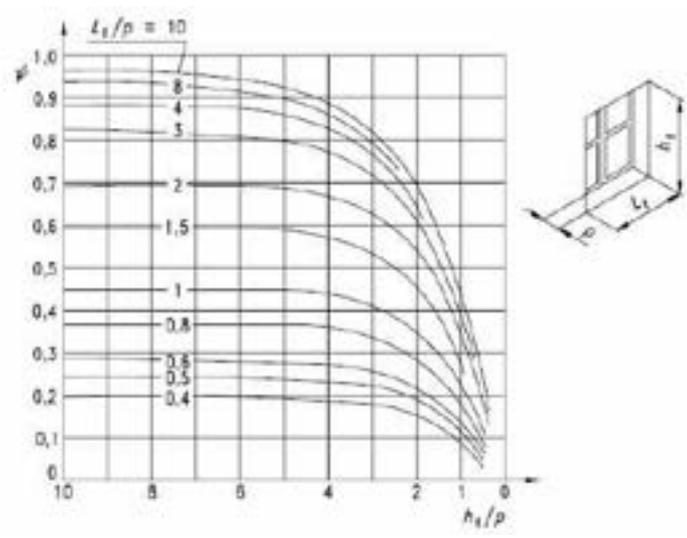


Figura 5.5. Calcolo del fattore di riduzione del fattore finestra

PASSO 4: SCELTA DEGLI ELEMENTI TRASPARENTI

Decisioni sulla scelta dei vetri

Obiettivo:

- Scegliere i materiali trasparenti per massimizzare l'immissione di luce naturale e il benessere degli occupanti minimizzando il consumo di energia, nel rispetto delle scelte architettoniche

Idee chiave (tecnologia dei materiali trasparenti):

- Esaminare tutte le proprietà del materiale trasparente, prima di effettuare la scelta; coefficiente di trasmissione nel visibile, coefficiente di riflessione nel visibile, Solar Heat Gain Coefficient (SHGC) o Shading Coefficient (SC), trasmittanza termica, coefficiente di trasmissione nell'ultravioletto, selettività spettrale, colore, aspetti acustici

Idee chiave (procedura di selezione):

- Scelta tra vetro singolo o vetro-camera;
- Scelta di un materiale selettivo
- Considerare la possibilità d'impiego di materiali trasparenti innovativi
- Bilanciare tra le esigenze di controllo dell'abbagliamento e immissione di luce naturale
- Dimensioni del vetro e coefficiente di trasmissione nel visibile si bilanciano; un valore di apertura effettiva (pari al prodotto del rapporto finestra/parete per il coefficiente di trasmissione luminosa del vetro) di 0.3 può essere preso come valore di riferimento;
- Vetri di dimensioni maggiori richiedono una qualità del vetro maggiore;
- Un vetro scuro non necessariamente ha un ottimo controllo solare
- Non affidarsi al solo vetro per il controllo solare; prevedere (sezione successiva) elementi schermanti;
- Scegliere il vetro in funzione di facciata e orientamento
- Alcuni vetri trattati non possono essere schermati parzialmente, in quanto incapaci di sopportare stress termici dovuti a temperature diverse in zone diverse del vetro
- Vetri troppo scuri non favoriscono la progettazione con la luce naturale
- Scegliere materiali trasparenti in grado di realizzare la giusta atmosfera in ambiente
- Analizzare gli aspetti strutturali del vetro
- Considerare la possibilità d'impiego, laddove possibile, di telai non metallici
- Eseguire il calcolo dei carichi termici in presenza di superfici trasparenti
- Per edifici storici: la scelta del vetro in sede di ristrutturazione deve essere tale da non alterare la facciata storica dell'edificio.

Strumenti:

- Software e modelli in scala
- Letteratura tecnica e manuali dei produttori

PASSO 5: SCELTA DEI SISTEMI DI SCHERMATURA

Decisioni sulla scelta dei sistemi di schermatura

Obiettivo:

- Scegliere i sistemi di schermatura interni e/o esterni per il controllo della radiazione solare diretta entrante in ambiente, e per la realizzazione di un ambiente confortevole, privo di abbagliamento

Idee chiave (schermature esterne):

- Impiegare, laddove possibile, elementi di schermatura esterni, generalmente più efficienti degli elementi interni per il controllo del carico termico in ambiente;
- Progettare la forma dell'edificio, in modo che risulti auto – schermante (ali, balconi, etc...), massimizzando il perimetro di esposizione alla luce naturale (vedi passo 2);
- Impiegare la vegetazione come elemento di schermatura esterno stagionale;
- Prevedere schermi per la diffusione della radiazione solare diretta;
- Prevedere elementi di schermatura orizzontali per l'esposizione Sud, verticali per le esposizioni Est-Ovest;
- Stabilire una priorità per la schermatura degli orientamenti Sud e Ovest;
- Progettare i sistemi di schermatura anche con lo scopo di prevenire/limitare l'abbagliamento negli ambienti interni;
- Arretrare la posizione della finestra rispetto al filo della muratura per fornire un ulteriore effetto schermante;
- Impiegare per i sistemi di schermatura esterni colori chiari per favorire la trasmissione di luce diffusa;
- Impiegare per i sistemi di schermatura esterni colori scuri per limitare al massimo guadagni termici e trasmissione della luce;

Idee chiave (schermature interne):

- Non affidarsi esclusivamente a vetri scuri;
- I sistemi di schermatura interni da soli hanno scarsa efficacia sul controllo solare;
- Se si prevedono esclusivamente elementi interni di schermatura, preferire colori chiari per una più efficace riflessione del calore;
- Le schermature interne sono da impiegarsi preferibilmente per il controllo dell'abbagliamento;
- Preferire schermature che consentono comunque alla luce naturale di filtrare;
- Evitare di impiegare schermature interne di colore scuro in assenza di schermature esterne;
- Mantenere sempre i sistemi di schermatura interni puliti.

Bibliografia

- [1] Aghemo C., Azzolino C. *Illuminazione naturale: metodi ed esempi di calcolo* LAMSA
- [2] Alfano G., Filippi M., Sacchi E. *Impianti di climatizzazione per l'edilizia* Masson, 1997
- [3] Bini F. *Dispensa didattica sulla "teoria degli errori"* Roma, 1999
- [4] Branca F. *Misure meccaniche* Roma, 1972
- [5] Cesarano A., Bellia L., Fanchiotti A., Sibilio S. *Elementi di illuminazione naturale*, 1996, Maggio.
- [6] CIE *Daylighting: international recommendations for the calculation of natural daylight* CIE Pub n. 16, Paris 1972
- [7] CIE *Standardization of luminance distribution of clear skies* CIE Pub n 22, 1973
- [8] De Santoli L. Moncada Lo Giudice G. *Illuminazione diurna e risparmi energetici in climi temperati* Luce, n. 1, 1988
- [9] Di fraia L., Scognamiglio R. *Aspetti ergonomici dell'illuminazione naturale in interni. Analisi sperimentale di metodi computerizzati di valutazione-* Luce, n. 3, 1988
- [10] D.P.R. 19/03/56 N° 303 *Norme generali per l'igiene del lavoro*
- [11] Felli M. *Lezioni di Fisica Tecnica* Morlacchi, 1999, pp.263-275, 145
- [12] Griffith J. W., Arner W. J., Conover E. W *A modified lumen input method of daylighting design* Illuminating engineer, 1955, pp 103-112
- [13] Hopkinson R. G., Petherbridge P. *Daylighting* Heinemann, 1966
- [14] LITTEFAIR p. J. *The luminous efficacy of daylight: a review* Lighting Res. & Technology, 1985, pp 162-182
- [15] Maccari A. *I materiali trasparenti innovativi: caratteristiche ed applicazioni* ENEA-ERG/SIRE
- [16] Moncada Lo Giudice G., De lieto Vollaro A. *Illuminotecnica* Masson, 1996
- [17] Moon P., Spencer D.E. *Illumination from a non-uniform sky* Illuminating Engineering, 1942
- [18] Navvab M. *Scale model photometry* Istanbul, Proc of CIE International Lighting Congress, 2001
- [19] Palladino P., Krochmann E., Krochmann J. *Developments in photometry and photometers* AIDI, 4° Congresso Internazionale, 1990
- [20] Pierpoint W. " *A simple sky model for daylight calculations*" Proc. of the Intern. Daylighting Conference, 1983, Phoenix, Arizona
- [21] Pollini F. *La trasmittanza "diffusa" alla luce naturale dei materiali trasparenti per l'edilizia* Luce, n. 2, 1988
- [22] *Predicting Daylighting And Lighting Performance SUPERLITE 2.0* Lawrence Berkeley Laboratory, Building Technologies Program Energy & Environment, Division Building Berkeley, USA, 1994
- [23] Saint Gobain *Manuale Tecnico Del Vetro* Fabbrica Pisana, 1993
- [24] Treado S., Gillette G. *Measurements of sky luminance, sky illuminance, and horizontal solar radiation* Journal of the IES, 1983, pp 30-35
- [25] Uni 10380 *Illuminotecnica, illuminazione di interni con luce artificiale* 1994, Maggio
- [26] Uni 10339 *Impianti aeraulici a fini di benessere* 1995, Giugno
- [27] Waldram p. J. *Sky factor value of windows* Transactions of the IES, 1944, pp 16-37