

POLITECNICO DI MILANO  
I Facoltà di Architettura MI  
Corso in Architettura MI



LA PROGETTAZIONE DELL' ILLUMINAZIONE NATURALE.  
CONFRONTO TRA METODI SEMPLIFICATI E MODELLI.

Relatore: Alessandro Rogora

Studentessa: Simona Ghezzi  
Matricola: 208634

Anno Accademico 2008-2009

## **Indice**

Introduzione	3
<b>Cap. 1 Le sorgenti di luce</b>	<b>5</b>
1.1 Introduzione	5
1.2 Componente diretta e componente diffusa	9
1.3 Il sole come sorgente luminosa	11
1.4 Il cielo come sorgente luminosa	20
<b>Cap. 2 I metodi di calcolo manuale</b>	<b>22</b>
2.1 Introduzione	22
2.2 Fattore di luce diurna	22
2.3 Il diagramma di Waldram	26
2.4 I nomogrammi della B.R.S.	28
<b>Cap. 3 I metodi di calcolo computerizzato</b>	<b>36</b>
3.1 Introduzione	36
3.2 Algoritmi di calcolo: ray-tracing e radiosity	37
3.3 Rafis	39
3.4 Superlite 2.0	41
3.5 Daylight	43
<b>Cap. 4 Analisi attraverso l'uso di modelli in scala</b>	<b>44</b>
4.1 Introduzione	44
4.2 Uso del cielo naturale	45
4.3 Uso di cieli artificiali	46
4.3.1 Cielo artificiale a specchi	47
4.3.2 Cielo artificiale a volta	48
4.3.3 Cielo artificiale a porzione di volta	51
4.4 Scelta del modello e della scala di rappresentazione	53
4.5 Scelta dei materiali e delle tecniche costruttive	56
4.6 Rilievi fotometrici	57
4.7 Rilievi fotografici	59
<b>Cap. 5 Confronto tra i metodi e conclusioni</b>	<b>61</b>
5.1 Modelli di ambiente	61
5.2 Calcoli manuali	64
5.3 Calcoli computerizzati	74
5.4 Uso modelli in scala	83
5.5 Confronto tra i metodi e conclusioni	84
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>87</b>

## INTRODUZIONE

La luce naturale è da sempre uno degli elementi caratterizzanti l'architettura. Fin dall'inizio del novecento, nonostante il diffondersi dell'illuminazione artificiale, ha costituito la sorgente luminosa primaria utilizzata nelle ore diurne.

Essa ha progressivamente perso la sua funzione a partire dalla seconda metà del secolo, in corrispondenza della disponibilità, su larga scala, di energia elettrica a basso costo. Come risultato ha portato a definire costruzioni sempre più dipendenti dall'energia elettrica e dotate di aperture ridotte secondo il principio di sostituzione della luce diurna.

Con la crisi energetica degli anni '70 si è tornati a riconsiderare tutte le potenzialità della luce naturale e la dinamicità e variabilità della radiazione solare torna ad essere vista come un pregio e non più come un difetto.

Tutto ciò ha portato al diffondersi di soluzioni tecnologiche innovative, dove le superfici trasparenti hanno acquisito sempre più importanza sia di carattere tipologico che di distribuzione planivolumetrica.

Si determina così una elevata disponibilità di luce naturale all'interno degli ambienti, che va controllata per evitare:

1. condizioni di surriscaldamento nelle zone vicine alle finestre durante il periodo estivo;
2. fenomeni di abbagliamento causati dalla radiazione diretta del Sole;
3. distribuzione non uniforme dell'illuminamento interno.

Per questo gli elementi vetrati vengono arricchiti con sistemi di schermatura per il controllo della radiazione solare.

Fin dalle prime fasi di progetto, una corretta valutazione e previsione delle condizioni di illuminazione naturale all'interno di un ambiente è raramente presa in considerazione.

Questo è dovuto alla scarsa conoscenza e disponibilità di strumenti previsionali di uso semplice, che consentono di valutare a priori le prestazioni del sistema di illuminazione naturale non solo dal punto di vista quantitativo delle grandezze fotometriche, ma anche dal punto di vista qualitativo dell'ambiente luminoso.

Il lavoro di tesi si propone di illustrare e mettere a confronto tre diversi approcci:

- i metodi di calcolo manuale;
- la progettazione attraverso l'uso di calcoli computerizzati;
- l'uso di modelli in scala.

Il primo punto è di natura quantitativa, dal momento che il progettista si deve confrontare con requisiti normativi che si traducono nel concetto di fattore di luce diurna, del quale viene fissato un valore medio minimo da rispettare in funzione della destinazione d'uso.

Il secondo punto è di natura sia quantitativa che qualitativa, dal momento che i software offrono risultati sia numerici che rendering fotorealistici dell'ambiente.

Il terzo punto è più di natura qualitativa che quantitativa e ciò permette un'immediata percezione visiva di quello che succede in determinate condizioni.

Questi sono tre differenti modi di procedere all'analisi dell'illuminazione naturale, confrontati per permettere al progettista di avere a disposizione gli strumenti più diffusi per l'analisi dell'illuminazione naturale all'interno di due tipologie di ambiente.

Il primo ambiente è caratterizzato da una finestra verticale su una parete laterale esposta a sud, il secondo è caratterizzato da una finestra posizionata sul soffitto.

Le indagini sono state effettuate in diversi punti posizionati su un piano di lavoro posto a 0.9 m di altezza dal pavimento e in completa assenza di ostruzioni esterne.

# Capitolo 1 LE SORGENTI DI LUCE

## 1.1 Introduzione

Quella che viene identificata come luce naturale è l'effetto prodotto sull'occhio umano dall'emissione visibile del Sole. Il Sole, che può essere assimilato ad un corpo nero caratterizzato da una temperatura superficiale apparente di circa 5780 K, emette nello spazio circostante una quantità di energia raggianti elevatissima (pari a  $3,88 \cdot 10^{26}$  W) in un intervallo di lunghezze d'onda compreso fra 0,2 e 3  $\mu\text{m}$ . Di tale energia, soltanto una minima parte, relativa al campo di emissione compreso fra 0,4 e 0,8  $\mu\text{m}$ , viene percepita come luce dall'occhio umano.

Il Sole è dunque una sorgente luminosa, la cui emissione può essere caratterizzata attraverso le grandezze fisiche che ne descrivono la quantità e qualità cromatica: **flusso luminoso**, in relazione alla quantità, e **spettro di emissione**, in relazione alla qualità.

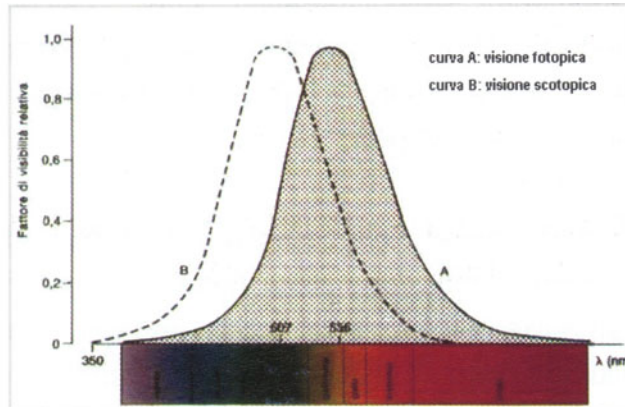
Il flusso luminoso rappresenta l'effetto che ha sull'occhio l'emissione complessiva della sorgente o anche l'entità dell'impressione luminosa prodotta dalla radiazione emessa dalla sorgente.

Lo spettro rappresenta la distribuzione del flusso luminoso per le lunghezze d'onda che sono responsabili delle differenti sensazioni cromatiche.

Caratteristiche quantitative e qualitative della luce vengono in ogni caso percepite sinteticamente dall'occhio umano, che pesa in modo differente le diverse radiazioni monocromatiche.

L'andamento del peso che l'occhio attribuisce alle differenti lunghezze d'onda della radiazione è descritto da una particolare curva detta **curva della visione fotopica** (visione diurna). Tale curva rappresenta l'andamento che assumono i valori del cosiddetto **fattore di visibilità relativo  $V(\lambda)$**  alle differenti lunghezze d'onda. Tale fattore di visibilità è un coefficiente dimensionale, compreso fra 0 e 1, che rappresenta in percentuale il peso che l'occhio umano assegna a ciascuna lunghezza d'onda della radiazione nella banda del visibile.

Si può dire che, a parità di illuminazione, i colori che appartengono alla zona centrale (verdi, gialli e arancioni) risultano ben visibili per l'occhio mentre i blu e i rossi sono molto meno visibili.



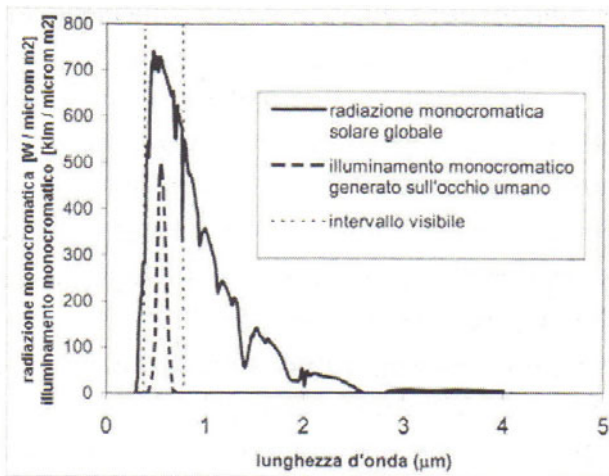
Fattore di visibilità relativa dell'occhio umano  $V(\lambda)$

Se è nota la potenza specifica  $W(\lambda)$  (che si misura in  $W/m^2$ ) di una radiazione visibile monocromatica (emessa ad una specifica lunghezza d'onda  $\lambda$ ) per la quale il fattore di visibilità vale  $V(\lambda)$ , l'illuminamento  $E(\lambda)$  che tale radiazione produce vale:  $E(\lambda) = 683 W(\lambda) V(\lambda)$  lux

Come esempio nella tabella sono riportati i valori di illuminamento prodotti da radiazioni che hanno lunghezze d'onda differenti ma che hanno identica potenza monocromatica specifica pari a  $W(\lambda) = 100 W / (m^2 \mu m)$ .

lunghezza d'onda [ $\mu m$ ]	colore	fattore di visibilità relativa [-]	efficienza luminosa [lm/W]	illuminamento spettrale [lux/ $\mu m$ ]
0.4	blu	0.0004	683	27
0.45	azzurro	0.038	683	2595
0.5	verde	0.323	683	22061
0.55	verde-giallo	1	683	68300
0.6	giallo	0.5	683	34150
0.65	arancione	0.0816	683	5573
0.7	rosso	0.0052	683	355

Illuminamenti prodotti da radiazioni pressoché monocromatiche per diverse lunghezze d'onda. La radiazione monocromatica è rappresentata dalla lunghezza centrale della banda.



Nella figura sono rappresentati gli spettri della radiazione solare globale e del flusso luminoso che essa genera. La potenza specifica della radiazione solare globale, è rappresentata dall'area sottesa dalla curva continua, cioè dalla somma dei singoli contributi delle radiazioni monocromatiche che si leggono sull'asse delle ordinate,

espressi nell'unità di misura  $W / (m^2 \mu m)$ .

L'illuminamento generato da tale radiazione è rappresentato dall'area sottesa dalla curva tratteggiata, cioè dalla somma dei singoli illuminamenti monocromatici che si leggono sull'asse delle ordinate espressi nell'unità di misura  $lumen / (m^2 \mu m)$ .

Per quanto riguarda l'emissione del Sole fuori dall'atmosfera terrestre, flusso luminoso e distribuzione spettrale risultano costanti.

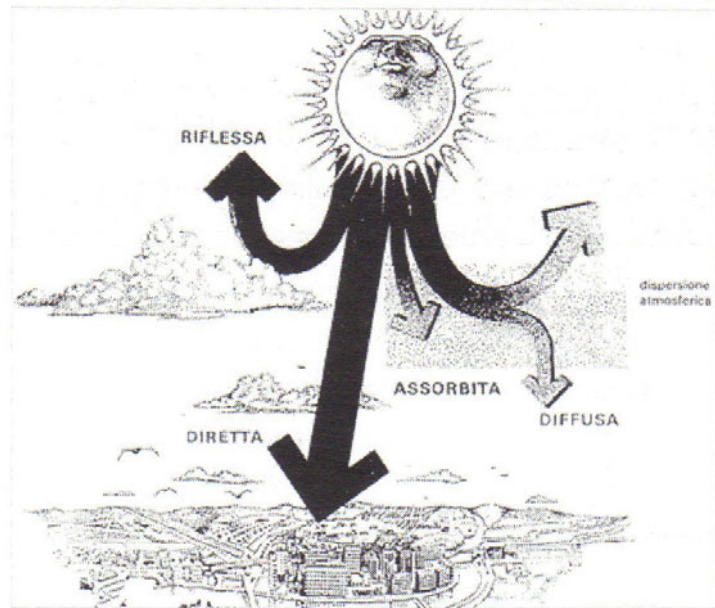
Alla distanza media Sole-Terra, l'irradianza solare è pari a  $1353 W / m^2$  (costante solare), cui corrisponde un illuminamento (flusso luminoso per unità di superficie) di 133800 lux.

Fuori dall'atmosfera e rispetto ad ogni luogo della Terra, l'emissione solare ha una direzione precisa della quale ci si può fare un'idea immaginando la luce solare come costituita da un fascio di raggi paralleli.

Nell'attraversare l'atmosfera della Terra, la radiazione solare viene in parte **assorbita** dai gas dell'atmosfera e in parte **diffusa**.

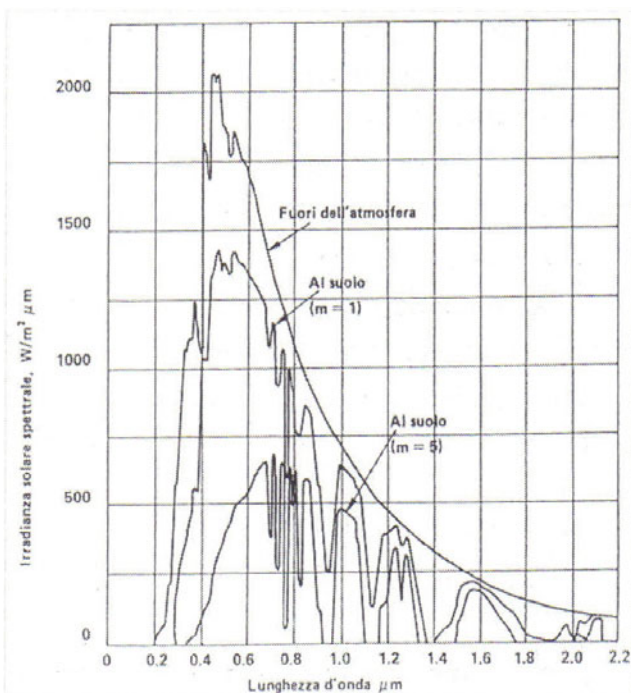
Questa porzione di flusso, deviata una prima volta dai gas atmosferici incontra poi altre molecole e particelle sospese che la deviano tutt' intorno.

Da tutto questo si genera un campo di *luce diffusa*, identificato con il termine di luce del cielo.



Fenomeni di assorbimento e riflessione della radiazione diretta del Sole

La luce che giunge sulla superficie della Terra risulta dunque la somma della luce diffusa dal cielo, che giunge da ogni punto della volta celeste, e dalla quota di luce solare che non è stata deviata e che conserva spettro e direzione originari.



Composizione spettrale della luce solare incidente sulla superficie terrestre rispetto a quella che giunge al bordo dell'atmosfera.



## 1.2 Componente diretta e componente diffusa

Ai fini della quantità e qualità dell'illuminazione naturale degli spazi occorre evidenziare come la luce del sole e quella proveniente dalla volta celeste siano entrambe di grande importanza.

La luce del sole (**componente diretta**) è una luce bianca, più calda, (temperatura di colore pari a 5500 K) concentrata, con una luminanza elevatissima, che produce contrasti molto marcati, e che provoca dei disturbi alla visione (abbagliamento e discomfort visivo).

Dal momento che tale luce occupa un'area visiva ridotta, ed è caratterizzata da una spiccata direzionalità, per questo si ha una percezione spaziale degli oggetti non ottimale.

Poichè questi sono percepiti con una luminosità eccessiva asimmetrica, molto forte da una parte e molto debole dalla parte opposta, ciò impedisce di coglierne appieno la tridimensionalità.

La luce proveniente dal cielo (**componente diffusa**) è una luce bianca più fredda (temperatura di colore 6500 K) con una luminanza relativa contenuta, perchè distribuita sull'intera volta celeste.

Essendo una luce diffusa, risulta molto uniforme e produce quindi contrasti poco marcati fra le diverse parti di un locale, così come fra l'interno e l'esterno. La percezione degli oggetti che ne deriva risulta un po' piatta per la mancanza di effetti che mettano in risalto le diverse parti.

L'effetto migliore si ottiene, pertanto, assicurando la compresenza di entrambe le componenti.

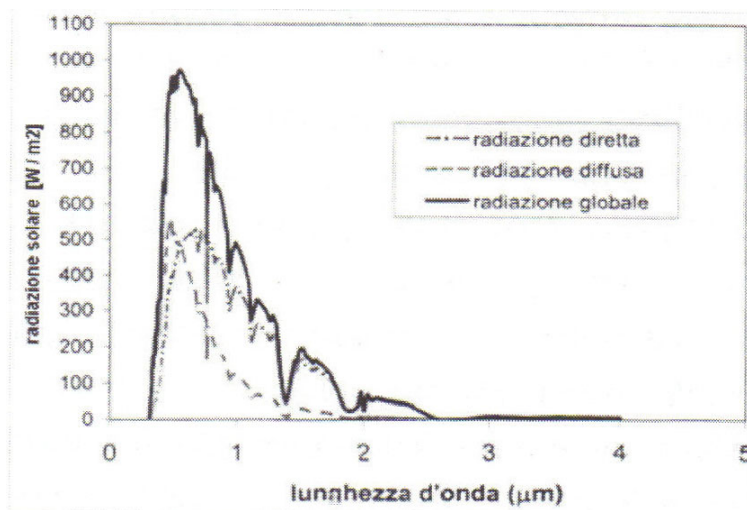
Per conoscere la quantità di luce naturale che penetra all'interno degli ambienti, occorre come prima cosa conoscere la quantità di luce che, per ogni istante, giunge globalmente sulla Terra: le componenti diretta e diffusa dipendono molto dalle condizioni atmosferiche e meteorologiche.

In atmosfere molto limpide, la quota di radiazione solare che arriva direttamente dal sole risulta predominante rispetto a quella proveniente dal cielo. Viceversa, in atmosfere molto torbide la quota di radiazione che giunge

sulla Terra direttamente dal sole è ridotta, mentre prevale quella proveniente dal cielo.

In condizioni di cielo coperto, con il sole coperto dalle nubi, la componente diretta viene a mancare e il campo di illuminazione è diffuso con ombre e contrasti molto piatti.

Nella figura, sotto, sono riportati gli spettri della radiazione solare diretta, diffusa e globale, che si verifica in condizioni di elevata torbidità atmosferica in una giornata di cielo sereno e con un'altezza solare di 45° sull'orizzonte.

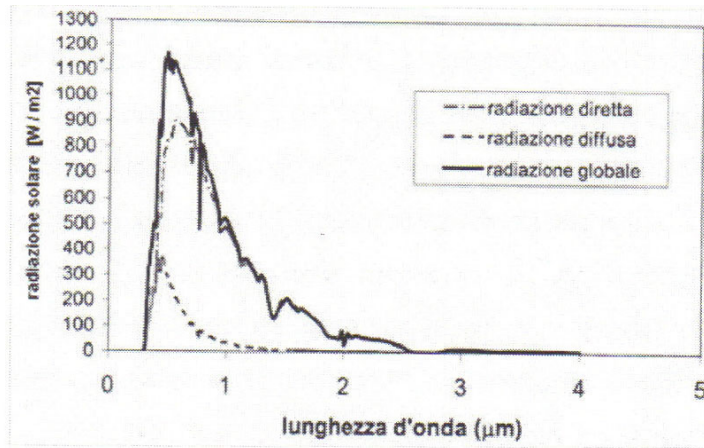


Spettro della radiazione solare globale (scomposto nelle sue componenti diretta e diffusa) relativo a condizioni atmosfere torbide.

Si nota come la radiazione solare diffusa sia simile, come quantità, a quella diretta.

Dal punto di vista spettrale, invece, è evidente che la radiazione diretta è più ricca delle tonalità gialle e rosse, mentre quella diffusa è più ricca delle tonalità azzurre.

Con gli stessi spettri, ma in una giornata a condizioni atmosferiche limpide, si osserva come la componente diretta sia dominante rispetto a quella diffusa.



Spettro della radiazione solare globale (scomposto nelle sue componenti diretta e diffusa) relativo a condizioni atmosfere limpide.

### 1.3 Il sole come sorgente luminosa

Per poter calcolare la radiazione solare che si ha su un piano sulla superficie terrestre, si deve conoscere la posizione relativa del Sole sulla volta celeste e le coordinate del piano. La posizione del Sole è definita se viene specificato il sistema di riferimento.

Per il moto di Rivoluzione che la Terra compie in un anno intorno al Sole, ad un osservatore che sta sulla Terra il Sole sembra spostarsi ogni giorno di circa  $1^\circ$  lungo l'**Eclittica**, da Ovest ad Est.

L'inclinazione dell'Asse Terrestre rispetto all'Asse dell'Eclittica è di  $23^\circ 27'$ , per cui anche i rispettivi Piani ad essi perpendicolari, cioè quello dell'Equatore celeste e dell'Eclittica, si intersecano tra loro mantenendo lo stesso angolo.

Si supponga un osservatore posto sulla Terra e la sfera celeste logicamente concentrica alla Terra.

Ad un dato istante, l'osservatore presenterà una posizione nella volta celeste identificata dal suo **zenit**, che non è altro che il punto corrispondente all'intersezione della volta celeste con la normale della superficie terrestre ove è posto l'osservatore. Sulla sfera celeste, in posizione opposta allo zenit, c'è il **nadir**. L'orizzonte dell'osservatore è invece la circonferenza ricavata

dall'intersezione della sfera celeste con il piano passante per il centro della Terra e ortogonale alla linea congiungente il centro della Terra con lo zenit.

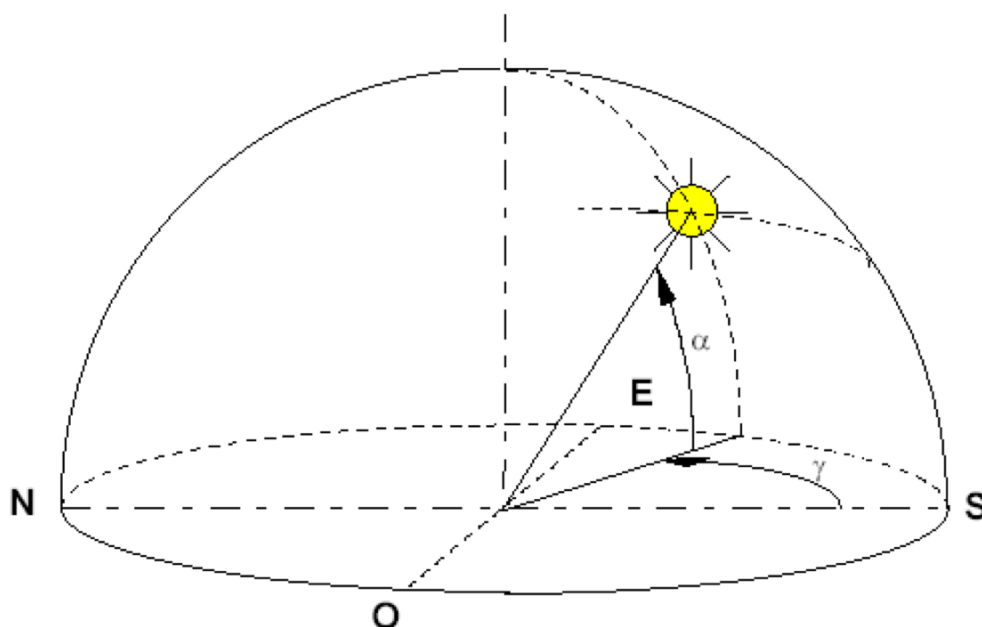
L'**angolo zenitale** ( $\theta_z$ ) è l'angolo formato dalla direzione dello zenit con la congiungente l'osservatore con il Sole (praticamente l'angolo letto sulla sfera celeste congiungente lo zenit con il Sole). Questo angolo può al più variare tra  $0^\circ$  e  $90^\circ$ .

La posizione del Sole rispetto ad un punto sulla Terra è determinata dall'angolo di altezza solare,  $\alpha$ , e dall'angolo azimutale,  $\gamma$ .

L'**altezza solare o altitudine solare** ( $\alpha$ ) è l'angolo formato dalla direzione dei raggi solari (intendendo quelli diretti verso la Terra) con il piano orizzontale (orizzonte).

L'**angolo azimutale o azimut solare** ( $\gamma$ ) è l'angolo formato tra la proiezione sul piano orizzontale dei raggi solari e la direzione sud.

Esso è positivo se la proiezione cade verso est (prima del mezzogiorno solare) ed è negativo se la proiezione cade verso ovest (dopo il mezzogiorno) e può variare tra  $0^\circ$  e  $\pm 180^\circ$ .



**Angolo di altezza solare ( $\alpha$ ) ed angolo azimutale ( $\gamma$ )**

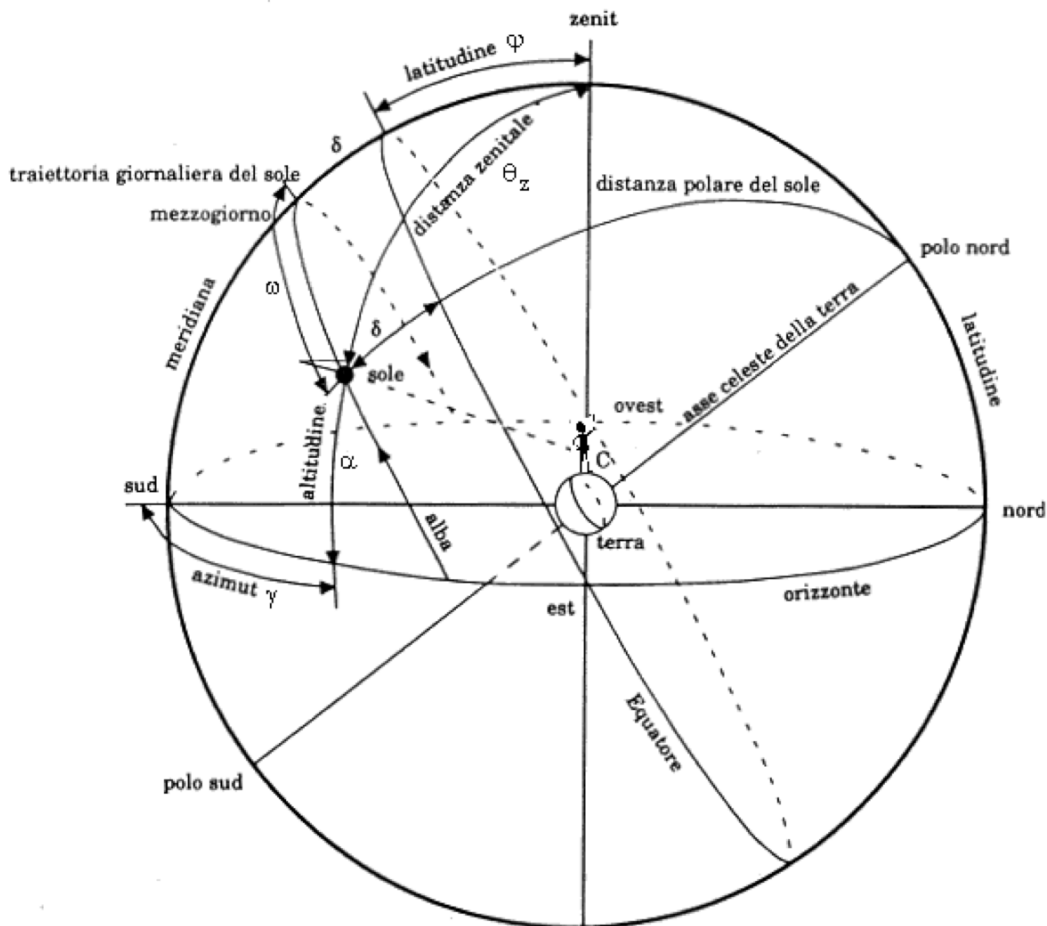
Questi due angoli dipendono a loro volta dalla declinazione  $\delta$ , dalla latitudine  $\varphi$  e dall'angolo orario  $\omega$ .

Si definisce **angolo orario** ( $\omega$ ) la distanza angolare tra il Sole e la sua posizione a mezzogiorno lungo la sua traiettoria apparente sulla volta celeste.

Esso è anche pari all'angolo di cui deve ruotare la terra affinché il Sole si porti sopra il meridiano locale.

Tale angolo è nullo a mezzogiorno, positivo nelle ore antimeridiane e negativo nelle ore pomeridiane. Esso risulta dato dalla seguente relazione:

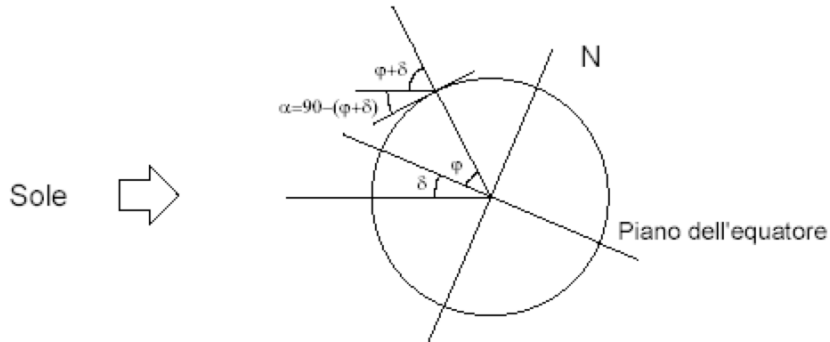
$$\omega = 15 \cdot (12 - \text{orario}) \text{ gradi}$$



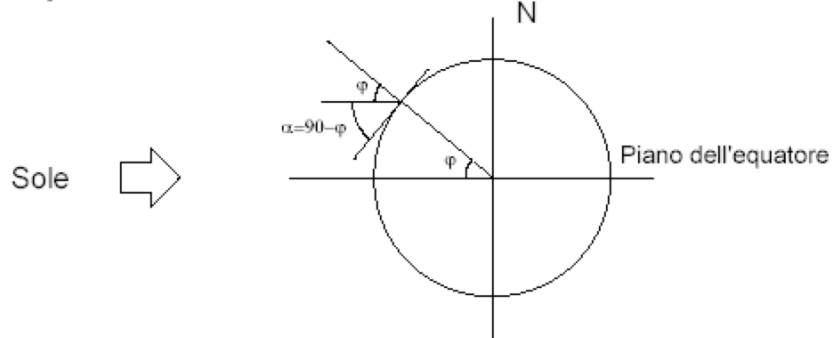
**Sfera celeste e coordinate del Sole relative ad un osservatore posto nel punto C**

Definite queste grandezze, l'altezza ( $\alpha$ ) del Sole alle 12 in un punto di latitudine  $\varphi$  può essere ricavata, ai solstizi ed agli equinozi, dalla seguente Figura:

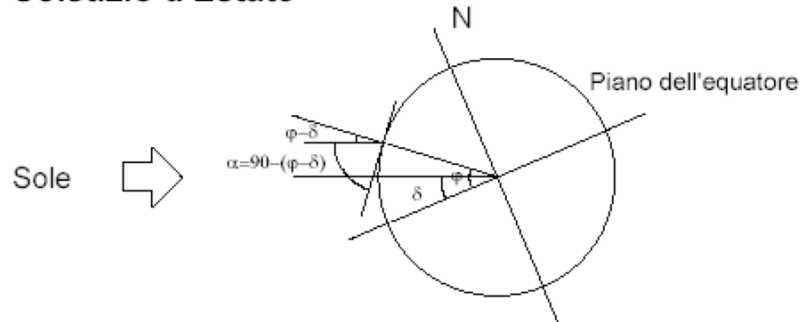
### Solstizio d'Inverno



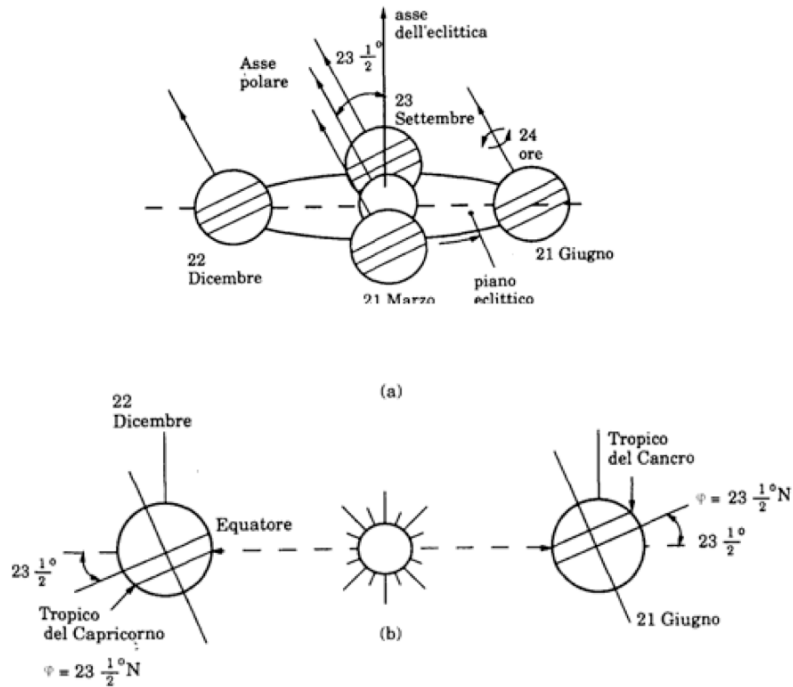
### Equinozio di Primavera e d'Autunno



### Solstizio d'Estate



La Figura mostra la posizione della Terra attorno al Sole in corrispondenza degli equinozi e dei solstizi.



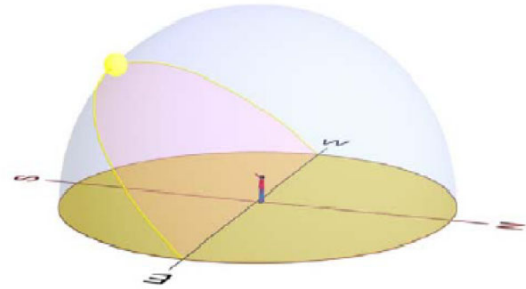
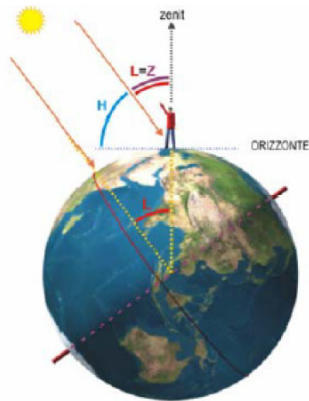
### Moto della Terra attorno al Sole

All'Equinozio di primavera (21 Marzo), il Sole ha declinazione  $0^\circ$ .

Per l'osservatore di una qualunque località della Terra, esso sembra spostarsi, nel suo percorso diurno, lungo l'Equatore celeste nel cielo, da Est a Ovest in senso orario verso Sud nell'Emisfero boreale, in senso antiorario verso Nord in quello australe.

I raggi del sole arrivano perpendicolari all'asse terrestre, per cui il dì è uguale alla notte in tutte le località della terra, tranne ai Poli, dove rimane sull'orizzonte tutto il giorno, dal momento che l'Equatore celeste coincide col piano dell'orizzonte.

### Agli Equinozi



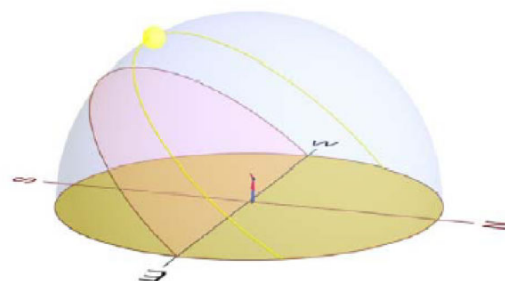
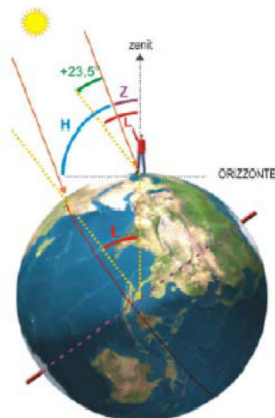
L = latitudine H = altezza del Sole Z = distanza zenitale

### Posizione del Sole agli equinozi

Dall'Equinozio di primavera al Solstizio d'estate (21 Giugno), il Sole si sposta lungo il ramo ascendente dell'Eclittica, fino a raggiungere la sua massima declinazione positiva di  $+23^{\circ} 27'$ .

Pertanto nel cielo di ogni località esso percorre archi diurni quasi paralleli all'Equatore celeste, sempre più spostati verso Nord. Nell'emisfero boreale il dì è via via più lungo della notte mentre succede il contrario nell'emisfero australe.

### Al solstizio d'estate



L = latitudine H = altezza del Sole Z = distanza zenitale

### Posizione del Sole al solstizio d'estate



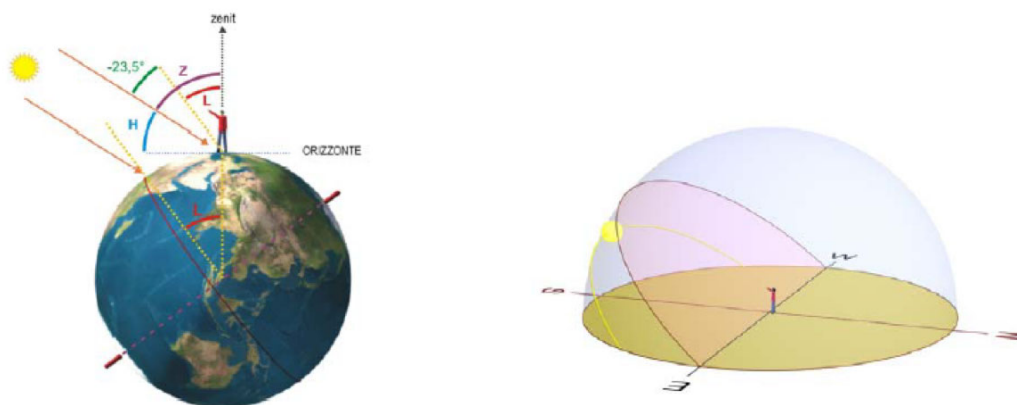
Dal Solstizio d'estate all'Equinozio d'autunno (21 Settembre), il Sole si sposta in senso inverso sul ramo ascendente dell'Eclittica, fino a raggiungere la declinazione  $0^\circ$ ; ripercorre quindi a ritroso le sue posizioni nel cielo precedenti il solstizio estivo.

Dall'Equinozio di autunno al Solstizio d'inverno (21 Dicembre), il Sole si sposta lungo il ramo discendente dell'Eclittica, fino a raggiungere la sua minima declinazione negativa di  $-23^\circ 27'$ .

Esso percorre sempre archi diurni quasi paralleli all'Equatore celeste di ogni località, di giorno in giorno più spostati verso Sud.

Perciò nell'emisfero boreale il dì è progressivamente più corto rispetto alla notte, mentre succede il contrario nell'emisfero australe.

#### Al solstizio d'inverno



L = latitudine H = altezza del Sole Z = distanza zenitale

#### Posizione del Sole al solstizio d'inverno

Dal Solstizio invernale all'Equinozio di primavera, il Sole si sposta in senso inverso al percorso precedente, sul ramo discendente dell'Eclittica; di nuovo sembra tornare indietro rispetto alle sue posizioni nel cielo, con archi diurni sempre più spostati verso Nord nel nostro emisfero fino a raggiungere la posizione dell'Equinozio di primavera. E il ciclo annuale del sole ricomincia.

Ricapitolando: il Sole agli Equinozi percorre l'Equatore celeste di un luogo.

Nel semestre estivo percorre archi diurni spostati, rispetto all'Equatore celeste, verso Nord di un angolo uguale alla declinazione del sole.

Nel semestre invernale percorre archi diurni spostati, rispetto all'Equatore celeste, verso Sud, sempre di un angolo uguale alla declinazione del sole.

Definiti questi angoli, si può affermare che per data località, quindi per data posizione

geografica, in assenza di rifrazione dovuta all'atmosfera terrestre (cosa che per scopi pratici sarà trascurata, perchè tale ipotesi porta ad una leggera sottostima dell'altezza solare reale di al più 34' all'orizzonte), la posizione del Sole in ogni istante dell'anno può essere ottenuta dalle seguenti relazioni trigonometriche:

$$\cos\theta_z = \sin \alpha = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega$$

$$\cos(\gamma) = \frac{\sin(\alpha) \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta)}{\cos(\alpha) \cdot \cos(\varphi)}$$

dove con  $\varphi$  si è indicata la latitudine della località.

Qualche volta viene usata la seguente equazione per ricavare l'angolo azimutale:

$$\sin(\gamma) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\cos(\alpha)}$$

che dovrebbe essere evitata o usata con accortezza, poiché dà valori inesatti per  $\gamma > 90^\circ$ .

L'equazione che determina  $\cos\theta_z$  può essere utilizzata per trovare l'angolo orario dell'alba,  $h_a$ ; infatti, questa si verifica per  $\theta_z = 90^\circ$ , cioè  $\alpha = 0^\circ$ , quindi ponendo  $\cos \theta_z = 0$ , si ha:

$$\cos(h_a) = \frac{-\sin(\varphi) \cdot \sin(\delta)}{\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta)} = -\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)$$

Osservando che l'angolo orario del tramonto differisce da quello dell'alba solo per il segno, si può facilmente affermare che la durata del giorno è pari a 2 volte  $h_a$ . Volendola esprimere in ore si ha:

$$N_d = \frac{2 \arccos[(\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta))]}{15}$$

É opportuno fare alcune osservazioni:

- nelle regioni polari, in inverno, il Sole non sorge mai, quindi non si può parlare di durata del giorno. Ugualmente durante l'estate il Sole non tramonta per sei mesi.
- all'equatore,  $\varphi = 0^\circ$ , perciò  $\omega = 90^\circ$ , quindi la durata del giorno è indipendente dalle stagioni (cioè dalla declinazione solare) ed è sempre pari a 12 ore.
- all'equinozio,  $\delta = 0^\circ$ , perciò  $\omega = 90^\circ$ , quindi la durata del giorno è indipendente dalla latitudine ed è sempre pari a 12 ore.

## 1.4 Il cielo come sorgente luminosa

L'illuminamento prodotto dalla volta celeste su una superficie varia in funzione del livello di luminanza caratterizzante le diverse parti di cielo.

La distribuzione di luminanza dipende dalle condizioni meteorologiche che fanno riferimento a:

- *Cielo sereno*, in cui la distribuzione di luminanza varia in funzione della posizione del sole;
- *Cielo coperto a luminanza costante*, in cui la distribuzione di luminanza è uniforme (tutti i punti del cielo sono caratterizzati dallo stesso valore di luminanza);
- *Cielo coperto a luminanza variabile*, in cui la distribuzione di luminanza varia in funzione dell'angolo di altezza solare;
- *Cielo parzialmente coperto*, in cui la distribuzione di luminanza varia in funzione della posizione del sole e del grado di nuvolosità.

A partire dagli anni '40, sulla base di valori di luminanza misurati sperimentalmente, sono stati definiti alcuni algoritmi.

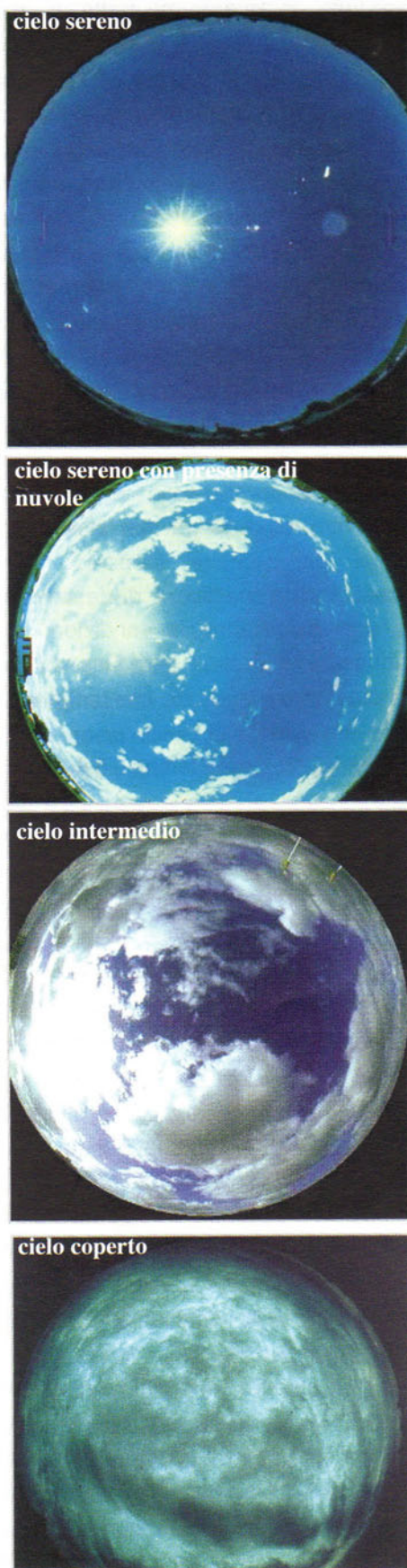
Essi si riferiscono a condizioni standardizzate di illuminazione naturale e sono in grado di fornire la distribuzione di luminanza della volta celeste in termini relativi, ovvero in termini di rapporto fra il valore di luminanza di un punto generico della volta celeste e il valore di luminanza allo zenit.

L'uso di modelli di cielo permette di far riferimento a condizioni standardizzate e di confrontare soluzioni progettuali diverse.

I primi modelli di cielo hanno fatto riferimento a condizioni meteorologiche estreme, ovvero cielo completamente sereno o completamente coperto.

In tale ottica la CIE ha normalizzato il modello di cielo sereno come "Clear Standard Sky" nel 1965 e quello di cielo coperto come "Overcast Standard Sky" nel 1955.

Più recentemente ha standardizzato come cielo intermedio "CIE Intermediate Sky" l'equazione proposta da Nakamura sulla base di una serie di misurazioni della condizioni di illuminazione naturale effettuate in Giappone.



L'obiettivo è quello di descrivere con migliore approssimazione le condizioni reali di illuminazione naturale, introducendo negli algoritmi di calcolo grandezze che tengano conto:

- Della torbidità dell'atmosfera;
- Del livello di inquinamento dell'atmosfera, specifico delle diverse aree geografiche.

In questo quadro la CIE ha promosso, a partire dal 1990, l' International Daylighting Measurement Programme (IDMP), inteso come campagna internazionale di rilevamento delle grandezze caratterizzanti l'illuminazione proveniente dal sole e dalla volta celeste.

La procedura di misura è stata basata sul modello di discretizzazione della volta celeste proposto da Tregenda, secondo il quale la volta non viene pensata come superficie continua, ma viene discretizzata in 145 aree circolari.

La finalità del IDMP consiste nel determinare delle condizioni standardizzabili di illuminazione naturale, non tanto in termini assoluti e generali, quanto piuttosto in termini specifici, in relazione a zone geografiche di ridotta estensione.

Differenti condizioni di cielo.

## Capitolo 2 I METODI DI CALCOLO MANUALE

### 2.1 Introduzione

I metodi di calcolo manuale sono stati sviluppati, a partire dagli anni '60, soprattutto in Inghilterra.

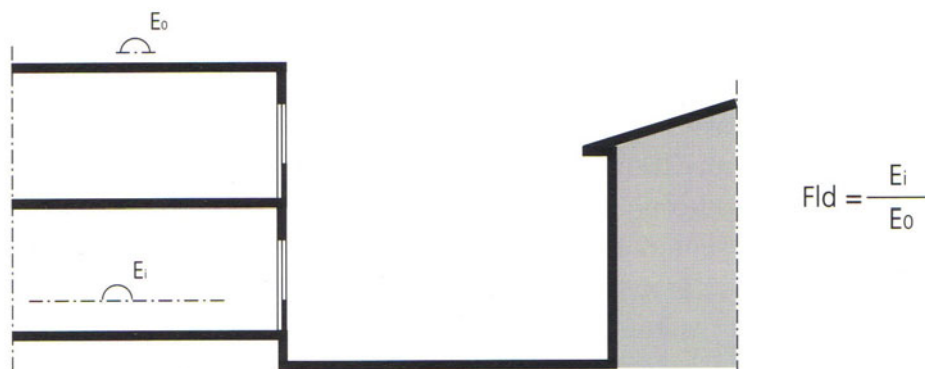
Comportano un'applicazione che, in funzione della crescente complessità dell'ambiente o dell'edificio sottoposto ad analisi, tende ad essere estremamente gravosa, tanto da risultare difficilmente gestibile per il progettista.

Inoltre sono inevitabilmente basati su delle approssimazioni, per cui il loro utilizzo non può che essere limitato a geometrie semplici e alla fase preliminare del progetto.

### 2.2 Fattore di luce diurna

Il fattore di luce diurna è un parametro molto utilizzato per controllare l'efficacia di un ambiente interno nel fornire sufficiente quantità di luce naturale, in relazione all'illuminamento esterno disponibile in assenza di ostruzioni.

Esso esprime il rapporto percentuale fra l'illuminamento naturale che in un certo momento si ha in un punto interno dell'edificio e quello che simultaneamente è prodotto, su un piano orizzontale esterno assimilato a quello interno, dall'intera volta celeste, in assenza di irraggiamento solare diretto.



Descrizione grafica del concetto di luce diurna

Tale quantità è propria di ogni punto dello spazio e dipende dalle caratteristiche dimensionali e fisiche dell'ambiente interno e di quello esterno, non dalle condizioni luminose esterne, né dall'orientamento.

L'indipendenza dall'orientamento si ha solo in presenza di condizioni di cielo coperto e senza irraggiamento solare diretto.

Infatti il cielo coperto ha una radianza indipendente dall'orientamento ed il periodo dell'anno e le condizioni atmosferiche influiscono solo sul valore complessivo del flusso luminoso irradiato, non sulla sua distribuzione spaziale.

Con cielo sereno invece, la distribuzione della radianza varia in continuazione, in funzione della posizione del sole.

Di conseguenza varia anche la distribuzione dell'illuminamento prodotto, condizione questa che renderebbe necessario definire il fattore di luce diurna in riferimento ad uno specifico momento dell'anno e ad un dato orientamento.

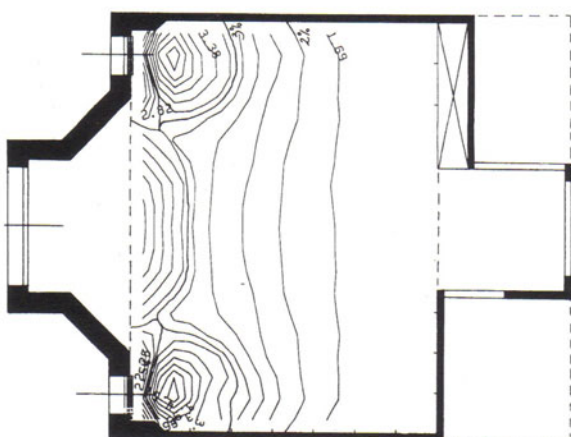
Per queste condizioni di applicabilità, il fattore di luce diurna è un metodo di calcolo e verifica della quantità di luce disponibile.

Esso è maggiormente consigliato per la verifica dell'illuminamento naturale minimo in quelle aree geografiche dove prevalgono condizioni di cielo nuvoloso.

Con condizioni di cielo sereno, in ambienti che non siano rivolti a nord, l'illuminamento naturale, come valore assoluto, risulta di gran lunga superiore a quello ipotizzabile sulla base del fattore di luce diurna.

Il fattore puntuale di luce diurna è quindi una quantità che può essere definita rispetto ad ogni punto dello spazio interno considerato.

Se questo calcolo viene eseguito per un numero considerevole di punti la variazione del fattore di luce diurna può essere rappresentata con una serie di



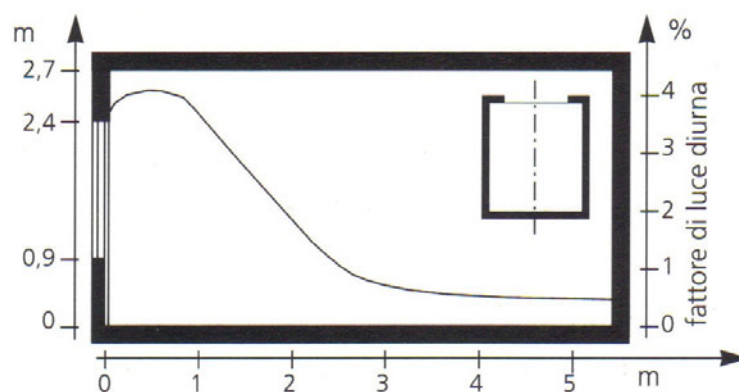
linee o superfici, luogo dei punti caratterizzati da uguale valore del parametro considerato.

Rappresentazione della variazione di illuminamento mediante linee di uguale fattore di luce diurna.

Per il calcolo del fattore di luce diurna si stabilisce un piano di riferimento: tale piano è generalmente assunto orizzontale ed a 80-90 cm di altezza dal suolo, ma in determinati casi può essere utile fare riferimento anche al piano di calpestio o alle superfici verticali dei muri.

Il piano di riferimento orizzontale può coprire l'intera estensione in pianta dell'ambiente oppure essere limitato ad una zona di particolare interesse.

Un'altra forma di rappresentazione, probabilmente di più facile comprensione, è quella che consiste nel sovrapporre il diagramma della variazione del fattore di luce diurna alla sezione trasversale dell'ambiente passante per la finestra.



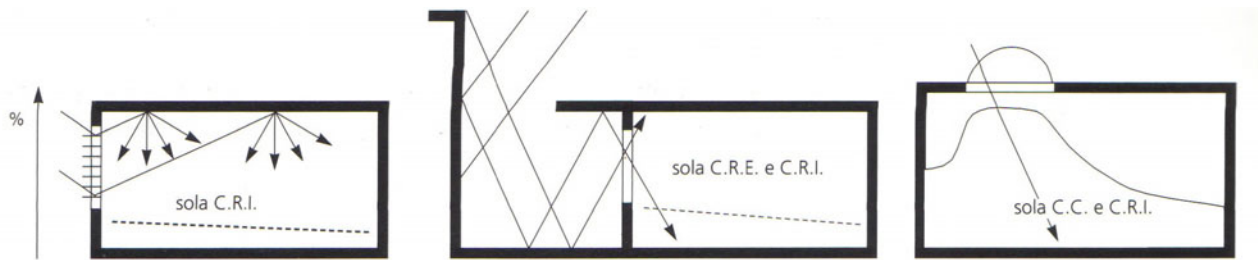
Variazione del fattore di luce diurna in sezione. Sull'asse delle ordinate sono riportate le altezze della sezione dell'ambiente e il valore del fattore di luce diurna.

Il valore dell'illuminamento naturale in un determinato punto di un interno è dato dalla somma di tre componenti:

- la componente cielo (C.C.) , che rappresenta la quantità di luce che giunge nel punto considerato senza essere stata prima riflessa da alcuna superficie;
- la componente riflessa esternamente (C.R.E.);
- la componente riflessa internamente (C.R.I.).

Queste ultime rappresentano rispettivamente la quantità di luce che giunge nel punto considerato, dopo essere stata riflessa dalle superfici esterne ed interne al locale.





Casi limite in cui si hanno solo alcune delle componenti del fattore di luce diurna.

La componente riflessa internamente è sempre presente, a meno di non trovarsi in un locale con pareti completamente assorbenti (nero opaco).

In particolare è quasi indipendente dalla distanza dalla finestra.

La componente riflessa esternamente assume anch'essa valori quasi costanti nei diversi punti dell'interno, ma può anche essere del tutto assente.

La componente cielo segue un andamento che decresce molto con l'aumentare della distanza del punto considerato dalla superficie illuminante e non sempre è presente.

Il fattore di luce diurna, FLD, è calcolato come rapporto fra la somma delle tre componenti nell'ipotesi di assenza di ostruzioni.

$$F_{ld} = \frac{C.C. + C.R.E. + C.R.I.}{E_o}$$

dove  $E_o$  è il valore dell'illuminamento esterno.

Per calcolo delle tre componenti si possono utilizzare differenti metodi.

## 2.3 Il diagramma di Waldram

Utilizzato per il calcolo della componente cielo, originariamente è stato studiato per il cielo a radianza uniforme e per aperture non vetrate.

In seguito è stato esteso anche al caso del cielo a radianza standard CIE.

Il diagramma, che rappresenta la proiezione in piano del mezzo emisfero celeste, è costruito in modo che le parti di esso di uguale area indichino porzioni dell'emisfero celeste di identica radianza.

Per il calcolo della componente cielo è necessario riprodurre la sagoma della finestra e delle ostruzioni esterne sul diagramma, riportando gli angoli individuati dai bordi di queste sui piani verticale e orizzontale, passanti per il punto di verifica e perpendicolari alla parete di apertura.

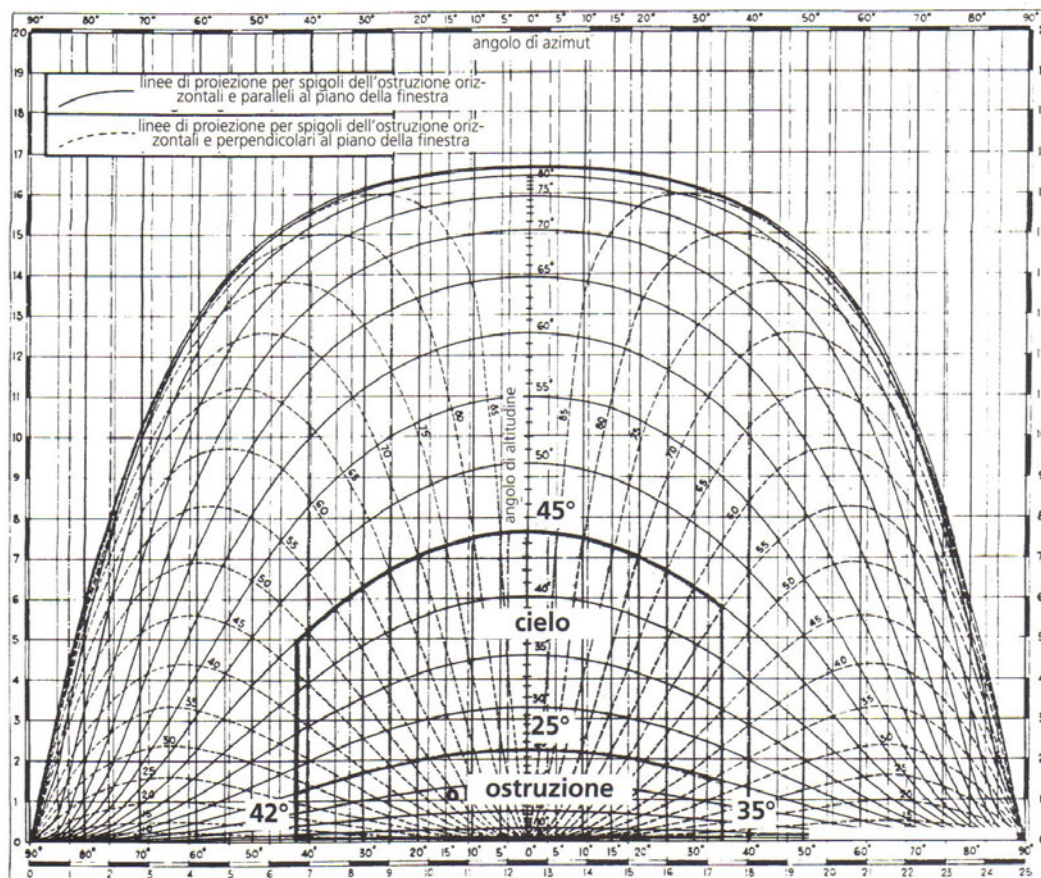
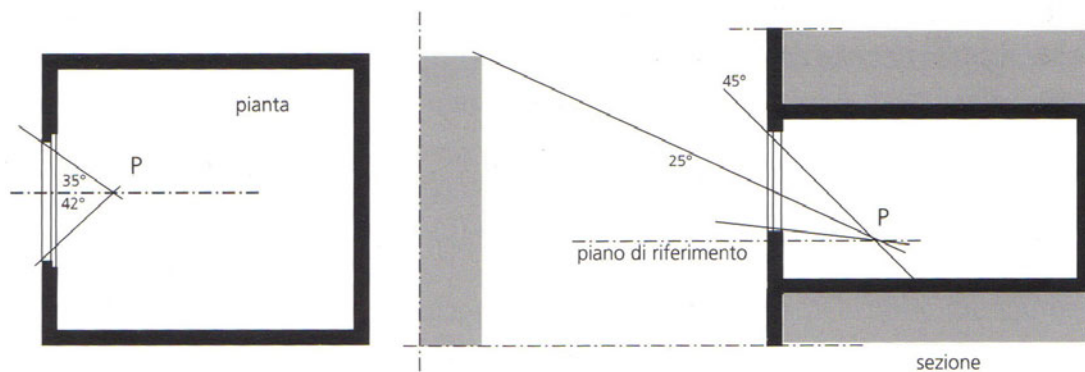


Diagramma di Waldram.



Geometria dell'apertura e dell'ostruzione di cui sono riportate le proiezioni nel diagramma di Waldram.

Nel grafico può essere riportata anche la proiezione di ostruzioni esterne più complesse.

A questo fine possono aiutare le linee tratteggiate presenti sul diagramma, che rappresentano la proiezione di rette orizzontali perpendicolari al piano della finestra.

Il rapporto fra l'area racchiusa nella proiezione della porzione di cielo vista dal punto P e quella dell'intero diagramma moltiplicata per due, fornisce il valore percentuale della componente cielo.

Tale operazione risulta molto semplificata se, come nella figura, il diagramma è diviso secondo una griglia composta da un numero di quadranti multiplo di 50.

La precisione del risultato ottenuto dipende in gran parte dall'accuratezza con cui sono stati calcolati gli angoli sottesi dagli spigoli della finestra e delle ostruzioni esterne.

Inoltre si deve considerare l'idoneità di riferirsi a cielo a radianza CIE o a quello a radianza uniforme come modello delle condizioni meteorologiche effettive.

Questo metodo può essere utilizzato anche per calcolare la componente riflessa esternamente, anche se può essere trascurata in regioni a clima temperato-umido.

## 2.4 I nomogrammi della B.R.S.

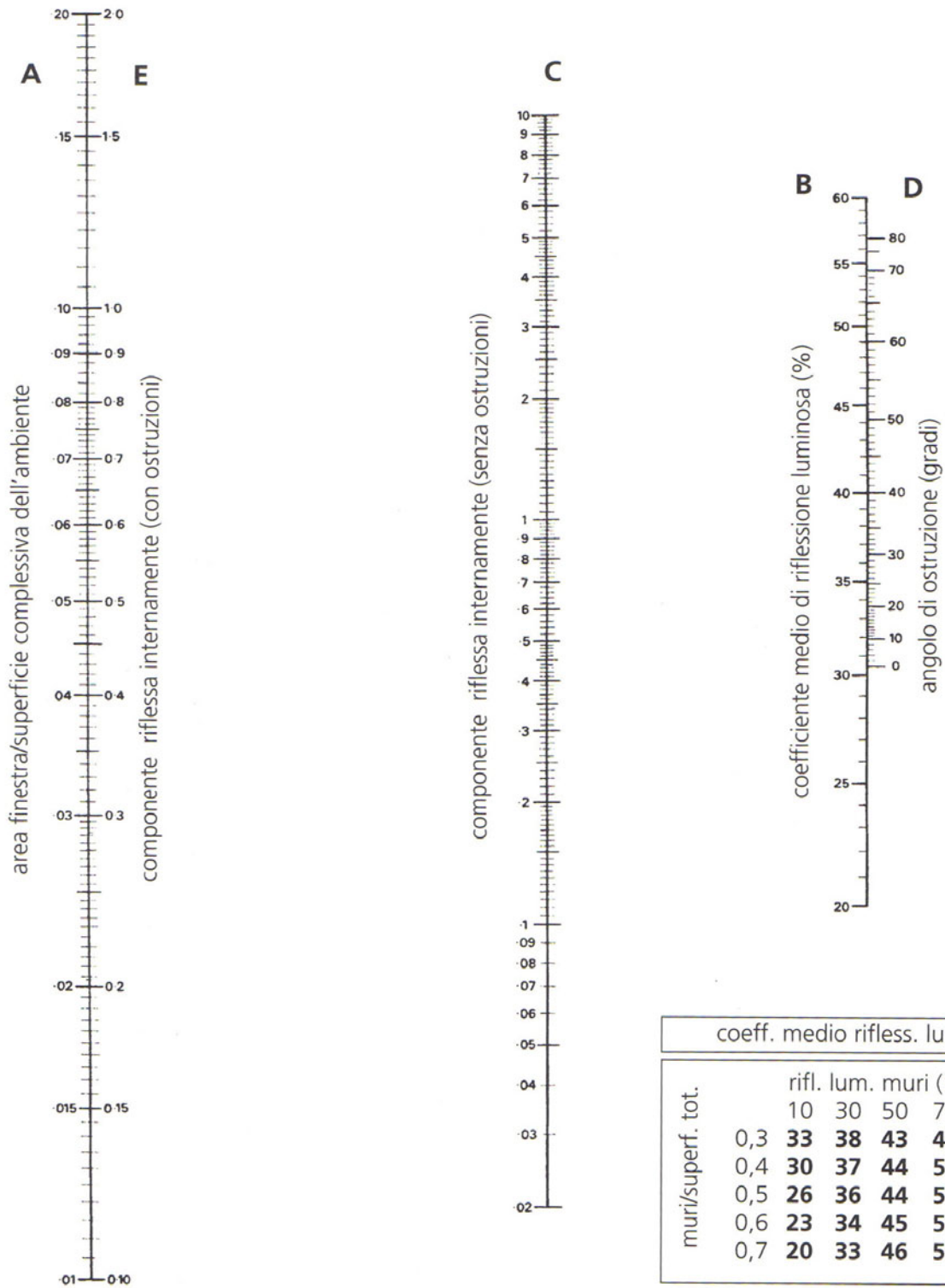
Usati per il calcolo della componente riflessa internamente, sono tre nomogrammi realizzati dalla Building Research Station nell'ipotesi di cielo a radianza standard CIE, sia con finestre verticali che orizzontali o inclinate e con ostruzioni esterne o senza.

I nomogrammi sono validi sotto le seguenti ipotesi di base:

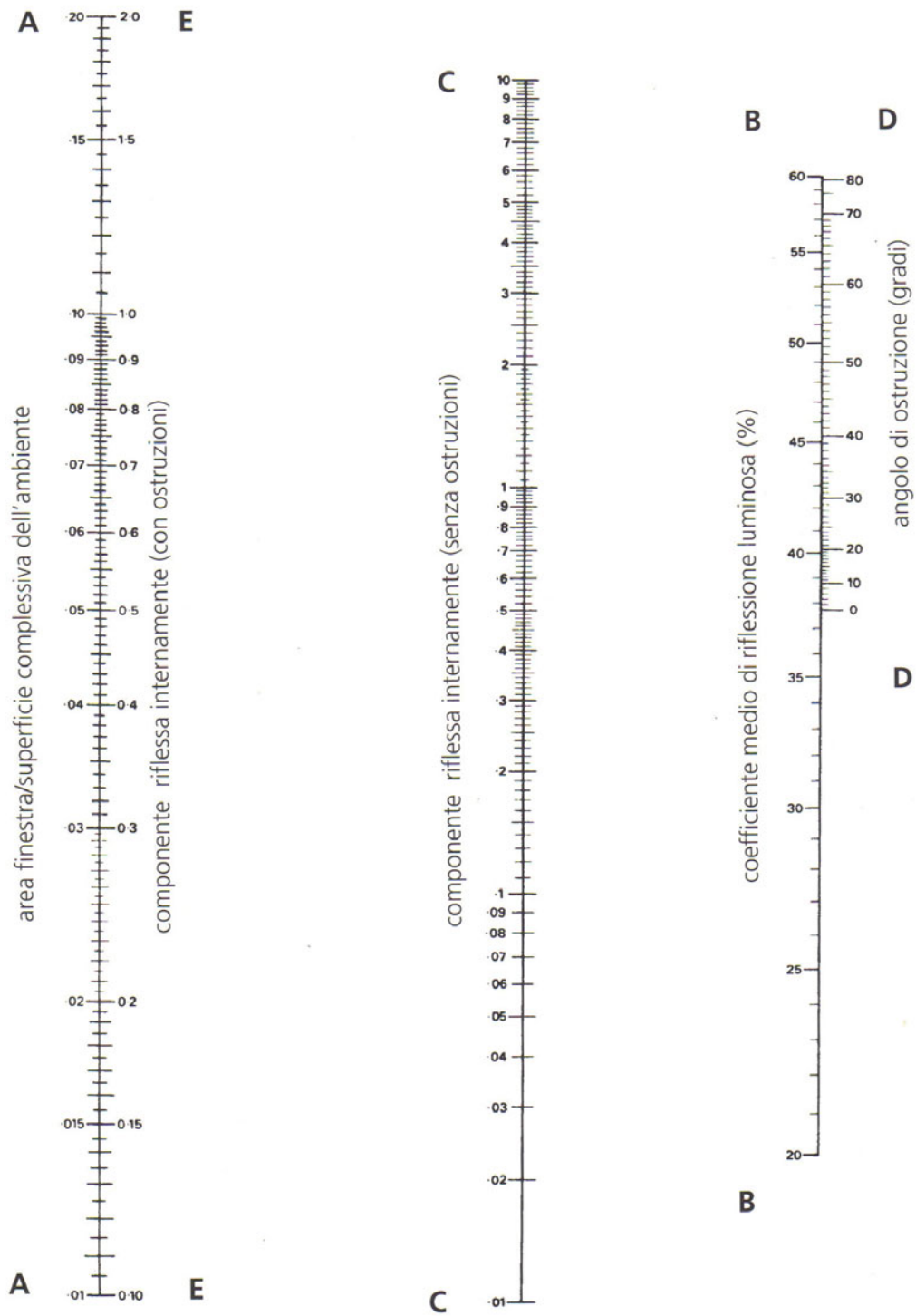
- Coefficiente di riflessione luminosa di soffitto e pavimento pari, rispettivamente al 70% e al 15%;
- Luminanza del terreno e delle ostruzioni esterne pari a un decimo quella media del cielo ( $3183 \text{ cd/m}^2$ );
- Ostruzioni esterne continue, orizzontali e parallele alla facciata in esame.

Il primo dei tre nomogrammi riportati è valido per il calcolo della componente riflessa internamente media, con finestre verticali e luce proveniente da una sola apertura laterale.

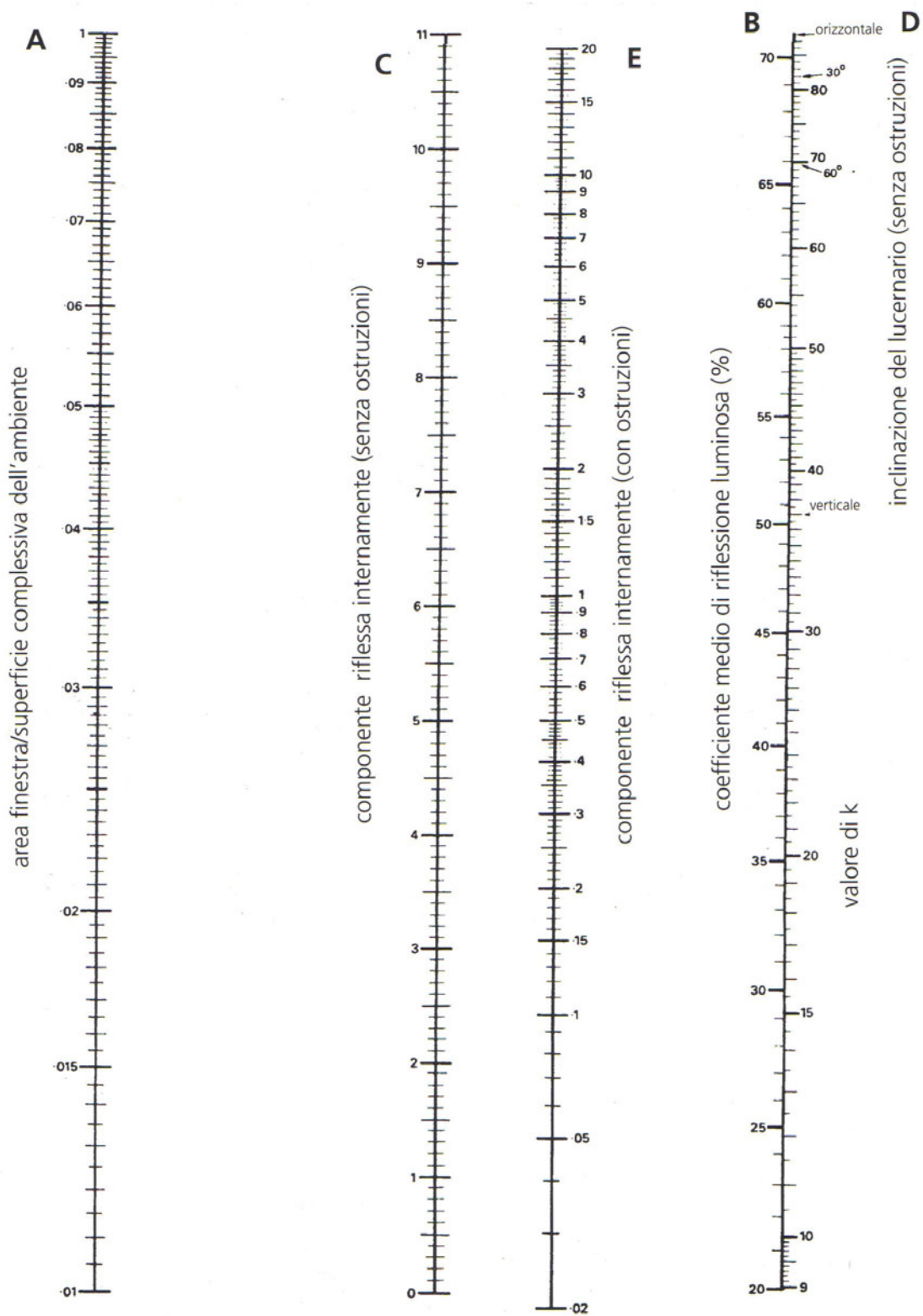
Il calcolo del coefficiente medio di riflessione luminosa (vedi tabella) è da riportare sulla scala B del nomogramma, noti il rapporto tra la superficie dei muri e quella di tutte le superfici che delimitano l'ambiente ed il coefficiente medio di riflessione luminosa dei muri.



Nomogramma per il calcolo della componente riflessa internamente media nel caso di una sola finestra laterale.



Nomogramma per il calcolo della componente riflessa internamente minima nel caso di finestre verticali.



Nomogramma per il calcolo della componente riflessa internamente in interni illuminati da lucernari.

Il secondo nomogramma serve per la componente riflessa internamente minima con finestre verticali.

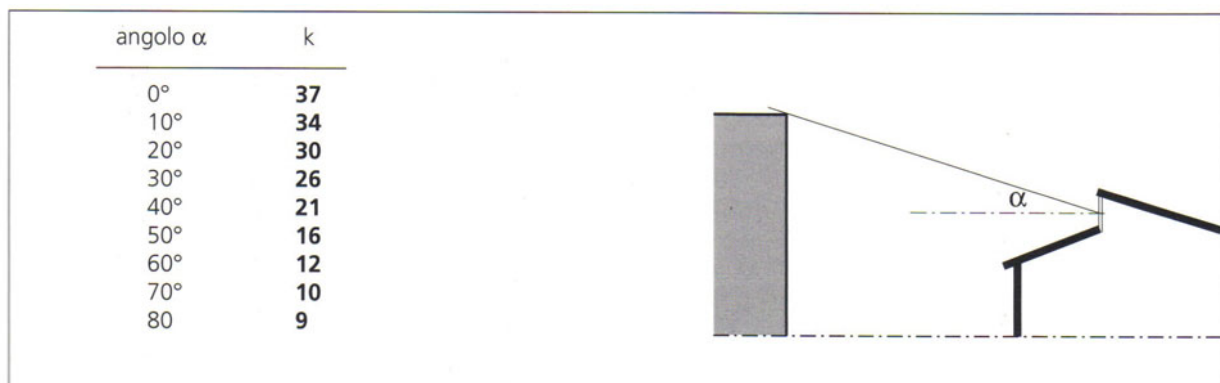
Per l'utilizzo di questi due nomogrammi, è necessario conoscere il rapporto fra la superficie vetrata e l'area totale dell'involucro (scala A), nonché il coefficiente medio di riflessione delle superfici interne (scala B).

La retta che congiunge i due punti individuati sulle scale A e B, interseca la scala C in corrispondenza del valore della componente riflessa internamente, senza ostruzioni esterne.

In presenza di ostruzioni esterne, individuate dall'angolo di altezza  $\alpha$ , questo viene riportato sulla scala D.

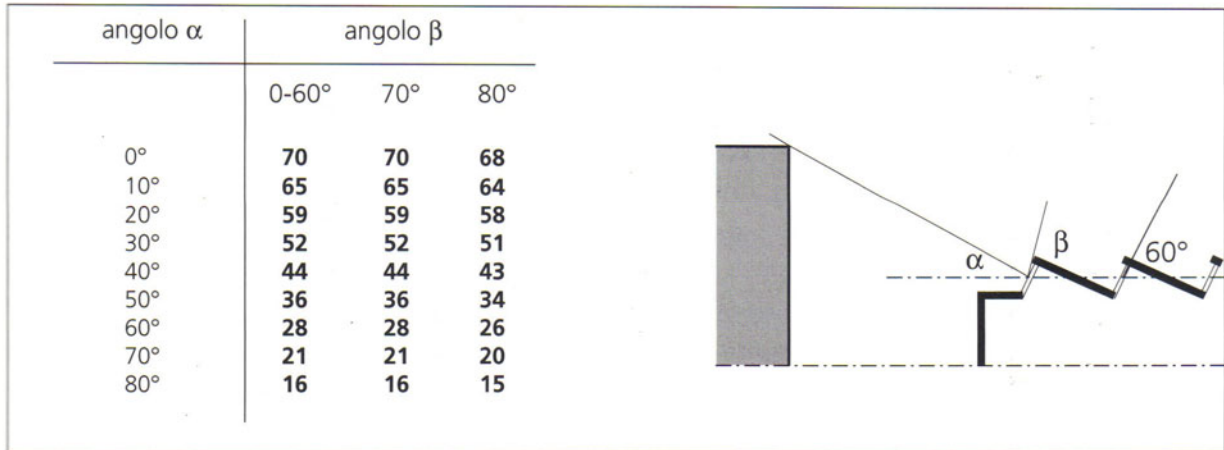
Congiungendo il punto così trovato con quello precedentemente individuato sulla scala C, si traccia una retta che interseca la scala E in corrispondenza del valore cercato della C.R.I.

Il terzo nomogramma serve per il calcolo di finestre orizzontali o inclinate. L'utilizzo di questo è simile ai primi due, ma deve essere affiancato da una serie di tabelle che riproducono i fattori correttivi, K, per l'inclinazione della vetrata e per l'angolo formato, rispetto all'orizzonte, dalle ostruzioni esterne.

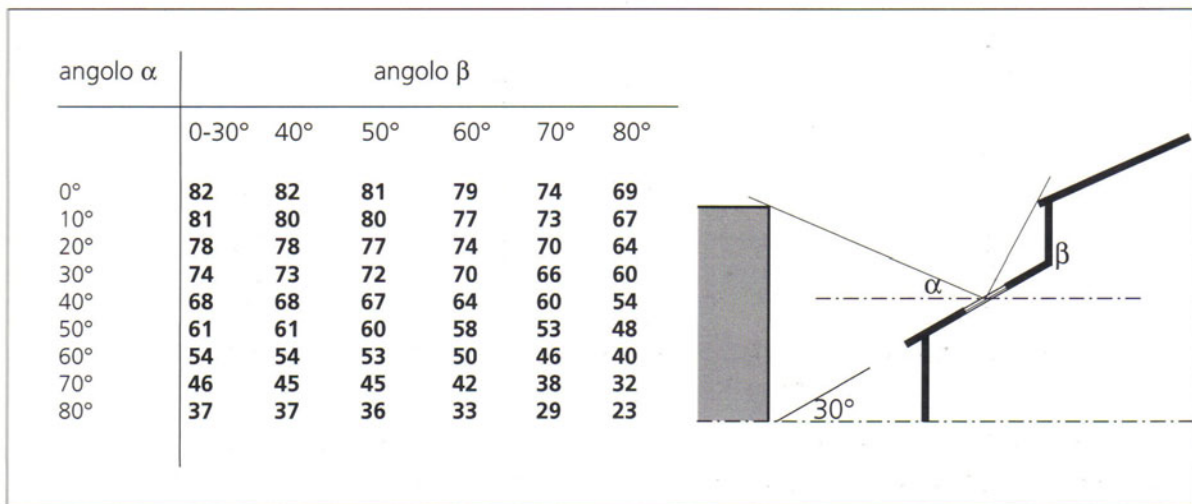


Variazione di k in funzione dell'angolo di ostruzione  $\alpha$  per il calcolo della componente riflessa internamente con lucernari verticali.

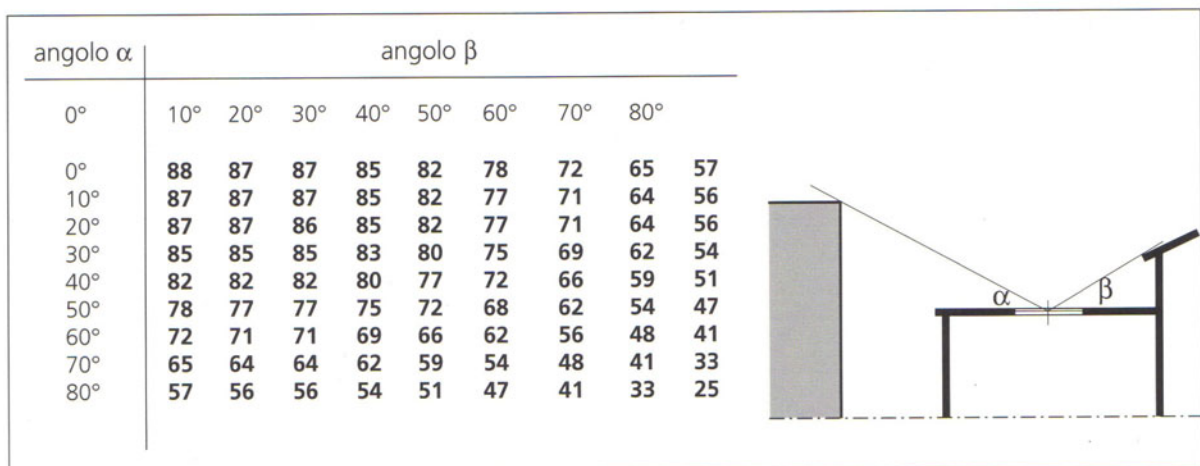




Variazione di  $k$  in funzione degli angoli di ostruzione  $\alpha$  e  $\beta$  per lucernari con vetri inclinati a 60° sull'orizzontale.



Variazione di  $k$  in funzione degli angoli di ostruzione  $\alpha$  e  $\beta$  per lucernari con vetri inclinati di 30° sull'orizzontale.



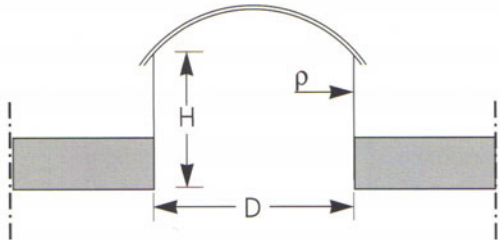
Variazione di  $k$  in funzione degli angoli di ostruzione  $\alpha$  e  $\beta$  per lucernari orizzontali.

Riportando, come negli altri nomogrammi, sulla scala A il rapporto tra la superficie vetrata e quella totale interna e su quella B il coefficiente medio di riflessione delle superfici interne, si trova su C il valore della componente riflessa internamente in assenza, di ostruzioni esterne.

Dovendo considerare anche la presenza di ostruzioni, si riporta il valore di K, precedentemente trovato con le tabelle, sulla scala D e si congiunge questo punto con quello in c, tracciando una retta che interseca la scala E in corrispondenza del valore cercato della componente.

Con i lucernari di tipo "a duomo", il calcolo di k è diverso e si effettua mediante la tabella di seguito riportata.

rapporto H/D	coeff. rifl. lum. ρ				
	0,7	0,5	0,3	0,1	0
0	84	84	84	84	84
0,25	62	60	57	54	52
0,5	48	44	40	37	35
0,75	38	31	28	25	23
1	32	25	21	18	15
1,25	27	20	16	13	11
1,5	24	17	13	10	8



Fattore correttivo da apportare al valore della componente riflessa internamente del fattore di luce diurna per lucernari a duomo.

Nota k, il valore della componente riflessa internamente può anche essere trovato, per interni illuminati da lucernari, con la formula fornita dalla BRE:

$$C.R.I. = \frac{(K * A_f * \bar{\delta}_m)}{S_{tot} * (1 - \bar{\delta}_m)} \quad (\%)$$

Dove:

A<sub>f</sub> = area finestrata

K = fattore correttivo

$\bar{\delta}_m$  = coefficiente medio ponderato di riflessione luminosa delle superfici interne (espresso in decimali)

S<sub>tot</sub> = superficie totale delle pareti di involucro dell'ambiente interno (comprese le finestre).

Per il calcolo del coefficiente medio di riflessione luminosa si devono conoscere i coefficienti di riflessione e l'estensione delle diverse superfici che delimitano l'ambiente.

$$\bar{\delta}_m = \frac{(S_1 \cdot \delta_1 + S_2 \cdot \delta_2 + S_3 \cdot \delta_3 + \dots + S_n \cdot \delta_n)}{(S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n)}$$

## Capitolo 3 I METODI DI CALCOLO COMPUTERIZZATO

### 3.1 Introduzione

Per un progettista, un problema particolarmente significativo è rappresentato, oltre che dall'idea progettuale in sé, anche alla comunicazione di tale idea, da sempre consolidata attraverso l'uso di una serie di immagini.

I modelli di calcolo computerizzato sono in grado di combinare le potenzialità dei rendering con il rigore dei calcoli analitici.

Con il computer è possibile simulare le condizioni di illuminazione naturale in relazione a geometrie anche molto complesse.

L'utilizzo di un programma di calcolo rende possibile due tipi di obiettivi:

- Produrre una visualizzazione realistica dell'oggetto della progettazione, in modo da poter osservare in anteprima il modo in cui l'ambiente in esame apparirà. L'approccio è dunque di tipo qualitativo;
- Produrre un modello che permetta la precisa determinazione delle grandezze fotometriche caratterizzanti la luce. L'approccio è di tipo quantitativo.

Nella quasi totalità dei casi i programmi nascono come strumento di progetto della luce artificiale.

Sono pochi i programmi dotati degli algoritmi necessari per tenere conto degli effetti e dell'influenza della dinamica della luce naturale.

Il numero di condizioni che possono essere simulate è peraltro ristretto e limitativo rispetto alle situazioni reali.

Pertanto, a fronte della velocità e capacità di calcolo, va comunque riscontrata una certa approssimazione che i diversi codici di simulazione numerica assumono in relazione all'interazione luce-ambiente da un lato, alla descrizione delle proprietà fotometriche dei materiali dall'altro.

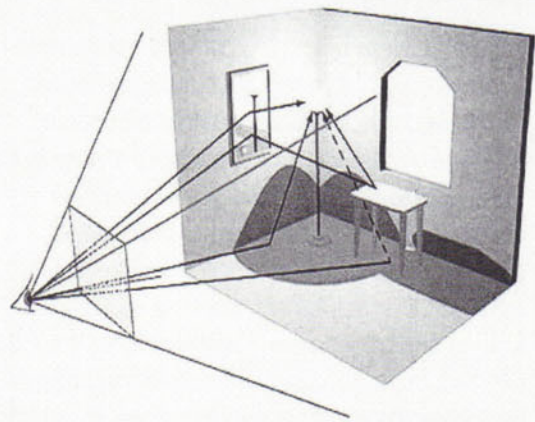
Per i materiali trasparenti viene richiesto di specificare alcuni parametri, come l'indice di rifrazione che non sono sempre reperibili. Per i materiali opachi, invece, la riflessione viene assunta come perfettamente diffondente, mentre essa è, per la quasi totalità dei materiali, semidiffondente.

## 3.2 Algoritmi di calcolo: ray-tracing e radiosity

### Ray-tracing

#### **Principio di funzionamento**

L'algoritmo è di tipo stocastico, basato su un processo "random" con il quale solo il percorso di alcuni fra gli infiniti raggi luminosi viene effettivamente simulato: ripetendo lo stesso calcolo, pertanto, il risultato finale varia leggermente. L'immagine definitiva viene ottenuta come media delle soluzioni corrispondenti ad un insieme di raggi. Per quanto questo possa sembrare sconcertante, rappresenta invece il modo in cui la luce "lavora" effettivamente nella realtà: i fotoni che la compongono, infatti, si propagano, direttamente o attraverso infinite riflessioni, in maniera del tutto casuale; è il loro numero elevatissimo a conferire alla radiazione luminosa il suo carattere di stabilità. Al fine di ridurre i tempi di elaborazione (occorrerebbero infinite reiterazioni delle quali calcolare la media per avere un risultato perfetto) l'algoritmo assume una importante semplificazione: i processi di inter-riflessione sulle superfici diffondenti vengono infatti approssimati con un contributo di luce ambientale costante in tutti i punti e senza nessuna correlazione con il fenomeno fisico. L'algoritmo lavora seguendo a ritroso il percorso dei raggi che dall'occhio dell'osservatore vanno a colpire le sorgenti luminose sia direttamente, sia indirettamente per riflessione sulle superfici opache dell'ambiente (ad esclusione dei raggi intercettati da oggetti). Il contributo di ciascun raggio che realizza (considerando anche riflessioni multiple) il congiungimento sorgente-occhio viene preso in considerazione per determinare il colore degli elementi e i livelli di illuminazione e luminanza presenti sulle superfici stesse.



schematizzazione della modalità di modellazione della radiazione luminosa nell'algoritmo ray-tracing

#### **Vantaggi**

- Precisa simulazione dell'illuminazione diretta in riferimento a sorgenti luminose puntiformi
- realistica riproduzione di riflessioni speculari, ostruzioni e conseguenti ombre portate da oggetti di varia natura presenti nell'ambiente, nonché dei fenomeni di rifrazione e trasparenza
- corrispondenza con le dinamiche reali di propagazione e distribuzione della luce (migliore di quella intrinseca a qualunque altro algoritmo, incluso il radiosity)

#### **Svantaggi**

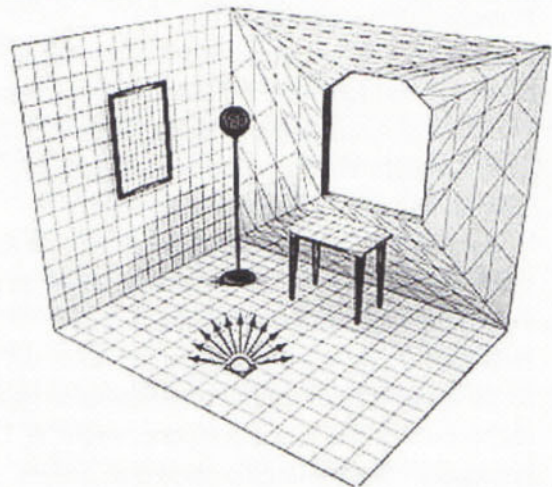
- calcolo complesso e "time-consuming", soprattutto in funzione del numero di sorgenti luminose presenti, anche per ambienti di relativa semplicità
- calcolo da ripetere per ciascuna direzione di osservazione (punto di vista)
- assenza di simulazione dell'illuminazione indiretta prodotta dalle superfici opache diffondenti, alla quale si devono i fenomeni di inter-riflessione; viene considerato un contributo costante in tutti i punti, un "valore ambiente"
- scarso grado di precisione in relazione alla simulazione di sorgenti superficiali, quali finestre, lucernari

## Radiosity

### **Principio di funzionamento**

Algoritmo sviluppato negli anni '60 per simulare lo scambio di energia radiativa fra superfici in funzione della posizione relativa e applicato alla propagazione della luce a partire dalla metà degli anni '80. Il calcolo si basa sull'assunzione di comportamento perfettamente diffondente (Lambertiano – la luminanza è costante da qualunque direzione si osservi la superficie) di tutte le superfici presenti nell'ambiente e fra cui avviene un mutuo trasferimento di radiazione luminosa. Tale approssimazione, se da un lato rende meno oneroso il processo di elaborazione dei dati (minor tempo e minore capacità richiesta al processore del computer), dall'altro esclude elementi lucidi e speculari, la cui emissione luminosa varia in maniera significativa nelle diverse direzioni dello spazio.

Al fine di avere un approccio più sofisticato e quindi un grado di precisione maggiore, con il radiosity le superfici effettive vengono suddivise in griglie di elementi superficiali (3D mesh) di ridotta estensione: il calcolo dell'energia luminosa scambiata viene effettuato fra una singola mesh e tutte le altre. Questa suddivisione è particolarmente dettagliata (e il numero di elementi cresce esponenzialmente) nelle aree caratterizzate da elevati gradienti di illuminazione. L'algoritmo attualmente implementato nei programmi di simulazione numerica illuminotecnica si basa su un processo di raffinamento progressivo per cui all'operatore viene visualizzata in tempi rapidissimi l'immagine risultante, in modo da poter effettuare una prima analisi qualitativa del risultato senza dover attendere che l'intero calcolo venga portato a compimento: tale immagine viene continuamente rielaborata e raffinata fino al rendering finale e alla quantificazione dei dati fotometrici.



schematizzazione della modalità di modellazione della radiazione luminosa nell'algoritmo radiosity

### **Vantaggi**

- precisa simulazione dell'illuminazione indiretta (fenomeni di inter-riflessione diffusa)
- soluzioni ottenute indipendenti dal punto di vista  
⇒ visuali diverse vengono rappresentate istantaneamente
- l'immagine visiva (rendering) viene visualizzata immediatamente (prima analisi qualitativa del risultato ottenuto) e progressivamente raffinata e migliorata in precisione (valori quantitativi di illuminamento e luminanza)
- precisa modellazione delle sorgenti luminose superficiali

### **Svantaggi**

- le 3d mesh in cui le superfici sono suddivise richiedono più memoria e più tempo per essere calcolate rispetto alle superfici stesse considerate come "unicum"
- assunzione di comportamento Lambertiano (riflessione perfettamente diffusa) per tutte le superfici modellate
- impossibilità di simulare fenomeni di riflessione speculare, di rifrazione e di trasparenza

### 3.3 Rafis

Un gruppo di ricercatori della Scuola di Architettura di Barcellona, Università Politecnica Catalana, ha elaborato un programma di calcolo per la valutazione dell'illuminamento naturale in ambienti con diverse configurazioni geometriche, particolarmente adatto ad essere utilizzato in ambito didattico.

Il programma di calcolo Rafis permette infatti il calcolo del fattore di luce diurna, su un piano di lavoro di riferimento posto a 80 cm di altezza dal piano del pavimento, di ambienti con qualsiasi forma geometrica, con la sola limitazione che l'ambiente sia appoggiato al terreno e che le pareti non formino angoli interni (quindi non sono permesse forme convesse, a C, ad L, ad U).

Il modello di cielo proposto dagli autori del programma non è un cielo standard ma si basa su una distribuzione di luminanza della volta celeste calcolata secondo la seguente relazione:

$$L_p = L_z * [ A+B \cos^2(\alpha/2)] * [(1+2 \sin\zeta) / 3]$$

Dove:

$L_p$  = luminanza nel punto, in kcd/m<sup>2</sup>

$L_z$  = luminanza allo zenit, in kcd/m<sup>2</sup>

A e B coefficienti che dipendono dalla torpidità atmosferica, assunti rispettivamente pari a : A=0.8 , B=0.4

$\alpha$  = angolo azimutale misurato a partire dal Sud geografico, in rad

$\zeta$  = angolo solare zenitale, in rad

I dati geometrici del locale e l'orientamento vengono inseriti graficamente, il programma richiede solo l'inserimento delle altezze delle diverse pareti, il loro coefficiente di riflessione (escluso il coefficiente di riflessione del pavimento che viene assunto pari al 20%), la posizione delle superfici vetrate, il coefficiente di trasmissione luminosa del vetro, il coefficiente di ostruzione della finestra.

I dati di output forniti sono il valore minimo, medio, massimo del fattore di luce diurna, calcolato sul piano di lavoro di riferimento e la sua rappresentazione grafica sempre sul piano di lavoro.

Le dimensioni del locale devono essere inferiori a 15 m nella direzione N-S e di 23,7 m nella direzione E-O.

Nel caso di ambienti di dimensioni maggiori occorre modificare la scala di rappresentazione, facendo attenzione che il piano di lavoro di riferimento rimane posizionato a 80 cm di altezza dal pavimento.

Il calcolo dell'illuminamento risultante all'interno dell'ambiente avviene attraverso il seguente procedimento:

- Viene eseguita una suddivisione geometrica della superficie totale delle superfici interne per un totale approssimativo di 40 elementi di area equivalente;
- Per ogni area individuata viene calcolato l'illuminamento diretto proveniente dalle superfici trasparenti dell'ambiente, tenendo presente che la luminanza della volta celeste è definita secondo la relazione sopra descritta;
- Ciascuna area viene quindi considerata come una sorgente che illumina le altre aree. Questa operazione viene ripetuta due volte per ripartire in modo più preciso il livello di illuminamento e di luminanza sulle superfici interne;
- Infine viene calcolato il valore di illuminamento sul piano di lavoro proveniente direttamente dalle superfici trasparenti ed interne dell'ambiente.



### 3.4 Superlite 2.0

Il Lawrence Berkeley laboratori dell'Università della California ha sviluppato un programma di calcolo denominato Superlite, in una prima versione nel 1985 e nell'ultima versione nel 1994.

Esso è basato sulla teoria dello scambio termico radiativi in cavità, e questo è comunemente denominato "Flux Transfer".

Il metodo consiste nel suddividere ciascuna superficie all'interni dell'ambiente in elementi più piccoli, ipotizzati a luminanza uniforme, scrivendo per ogni elemento l'equazione di bilancio del flusso luminoso e ottenendo un sistema di equazioni lineari indipendenti, i cui coefficienti sono rappresentati dai fattori di vista.

La versione del 1985 permetteva solo la valutazione dell'illuminazione naturale in ambienti illuminati da superfici trasparenti verticali ed orizzontali, mentre l'attuale versione permette anche la valutazione dell'illuminazione artificiale.

Il file di input da compilare può essere di tipo semplice, per ambienti di forma rettangolare con una sola superficie trasparente, verticale od orizzontale, un solo piano di lavoro ed in assenza di ostruzioni interne o di tipo complesso; o per ambienti di forma regolare o ad L con più superfici trasparenti, verticali ed orizzontali, su più pareti ed in presenza di ostruzioni interne.

I modelli di cielo impiegati sono: CIE Standard Clear Skt, CIE Standard Overcast Sky, cielo uniforme.

Nelle applicazioni svolte dagli autori, è stato verificato che in presenza di uno o più lucernari, il metodo semplice, confrontato con quello complesso, non fornisce valori accettabili, soprattutto in considerazione del fatto che esso individua una parete frontale ed una di fondo, condizione accettabile solo nel caso di una finestra, ma non nel caso di un lucernario.

I dati di input richiesti sono:

- Condizioni climatiche esterne
- Dimensioni del locale, espresse in unità di lunghezza
- Elevazione del locale dal terreno, espressa in unità di lunghezza, e orientamento

- Numero e posizione delle superfici trasparenti
- Numero di gruppi di sorgenti luminose artificiali, dimensioni, posizione e griglia del gruppo di sorgenti luminose artificiali
- Caratteristiche superfici trasparenti
- Caratteristiche di eventuali aggetti esterni verticali ed orizzontali
- Caratteristiche tenda
- Dati superfici interne
- Altezza del piano di lavoro, espressa in unità di lunghezza
- Caratteristiche ostruzione esterna

Come output vengono forniti i valori dell'illuminamento e del fattore di luce diurna sul piano di lavoro, oppure i valori di luminanza di tutte le superfici interne, l'illuminamento e il fattore di luce diurna sul piano di lavoro. Il programma non fornisce gli output in forma grafica.

### 3.5 Daylight

Il programma è stato ideato da Ian Frame e Sheila Birch del Construction System Development Group come strumento didattico per chi voglia approfondire la problematica dell'illuminazione naturale degli interni, senza dover far ricorso ai modelli teorici di simulazione, né all'utilizzo di modelli in scala.

Gli input del programma sono:

- Geometria dell'ambiente, con possibilità di considerare le finestre a giacitura verticale o orizzontale
- Coefficiente di trasmissione luminosa dei vetri e di riflessione luminosa delle superfici
- Altezza del piano di lavoro
- Caratteristiche geometriche delle ostruzioni esterne
- Orientamento dell'ambiente
- Fattore di correzione per la presenza di sporco sulla superficie dei vetri
- Fattore di correzione per i deterioramento della finitura delle superfici.

Il programma divide l'area in pianta della stanza in un numero predeterminato di elementi rettangolari, al centro dei quali ed all'altezza fissata del piano di lavoro, viene calcolato il fattore di luce diurna.

I file di output sono:

- Distribuzione dell'illuminamento naturale; la rappresentazione può essere in pianta, con linee di uguale illuminamento, o in sezione
- Fattore minimo, medio e massimo di luce diurna
- Fattore di uniformità dell'illuminamento
- Rapporto fra illuminamento minimo ed il massimo.

## Capitolo 4 ANALISI ATTRAVERSO L'USO DI MODELLI IN SCALA

### 4.1 Introduzione

I modelli in scala sono uno strumento idoneo per prevedere le condizioni di illuminazione naturale.

Infatti permettono al progettista di valutare direttamente e in tempi rapidi la validità delle soluzioni adottate.

L'elemento fondamentale risiede dunque nella costruzione di un modello che, a seconda dei dettagli che compongono l'oggetto da simulare comporta un certo grado di difficoltà.

Questo modo di procedere porta alla possibilità di avere un'accuratezza dei risultati e la possibilità di valutare soluzioni progettuali alternative, modificando semplicemente un componente.

Inoltre c'è la possibilità di effettuare valutazioni qualitative attraverso la visione diretta all'interno del modello o per mezzo di immagini fotografiche.

L'efficacia dei modelli in scala, rispetto ai metodi di calcolo manuale e ai metodi di calcolo computerizzato, risulta evidente nel caso di geometrie complesse, geometrie che i diversi programmi di simulazione numerica difficilmente riescono a riprodurre con sufficiente esattezza.

Questo metodo offre la possibilità di fare valutazioni soggettive, ovvero un'analisi della qualità di illuminazione naturale nel modo in cui lo spazio costruito appare e viene percepito dall'osservatore.

Inoltre il modello in scala può diventare uno strumento di verifica dei metodi di calcolo manuale e verifica della validità dei programmi di calcolo computerizzato.

Lo studio dell'illuminazione naturale con l'uso dei modelli in scala può essere fatto posizionando il modello sotto un cielo reale oppure sotto un cielo artificiale. Qui di seguito verranno illustrati i due tipi di approccio.

## 4.2 Uso del cielo naturale

Con l'utilizzo di condizioni di cielo reali si ha la possibilità di sperimentare e verificare gli spazi nelle effettive condizioni di luce naturale, con un approccio estremamente semplice, rapido ed economico.

A questi vantaggi si contrappone il limite dovuto alla variabilità della luce esterna anche in presenza di condizioni meteorologiche apparentemente identiche.

Risulta così preclusa la possibilità di effettuare in tempi successivi dei confronti tra soluzioni progettuali diverse.

La scelta di sperimentare il modello sotto condizioni reali di cielo può pertanto essere vantaggiosa in termini di immediata visualizzazione qualitativa dell'ambiente luminoso, piuttosto che non di misura quantitativa dello stesso.

Questo vale soprattutto nelle prime fasi di progetto, quando è utile determinare velocemente indicazioni sul modo in cui possono apparire gli ambienti interni (valutazione dell'impatto visivo).

E' comunque opportuno esporre il modello a diverse condizioni meteorologiche (cielo sereno, cielo coperto, cielo intermedio).

Con un cielo coperto, la distribuzione di luminanza è tale per cui si hanno i valori minimi in prossimità dell'orizzonte e valori crescenti verso il punto di zenit (questa infatti è la condizione standard definita dalla CIE).

Il valore di luminanza zenitale varia, in termini assoluti, durante il corso della giornata, in funzione dell'angolo di altezza solare.

Il gradiente di luminanza che si riscontra fra zenit e orizzonte rimane costante e così anche il valore del fattore di luce diurna all'interno degli ambienti.

Di conseguenza, sperimentare il modello sotto cieli completamente coperti garantisce un buon livello di reperibilità delle condizioni anche in giornate diverse per poter confrontare soluzioni progettuali diverse.

In presenza di cieli sereni o parzialmente coperti, invece, non si verifica la costanza nel tempo della distribuzione della luminanza e, di conseguenza, del fattore di luce diurna.

In questi casi, dunque, il campo di applicazione risulta ristretto a valutazioni di carattere qualitativo, legate alla verifica dell'eventuale visione diretta del disco solare da parte degli utenti ed alla dinamica del tempo delle ombre e della penetrazione della luce naturale all'interno dell'ambiente.

### **4.3 Uso di cieli artificiali**

L'idea di costruire dei laboratori all'interno dei quali riprodurre la luce del sole al fine di studiarne caratteristiche e prestazioni all'interno di un modello risale all'inizio del XX secolo.

I primi cieli artificiali sono stati concepiti in Inghilterra ed in Russia a partire dal 1910.

Dal secondo dopoguerra in avanti, essi si sono diffusi ed evoluti come tecnica e tipologie, soprattutto in ambito anglosassone.

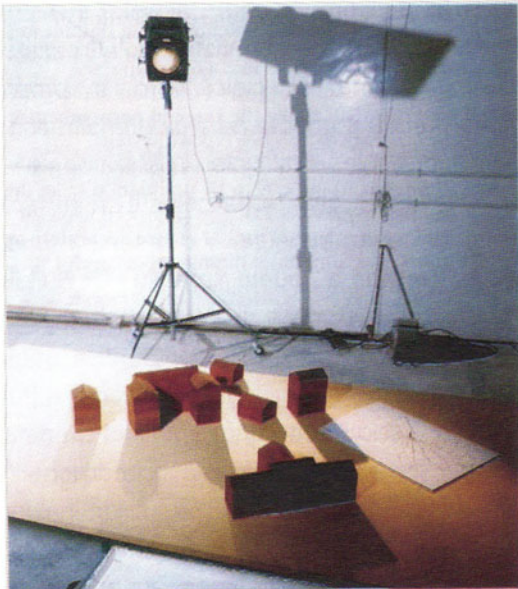
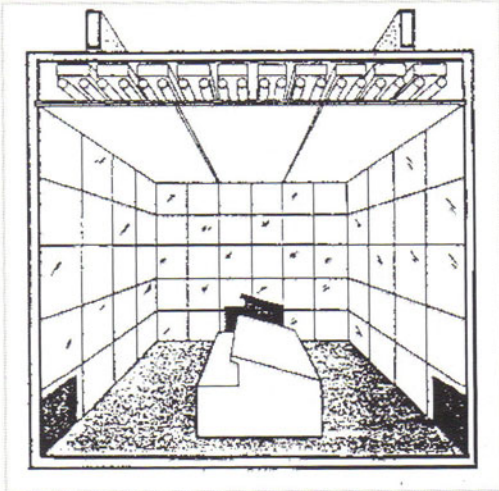
Un numero sempre maggiore di centri di ricerca e di università si è dotato di laboratori di questo tipo, destinati a fruitori costituiti non soltanto da ricercatori e progettisti, ma anche da studenti universitari.

Tutto questo perché i cieli artificiali sono parte integrante delle strutture presso le facoltà di Ingegneria e Architettura.

In Italia, questa pratica è stata seguita con interesse soltanto nel corso degli ultimi anni, durante i quali è stata portata a termine la realizzazione di due laboratori, uno a Venezia, dotato di un simulatore di cielo coperto e di un simulatore di sole, e uno a Torino, dotato di un simulatore di cielo a luminanza variabile e di un simulatore di sole.

In relazione alla classificazione dei cieli artificiali, emergono tre tipologie: cieli "a specchi", "a volta" e "a porzione di volta".

### 4.3.1 Cieli artificiali a specchi



I primi a diffondersi a partire dalla seconda metà degli anni '60, sono concepiti con l'obiettivo principale di compiere delle misure quantitative del fattore di luce diurna.

Dal momento che il calcolo di tale grandezza prescinde dal contributo della radiazione solare diretta, riferendosi alla quota di luce naturale proveniente dalla sola volta celeste, le strutture realizzate sono state progettate al fine di riprodurre la condizione di cielo coperto, essendo questa la distribuzione di luminanza che più si avvicina a quella per il calcolo del FLD.

I cieli a specchio consistono in ambienti parallelepipedi in cui le pareti verticali sono rivestite di specchi, mentre il soffitto è costituito da una superficie opalina diffondente. Di conseguenza si viene a determinare una successione infinita di riflessioni di tali superfici.

La volta celeste è riprodotta mediante una serie di sorgenti artificiali collocate esternamente rispetto al soffitto.

Generalmente vengono utilizzate delle sorgenti fluorescenti lineari, disposte secondo un interasse ravvicinato, regolabili in intensità luminosa, individualmente o in gruppi.

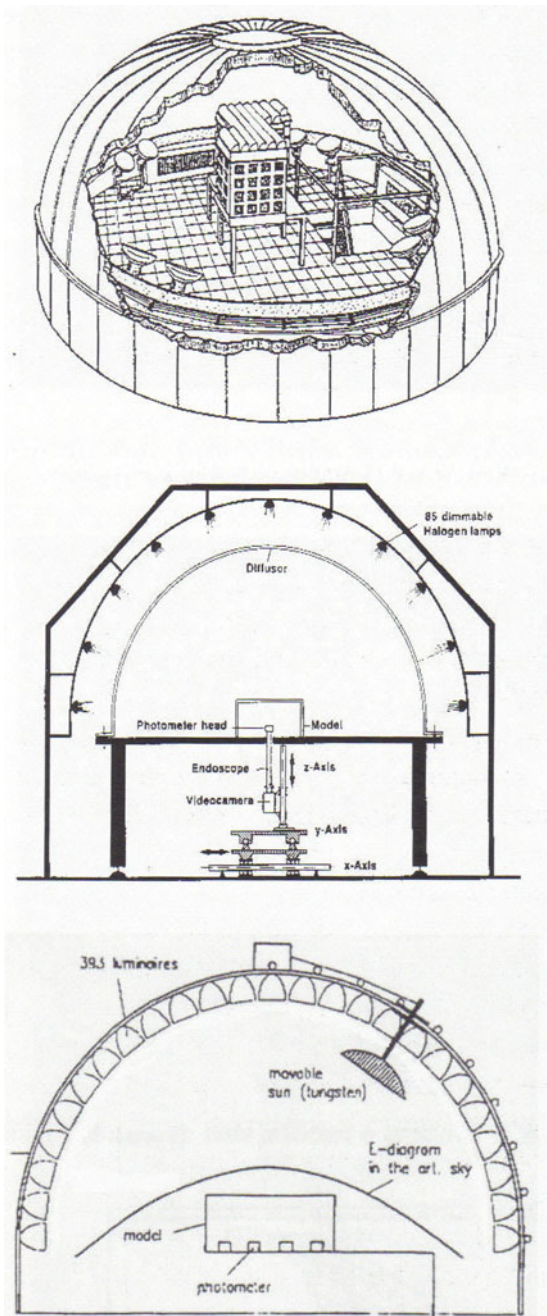
La distribuzione di luminanza che ne deriva, per effetto dell'interazione sorgenti – soffitto opalino e dei fenomeni di interriflessione che si determinano

sulle superfici speculari che rivestono le pareti, è tale da simulare in maniera fedele la condizione di cielo coperto standardizzato dalla CIE.

Intrinseca alla definizione dei cieli a specchi è la mancanza di una sorgente artificiale puntiforme di illuminazione diretta, destinata a simulare la luce proveniente dal sole.

In alcune strutture, tuttavia, è prevista un'attrezzatura ausiliaria, esterna al cielo vero e proprio, costituita da una sorgente ad alta intensità avente la funzione di sole artificiale. Chiaramente le valutazioni legate alla "volta celeste" e al "sole" avvengono separatamente.

#### 4.3.2 Cieli artificiali a volta



Si diffondono a partire dalla seconda metà degli anni '70, con la necessità di valutare l'ambiente luminoso naturale nei suoi aspetti quantitativi (valutazione del fattore di luce diurna) e qualitativi (studio delle ombre, distribuzione delle luminanze, condizioni di abbagliamento), in relazione ad una gamma più vasta di condizioni di cielo.

Nei cieli a volta, la volta celeste è modellata attraverso superfici emisferiche illuminate per mezzo di sorgenti artificiali.

Esse sono caratterizzate da un'intensità regolabile e dalla possibilità di essere regolate individualmente o in gruppi, al fine di dare origine a differenti distribuzioni di luminanza. Al centro della semisfera viene collocato il modello. Da un'analisi dei diversi cieli esistenti non emerge un criterio unico in relazione al posizionamento delle



sorgenti luminose, ma si individuano tre categorie principali.

Nel primo caso le sorgenti di luce artificiale sono collocate sul piano orizzontale di base della volta, vale a dire ad un'altezza inferiore rispetto al piano su cui vengono appoggiati i modelli in scala.

L'illuminazione è di tipo indiretto, in quanto la luce naturale raggiunge il modello dopo essere stata riflessa dalla volta, costituita da una superficie opaca riflettente in maniera diffusa.

Nel secondo caso si prevede di sistemare le sorgenti luminose esternamente alla superficie della volta, che è realizzata in materiale trasparente opalino, tale da assicurare una trasmissione di tipo diffuso.

Nel terzo caso, le sorgenti artificiali possono essere collocate direttamente sulla superficie emisferica della volta, per cui la condizione di illuminazione che ne deriva è di tipo diretto.

Per fare in modo che la luce che raggiunge il piano del modello presenti caratteristiche simili, come intensità e distribuzione, alla luce naturale riflessa dalla volta celeste, le sorgenti devono essere previste in numero piuttosto elevato ed avere un'emissione luminosa a fascio largo.

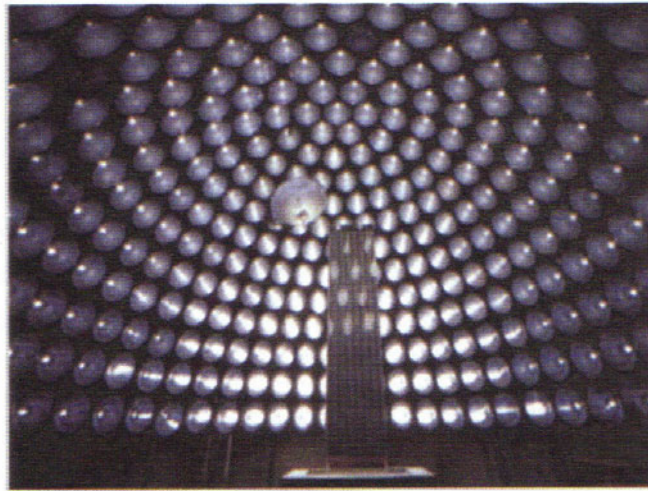
A differenza dei cieli a specchi, nei cieli a volta è possibile installare un sole artificiale, realizzato per mezzo di una sorgente ad alta intensità integrata da un'ottica tale per cui il fascio luminoso risultante riproduca il parallelismo con cui i raggi solari incidono sulla superficie terrestre.

Tale sorgente è libera di scorrere lungo un binario realizzato sulla superficie interna della volta; in virtù di tale scorrimento viene riprodotta la variazione dell'altezza solare fra  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , mentre il piano di supporto del modello, ruotando di  $360^\circ$  intorno all'asse verticale, fornisce la desiderata variazione dell'angolo azimutale.

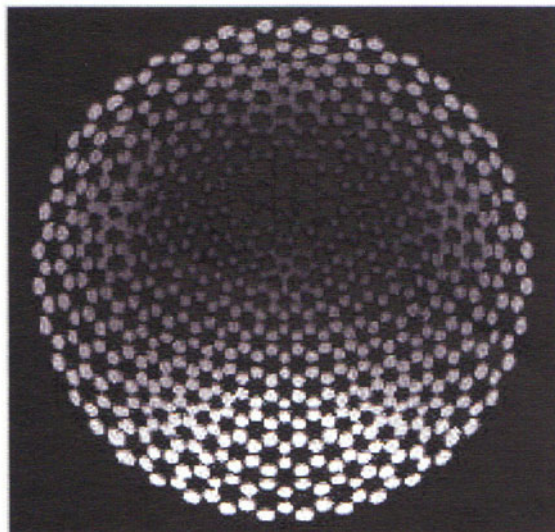
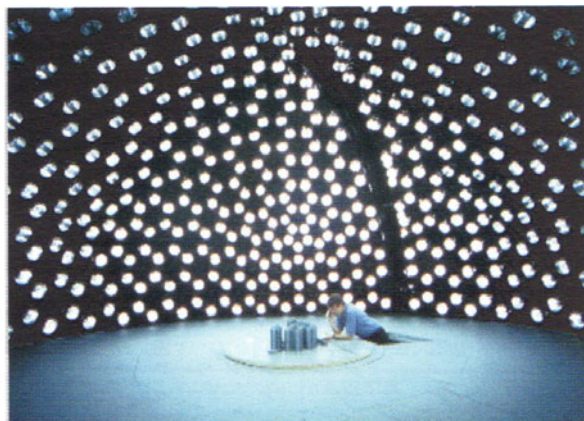
In questo modo è pertanto possibile ricreare le condizioni di illuminazione naturale che si verificano ad una qualsiasi latitudine, per un qualunque periodo dell'anno e per una qualunque ora del giorno.

Dalle dimensioni maggiori dei cieli a volta rispetto ai cieli a specchi deriva la necessità di installare un numero di sorgenti artificiali più elevato per simulare

efficacemente la volta celeste. A queste si aggiunge la presenza di un'ulteriore sorgente ad alta intensità destinata alla modellazione del sole.



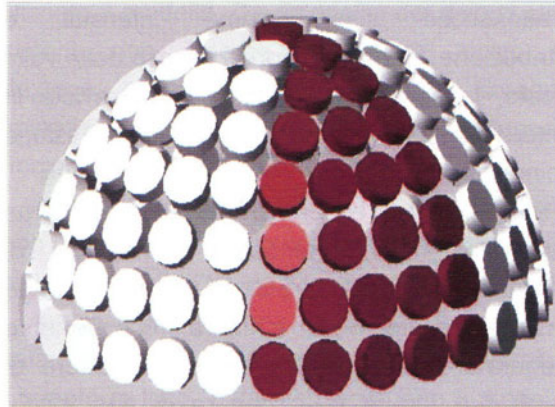
Cielo artificiale a volta con sorgenti luminose della volta. Si nota anche il sole artificiale.



Cielo artificiale a volta con sorgenti luminose sulla volta e riproduzione di un cielo sereno CIE.

### 4.3.3 Cieli artificiali a porzione di volta

In questa tipologia la riproduzione della volta celeste si basa su un modello proposto da Tregenda, secondo cui la superficie della volta non viene più pensata come una superficie continua, ma discretizzata per mezzo di figure geometriche ed in particolare mediante 145 aree circolari considerate a luminanza uniforme.



Modello di Tregenda per la discretizzazione della volta celeste

Sfruttando questo principio, i cieli a porzione di volta simulano le aree a luminanza uniforme.

Si utilizzano dischi luminosi dotati di sorgenti artificiali modulabili in intensità e controllabili individualmente, in modo da poter variare la distribuzione di luminanza che essi determinano in funzione di differenti condizioni standardizzate.

Inoltre, non viene riprodotta l'intera volta celeste, ma solo uno spicchio che corrisponde ad un sesto della superficie complessiva e approssimabile per mezzo di 25 dischi, di cui quello posto allo zenit è comune a ciascuna porzione di volta.



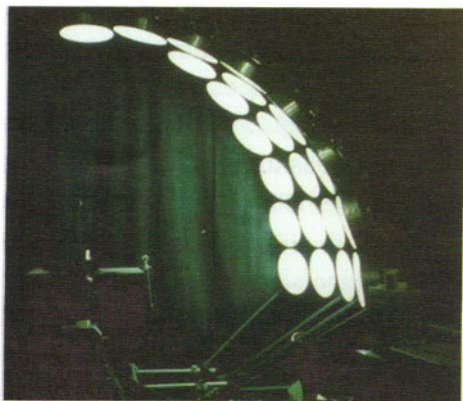
Schema di cielo artificiale a porzione di volta con il simulatore di cielo e di sole.

Avendo a disposizione solo un sesto di volta, i valori reali di illuminamento e di luminanza si ottengono sommando i valori parziali rilevati per sei rotazioni successive di  $60^\circ$  del modello in scala.

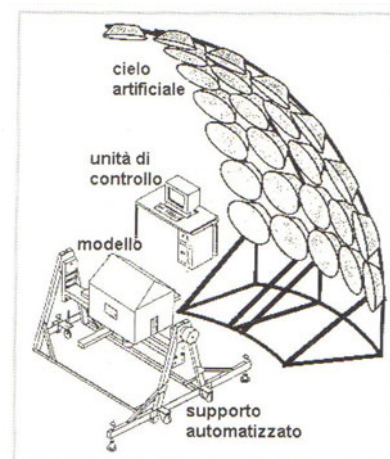
Va opportunamente variata, per ciascuna delle sei posizioni, l'intensità luminosa delle sorgenti artificiali, in modo da determinare, spicchio per spicchio, la corretta distribuzione di luminanza dell'intera volta celeste.

Anche in questa tipologia è possibile prevedere l'installazione di un sole artificiale, costituito da una sorgente di luce artificiale ad alta intensità.

Essa può essere lasciata libera di scorrere lungo un binario, oppure può essere tenuta fissa, in questo caso il movimento apparente del sole viene determinato attraverso la rotazione del supporto del modello intorno a due assi, uno verticale e uno orizzontale, in modo da riprodurre sia la variazione dell'altezza solare, sia lo spostamento azimutale.



Cielo artificiale a porzione di volta.



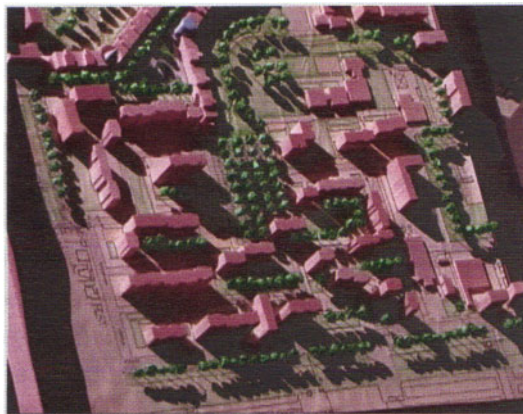
#### 4.4 Scelta del modello e della scala di rappresentazione

Nello studio della luce naturale i modelli possono variare da rappresentazioni volumetriche a scala urbanistica, fino ad arrivare a prototipi in scala 1:1 per lo studio di componenti quali finestre e sistemi di controllo solare o di spazi modulari di edifici.

Nello studio di un edificio può essere necessaria la realizzazione di modelli a scale diverse, per avere una corretta valutazione della distribuzione della luce naturale al suo interno.

Generalmente si possono individuare tre tipi di modelli utili:

- Modelli planivolumetrici su scala urbana (scala 1:2000 ; 1:1000), utili nel campo della progettazione urbanistica su larga scala.



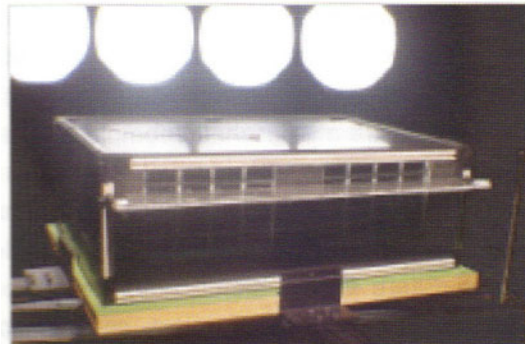
Modello planivolumetrico per lo studio della dinamica delle ombre su scala urbana

- Modelli volumetrici (scale 1:500 , 1:100) di un edificio e del suo immediato contorno, per lo studio dell'influenza sugli interni da parte dell'ambiente esterno.



Modello volumetrico in scala 1:100 per lo studio della dinamica delle ombre in ambiente interno

- Modelli per lo studio della distribuzione interna della luce naturale, rilievi dei livelli di illuminamento, studio del comfort visivo interno (scala 1:100, 1:10).



Modello in scala 1:10 per analisi qualitative e quantitative.

Quattro analisi possono essere di particolare interesse:

1. seguire la variazione dinamica delle ombre, ad esempio durante le ore diurne, dall'alba al tramonto, in modo da verificare quando insorgano condizioni sfavorevoli.
  2. mantenere costante una determinata ora del giorno e osservare come l'ambiente luminoso vari nei diversi periodi dell'anno.
  3. confrontare differenti configurazioni di progetto: modificando un parametro progettuale alla volta (numero o forma finestre o sistema di controllo della luce naturale), si possono apprezzare i miglioramenti sul livello e distribuzione di luce naturale dato dai diversi sistemi di controllo;
  4. confrontare, per una data configurazione, gli effetti visivi in ambiente in presenza di differenti condizioni di cielo.
- Modelli per lo studio di singole componenti dell'edificio (scala 1:10 , 1:1).

## 4.5 Scelta dei materiali e tecniche costruttive

Un modello per lo studio della distribuzione interna della luce naturale deve riprodurre fedelmente sia la geometria dell'edificio e del contesto, sia le caratteristiche fotometriche dei materiali.

I materiali impiegati nel modello di simulazione devono cioè comportarsi, nei confronti della luce, allo stesso modo dei materiali reali, presentando lo stesso valore del fattore di riflessione luminosa, lo stesso colore e la stessa finitura superficiale.

Solo nel caso di modelli volumetrici per lo studio degli ombreggiamenti, la cura dei materiali può risultare trascurabile, in quanto l'unico dato importante è la chiara lettura delle ombre dei volumi degli edifici rappresentati.

In questo caso la massima precisione deve essere garantita nella riproduzione degli ingombri e di profili planivolumetrici degli edifici in scala.

Così come agli elementi opachi, anche alle parti trasparenti deve essere riservata attenzione.

Se da un lato, in linea teorica, si potrebbe pensare di non inserire l'elemento trasparente nel modello, lasciando vuoti gli spazi delle aperture, occorre precisare che in realtà questo approccio comporta delle valutazioni errate. Infatti, l'elemento trasparente presenta una trasparenza variabile in funzione dell'angolo con cui la luce incide su di esso.

Un comportamento di questo tipo può essere simulato, in maniera fedele, soltanto inserendo la lastra trasparente nel modello in scala.

Inoltre, la mancanza degli elementi trasparenti porta ad una percezione visiva dell'ambiente interno in qualche modo distorta, soprattutto se le lastre da simulare fossero colorate.

La cura dei dettagli è importante sia perché influenzano l'esattezza dei risultati, sia perché conferiscono realismo all'ambiente interno, aiutando il progettista nella percezione tridimensionale dello spazio e delle proporzioni dell'edificio oggetto di studio.



Lo studio dell'illuminazione naturale di un edificio con modelli può portare a diversi risultati sperimentali:

- Conoscenza dell'influenza del contesto urbano con modelli di tipo volumetrico.
- Verifica e mappatura della radiazione solare diretta all'interno dell'edificio, conoscenza della distribuzione luminosa all'interno dell'edificio e di livelli di illuminamento interni.
- Individuazione delle zone critiche di comfort visivo, dovute ad eccessivo contrasto visivo o abbagliamento.

In tutti i casi vengono raccolti dati di valutazione, sia attraverso l'osservazione diretta, sia attraverso la raccolta di immagini fotografiche del modello.

#### **4.6 Rilievi fotometrici**

All'interno di un modello in scala è possibile condurre delle campagne di misure sperimentali.

La grandezza fotometrica che viene rilevata è l'illuminamento, ma possono essere fatte anche mappature di luminanza.

Per l'illuminamento, occorre essere dotati di sonde miniaturizzate, specifiche per modelli, caratterizzate da una superficie sensibile di dimensioni ridotte, in modo da minimizzare l'errore di scala.

Questo errore si commetterebbe impiegando le comuni sonde luxmetriche da interni o esterni. Tali strumenti devono avere le caratteristiche richieste in funzione del tipo di analisi.

Per i rilievi di illuminamento sono necessari due luxmetri: uno da porre all'interno del modello e uno da porre all'esterno, in modo da avere due letture simultanee di illuminamento interno ed esterno e poterne fare il rapporto. Si ottiene così il fattore di luce diurna.

La sonda esterna deve essere collocata in posizione orizzontale, allineata alla linea di orizzonte e in maniera tale da ricevere luce da tutta la volta.

In campagne di misure in cielo reale, è pertanto importante da un lato individuare un sito il più possibile privo di ostruzioni, dall'altro schermare la radiazione solare diretta: sulla superficie sensibile dello strumento deve infatti arrivare soltanto la componente diffusa dalla volta celeste.

Operando in laboratorio, occorre invece prestare attenzione al fatto che il modello non ostruisca alcune delle sorgenti luminose, né rifletta della luce "parassita" sul luxmetro esterno.

Non è necessario schermare la radiazione solare diretta, in quanto sole e cielo artificiale lavorano separatamente.

In realtà, per le misure all'interno del modello, è consigliabile non limitarsi ad un'unica sonda: posizionare più luxmetri permette di avere una mappatura della distribuzione spaziale della luce e calcolare quindi un valore del fattore di luce diurna più attendibile.

La posizione delle sonde all'interno deve essere attentamente studiata ed è importante che le superfici sensibili siano allineate con il piano di lavoro.

Per i rilievi di luminanza vanno aperti dei fori di ispezione sul perimetro del modello, sui quali poter inserire la sonda del luminanzometro.

Essa deve avere un'apertura molto stretta per avere misure puntuali su aree piccole.

La misura in sequenza dei valori di luminanza sulle diverse superfici del modello fornisce delle utili informazioni per il controllo dei fenomeni di abbagliamento e per il comfort visivo dell'osservatore.

## 4.7 Rilievi fotografici

L'osservazione diretta è la tecnica di studio più semplice e veloce.

Nei modelli volumetrici permette di identificare tutte le ombre proprie e portate, individuando con gran immediatezza le superfici esterne e le ostruzioni urbane che interferiscono con l'illuminazione interna dell'edificio oggetto di studio.

Nei modelli per lo studio dell'illuminazione naturale interna permette invece, in fase di progetto, di verificare qualitativamente lo spazio interno, aiutando il progettista a ricercare l'effetto illuminotecnico desiderato.

Anche l'analisi della radiazione solare diretta all'interno di uno spazio può facilmente essere affrontata mediante l'osservazione diretta, annotando, per ogni situazione oraria e stagionale, i dati sulle penetrazioni interne.

L'osservazione diretta è molto importante anche durante la costruzione del modello, per controllare che non ci siano infiltrazioni indesiderate di luce e per verificare che i materiali utilizzati per le pareti siano perfettamente opachi.

Per l'analisi diretta o per le riprese fotografiche è molto importante che i punti di osservazione, costituiti da fori sulle pareti del modello, siano posti ad un'altezza che riproduca in scala l'altezza visiva dell'osservatore.

Sia nell'osservazione diretta della distribuzione luminosa all'interno del modello, sia per le riprese fotografiche, è consigliabile che l'osservatore sia coperto da un telo nero, in modo da evitare, attraverso il foro d'ispezione, ulteriori ingressi di luce.

La ripresa fotografica all'interno di modelli in scala offre la possibilità di poter raccogliere dati in sequenza sulla qualità della luce.

Non è semplice ottenere delle buone immagini fotografiche, che riproducano la stessa sensazione visiva che si ha con l'osservazione diretta.

Bisogna tenere conto di due problemi:

1. un problema di scala: il modello deve essere sufficientemente grande da poter inserire l'obiettivo della macchina fotografica. La scala scelta per la costruzione del modello di simulazione deve tenere conto delle distanze di messa a fuoco minime della propria apparecchiatura fotografica.

2. un problema di resa dei colori e della temperatura di colore: il problema va posto quando si opera in cieli reali o artificiali. Con modello in cielo reale non si richiedono correzioni; con i cieli artificiali occorre adattare le caratteristiche delle comuni pellicole per la luce diurna alla temperatura di colore della sorgente luminosa utilizzata, poichè questa falsa la percezione dei colori.

## Capitolo 5 CONFRONTO TRA I METODI E CONCLUSIONI

### 5.1 Modelli di ambiente

Vengono illustrati due modelli di ambiente, presi in esame per l'applicazione dei metodi di calcolo, al fine di operare un confronto di quest'ultimi.

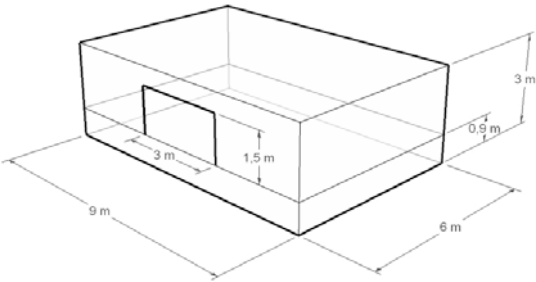
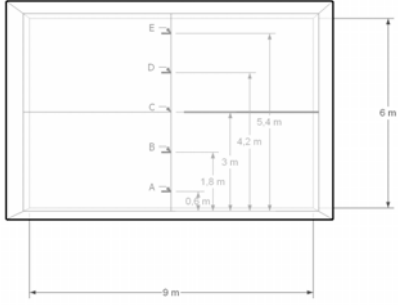
I due ambienti si differenziano per la posizione della superficie trasparente, nel primo caso posta su una parete verticale (ambiente A), nel secondo caso posta sul soffitto (ambiente B).

L'illuminamento naturale dei due ambienti è calcolato sul piano di lavoro posto ad un'altezza di 0.9 m dal pavimento.

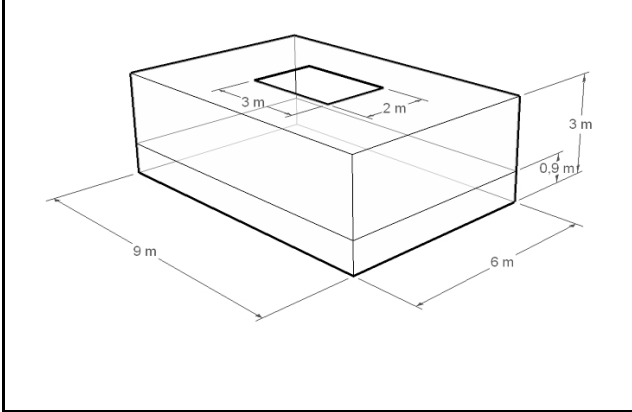
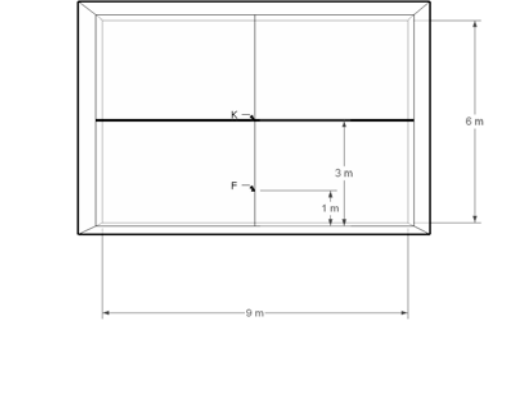
Per l'ambiente A nei punti A,B,C,D,E posti sull'asse di simmetria del locale perpendicolare alla finestra, il punto A è a 0.6 m, il punto B a 1.8 m, il punto C a 3 m. il punto D a 4.2 m e il punto E a 5.2 m.

Per l'ambiente B nei punti K e F, K è al centro dell'ambiente e F è sull'asse di simmetria del locale, perpendicolare al lato maggiore ed a 1 m dalla parete.

## AMBIENTE A

Ambiente A con finestra verticale	
	
<p><b>Dati generali</b></p> <p>Dimensione dell'ambiente            Lunghezza 9 m            Larghezza 6 m            Altezza 3 m            Altezza piano di lavoro 0.9 m</p>	<p><b>Caratteristiche finestra</b></p> <p>Lunghezza 3 m            Altezza 1.5 m            Coefficiente di trasmissione luminosa del vetro: 89.8%</p>
<p><b>Dati geografici</b></p> <p>Latitudine 45.5° N            Longitudine 9.2° E            Altezza s.l.m. 115 m            Ora, giorno e mese: 21 Giugno ore 12            Altezza solare 62.02°            Esposizione finestra lato sud            Modello di cielo coperto</p>	<p><b>Coefficienti di riflessione</b></p> <p>Pareti 50%            Soffitto 70%            Pavimento 30%            Terreno 3%</p>

## AMBIENTE B

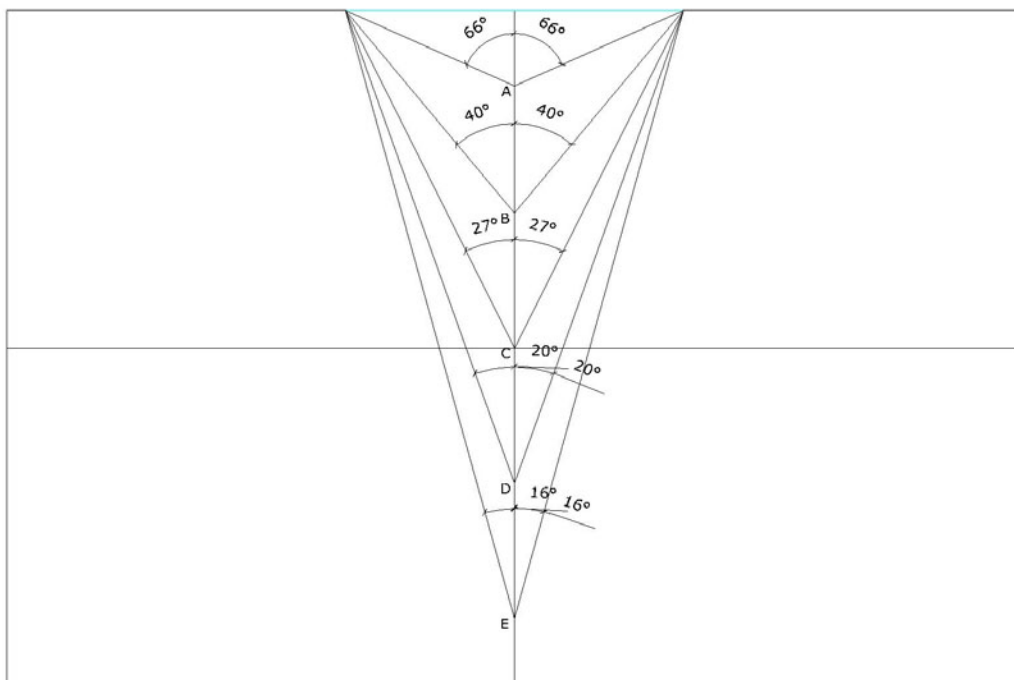
Ambiente B con finestra orizzontale	
	
<b>Dati generali</b>  Dimensione dell'ambiente Lunghezza 9 m Larghezza 6 m Altezza 3 m Altezza piano di lavoro 0.9 m	<b>Caratteristiche finestra</b>  Lunghezza 3 m Larghezza 2 m Coefficiente di trasmissione luminosa del vetro: 89.8%
<b>Dati geografici</b>  Latitudine 45.5° N Longitudine 9.2° E Altezza s.l.m. 115 m Ora, giorno e mese: 21 Giugno ore 12 Altezza solare 62.02° Modello di cielo coperto	<b>Coefficienti di riflessione</b>  Pareti 50% Soffitto 70% Pavimento 30% Terreno 3%

## 5.2 Calcoli manuali

### Calcolo componente cielo con il diagramma di Waldram

AMBIENTE A

Per ognuno dei 5 punti, valutare in pianta gli angoli azimutali sottesi tra la perpendicolare al piano della finestra, passante per il punto, e gli spigoli della finestra.

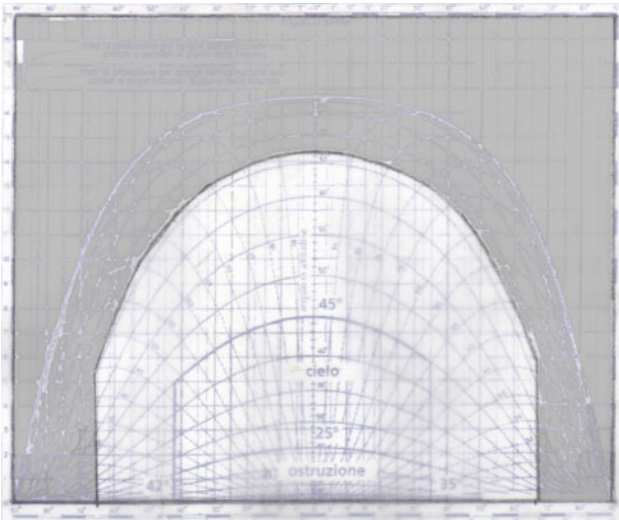


Pianta

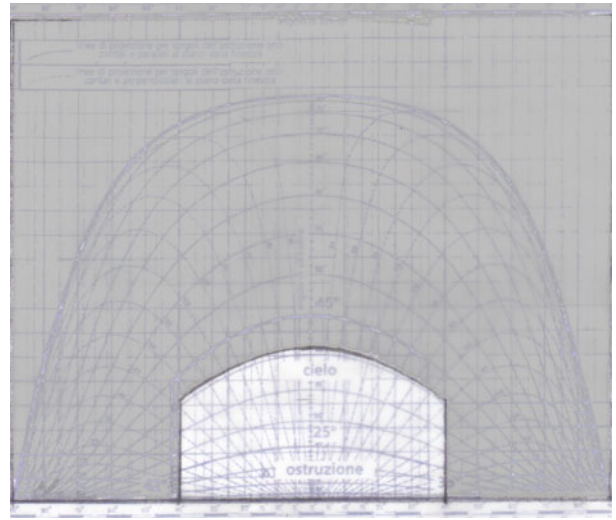
Individuare i valori sulla scala delle ascisse dell'angolo destro e sinistro.

Individuare la curva centrale data dal rapporto  $H/D$ , in cui  $H$  è l'altezza della finestra e  $D$  è la distanza dal punto alla finestra.

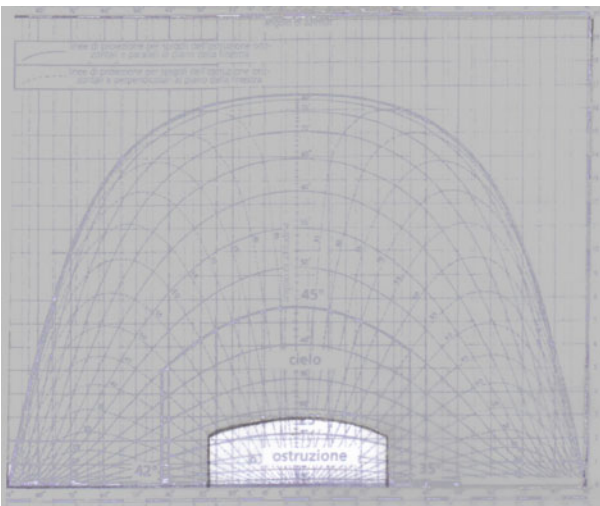




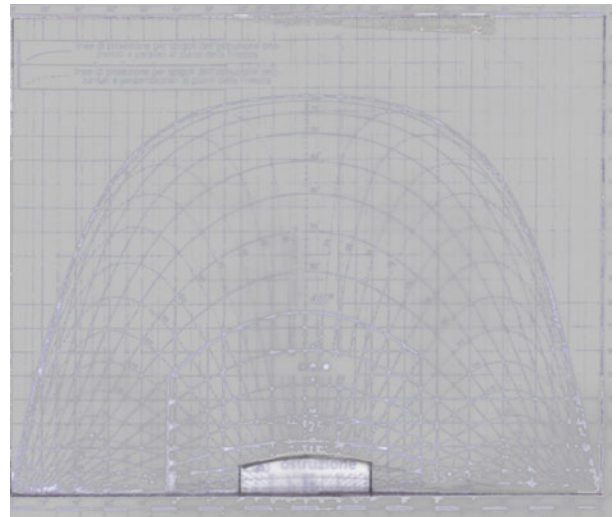
Punto A



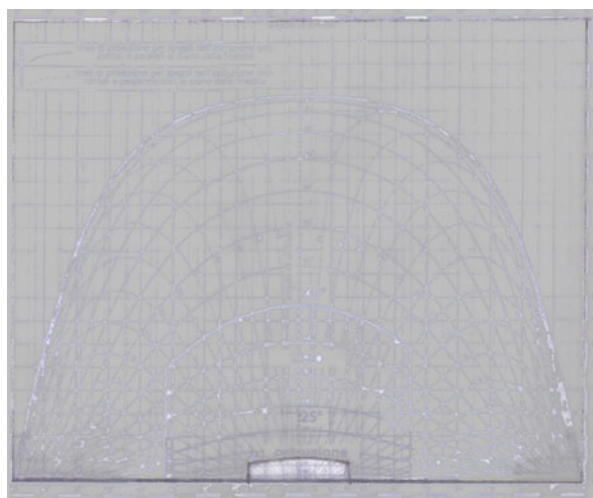
Punto B



Punto C



Punto D



Punto E

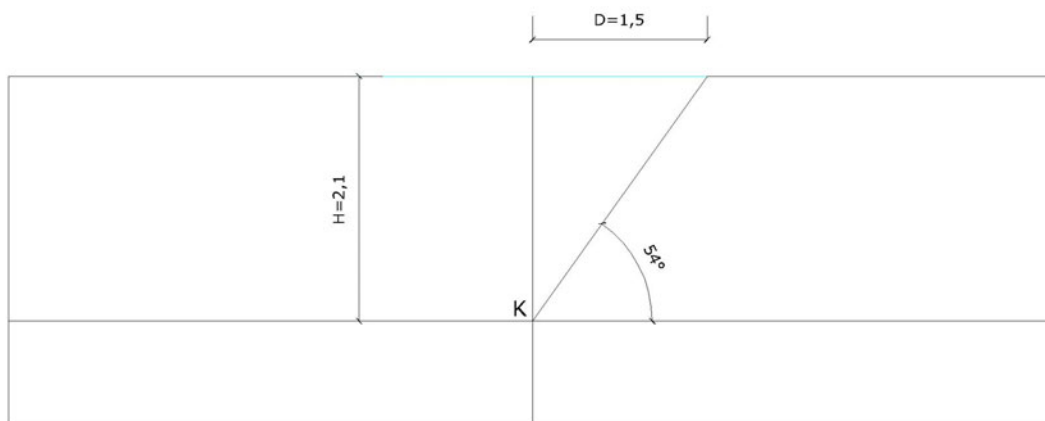
Il valore della componente cielo si ricava facendo il rapporto tra l'area della proiezione della volta celeste vista dalla finestra nel punto indicato e due volte l'area dell'intero diagramma.

PUNTO	ANGOLI	H/D	C.C. %
A	66°=66°	2,5	29,8%
B	40°=40°	0,83	6,9%
C	27°=27°	0,5	1,7%
D	20°=20°	0,36	0,97%
E	16°=16°	0,3	0,43%

## AMBIENTE B

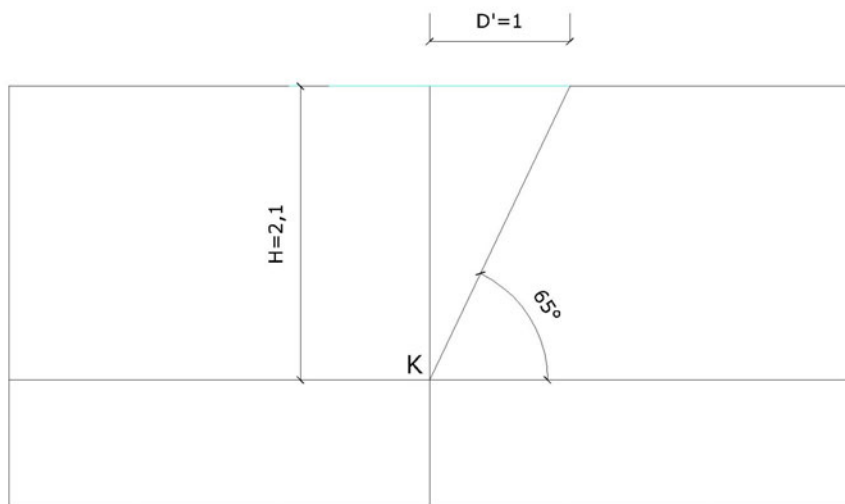
### Punto K

Valutare angoli e rapporto H/D, dove H è la distanza tra il piano orizzontale passante per il punto e il piano della finestra, e D è la metà del lato maggiore della finestra.

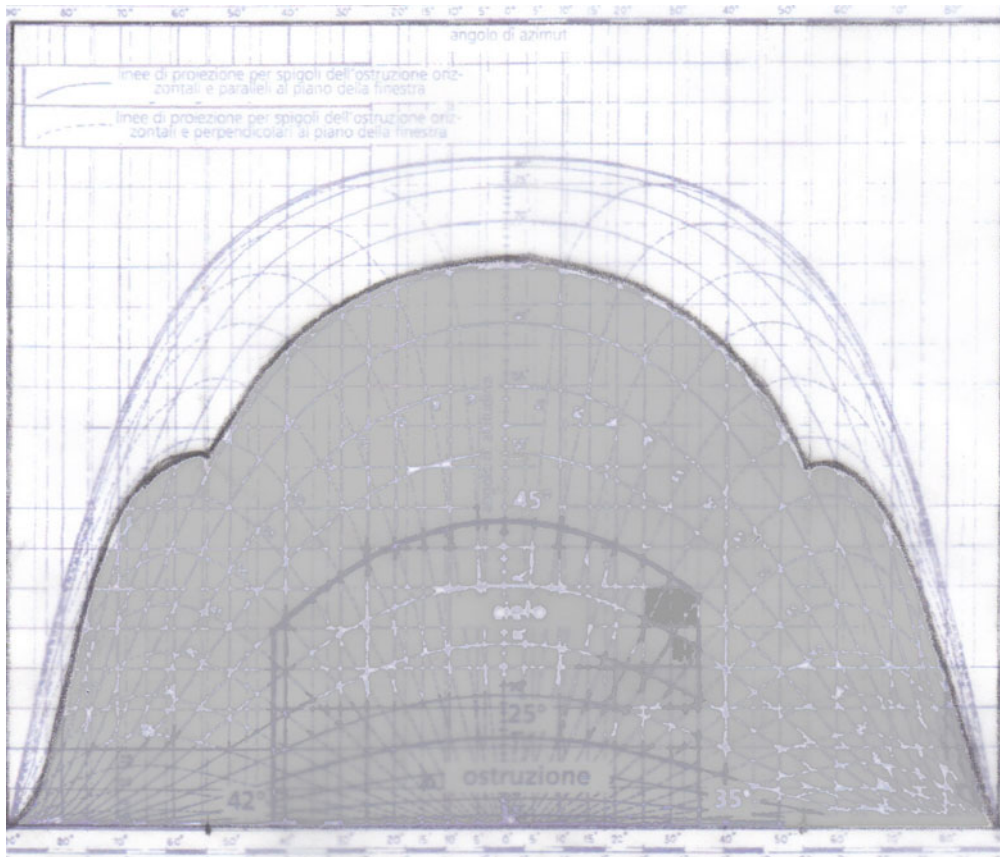


Sezione longitudinale

Individuare la curva centrale data dal rapporto  $H/D'$ , dove  $D'$  è la metà del lato minore della finestra.



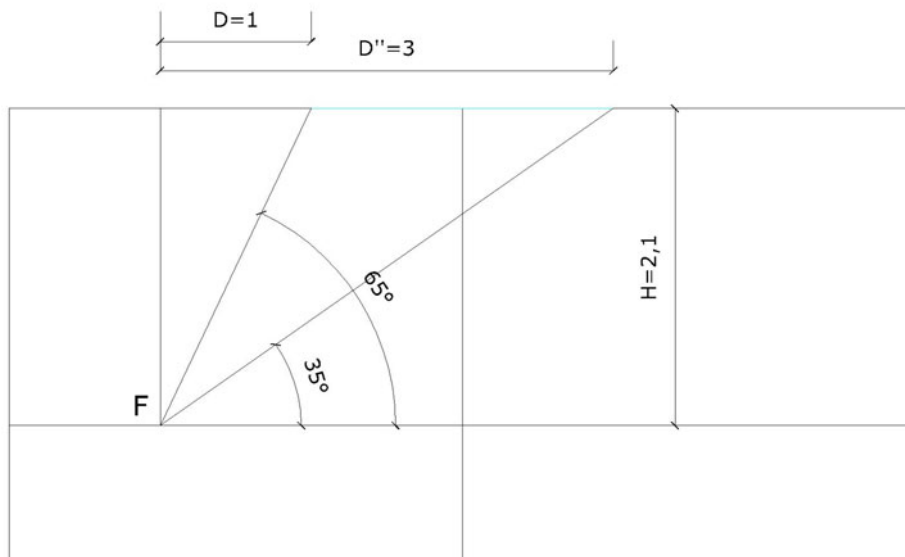
Sezione trasversale



Punto K

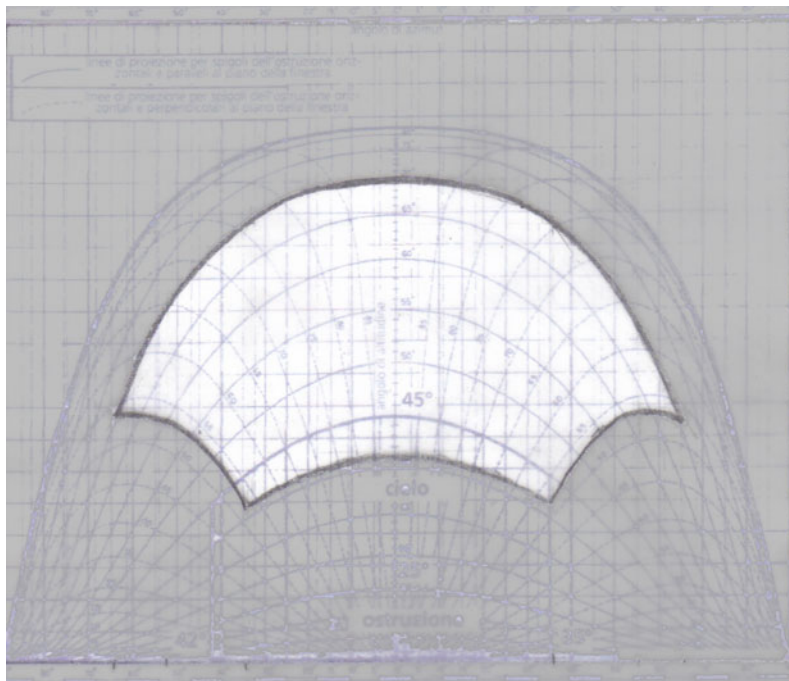
## Punto F

Individuare le curve laterali date dal rapporto  $H/D$  e  $H/D''$ , dove  $D$  è la distanza tra la verticale in F e il lato della finestra più vicino al punto F,  $D''$  è la distanza tra la verticale in F e il lato della finestra più lontano al punto F.



Sezione trasversale.

Individuare le curve laterali date dal rapporto  $H/D'$  uguale a quello per il punto K.



Punto F

Il valore della componente cielo nei punti K e F risulta:

PUNTO	H/D	H/D'	H/D''	C.C%
K	1,4	2,1	-	72,6%
F	2,1	2,1	0,7	12,4%

### **Calcolo componente riflessa internamente con i nomogrammi B.R.S.**

Con l'uso dei nomogrammi B.R.S. per il calcolo della componente riflessa internamente degli ambienti A e B occorre:

- Calcolare il rapporto tra l'area della finestra e l'area totale delle superfici interne e riportarlo sulla scala A del nomogramma.

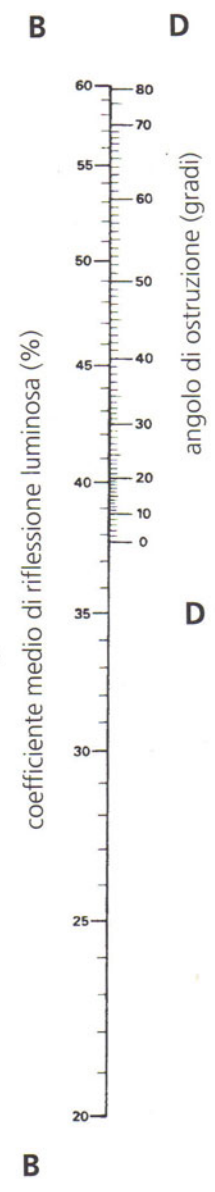
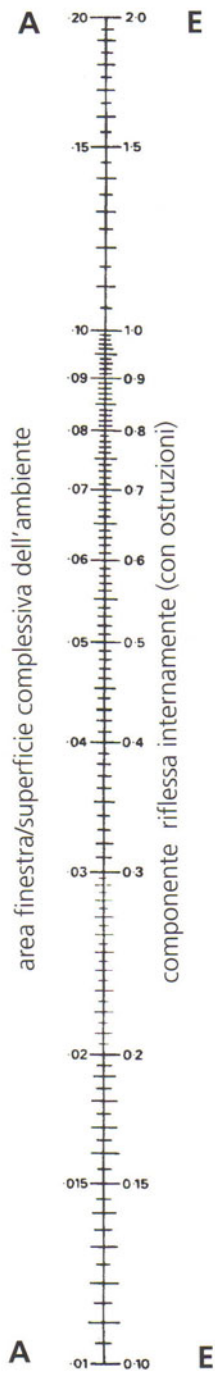
Per l'ambiente A il rapporto è uguale a 0.03

Per l'ambiente B il rapporto è uguale a 0.03

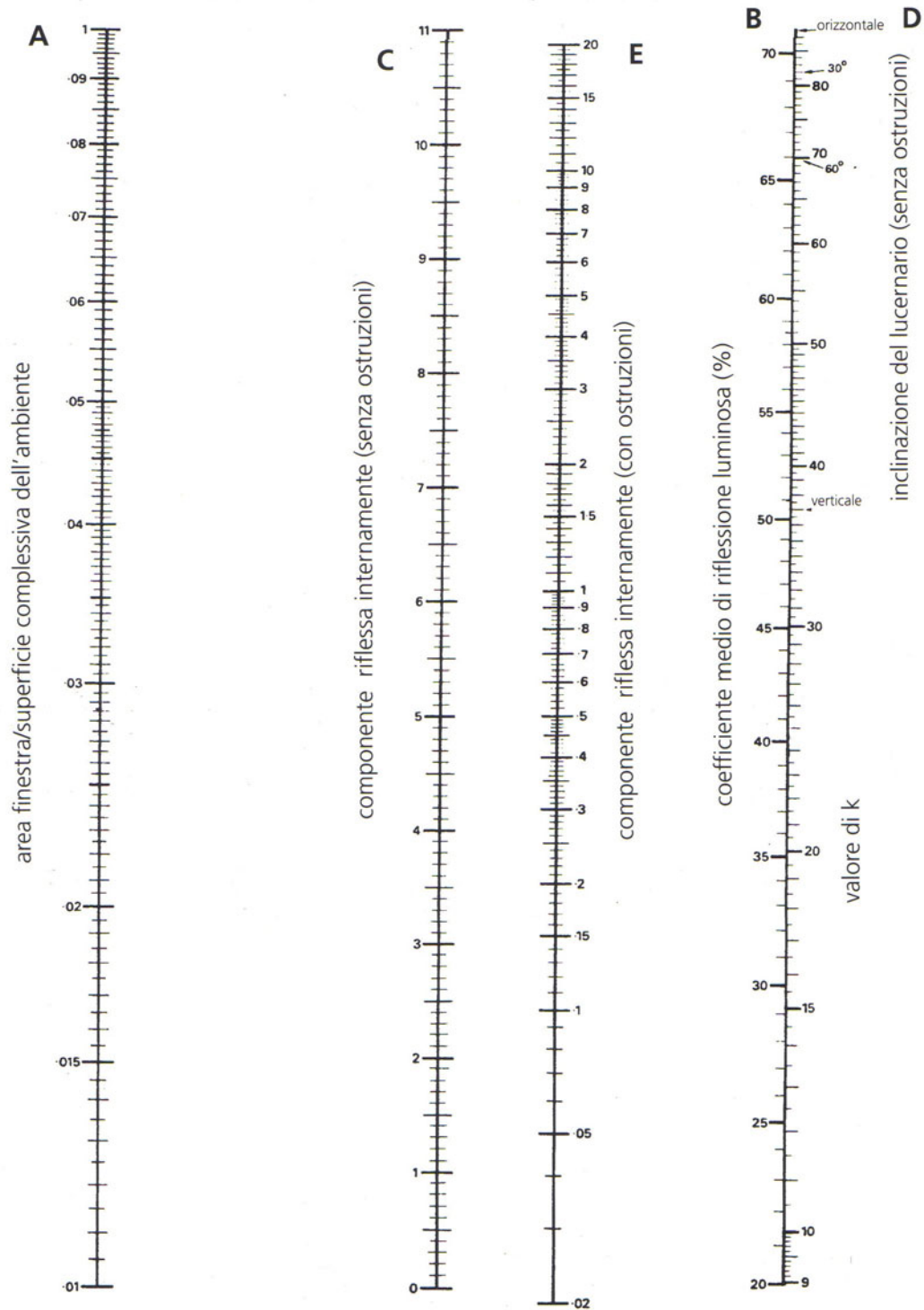
- Calcolare il coefficiente medio di riflessione dell'ambiente tramite la tabella, dove per pareti con riflessione luminosa del 50% il valore è uguale a 43% che si segna sulla scala B del nomogramma.

Il valore della componente riflessa internamente si legge dall'intersezione della retta sulla scala C.

AMBIENTE A



## AMBIENTE B



Il calcolo del fattore di luce diurna è dato dalla somma delle due componenti ricavate, poiché la componente riflessa esternamente può essere trascurata in quanto ci troviamo in una posizione geografica con clima temperato-umido.

La normativa italiana, per la verifica dell'illuminamento naturale all'interno degli ambienti prevede, nel caso in cui l'ambiente sia di dimensioni non troppo grandi e di forma non troppo diversa dal cubo il calcolo simultaneo delle tre componenti costituenti i campi diretto e diffuso.

Ipotizzando l'illuminamento delle varie pareti uniforme e perfettamente diffondente si indica la seguente formula per il calcolo del fattore medio di luce diurna:

$$FD_m = \frac{A_f * \tau * \epsilon * \psi}{S_{tot} (1 - \rho_m)} \quad \%$$

Dove:

$\tau$  = coefficiente di trasmissione luminosa del vetro

$A_f$  = superficie netta della finestra, in  $m^2$

$S_{tot}$  = area totale delle superfici interne dell'ambiente, in  $m^2$

$\rho_m$  = coefficiente medio di riflessione delle superfici interne dell'ambiente

$\epsilon$  = fattore finestra

$\epsilon = 100\%$ , superfici orizzontali prive di ostruzioni

$\epsilon = 50\%$ , superfici verticali prive di ostruzioni

$\epsilon < 50\%$ , superfici verticali in presenza di ostruzioni

$\psi$  = coefficiente di riduzione del fattore finestra, dipende dalla posizione del vetro e dallo spessore della parete.

Il valore minimo del  $FD_m$  imposto dalla normativa dipende sia dalla destinazione d'uso dell'edificio, sia dalla funzione propria dei singoli spazi all'interno di esso.

	<b>FATTORE MEDIO DI LUCE DIURNA</b>		
	$FD_m = 0.01$	$FD_m = 0.02$	$FD_m = 0.03$
Edilizia residenziale		Tutti i locali di abitazione	
Edilizia scolastica	Uffici, spazi di distribuzione, scale, servizi igienici	Palestre e refettori	Ambienti ad uso didattico e laboratori
Edilizia ospedaliera	Uffici, spazi di distribuzione, scale, servizi igienici	Palestre e refettori	Ambienti di degenza, diagnostica, laboratori



## AMBIENTE A

$\tau$  = coefficiente di trasmissione del vetro,  $\tau = 89.8 \%$

$A_f$  = superficie netta della finestra,  $1.5 * 3 = 4.5 \text{ m}^2$

$S_{\text{tot}}$  = area totale delle superfici interne dell'ambiente,  $193.5 \text{ m}^2$

$\rho_m$  = coefficiente medio di riflessione delle superfici interne dell'ambiente,  $43\%$

$\varepsilon$  = fattore finestra,  $\varepsilon = 50\%$ , superfici verticali prive di ostruzioni =  $0.5$

Il coefficiente di riduzione  $\psi$  vale  $1$ , in quanto la finestra è a filo del tamponamento esterno.

Quindi il fattore medio di luce diurna risulta:

$$FD_m = \frac{4.5 * 0.898 * 0.5 * 1}{193.5 (1 - 0.43)} = 0.018 = 1.8\%$$

## AMBIENTE B

$\tau$  = coefficiente di trasmissione del vetro,  $\tau = 89.8 \%$

$A_f$  = superficie netta della finestra,  $2 * 3 = 6 \text{ m}^2$

$S_{\text{tot}}$  = area totale delle superfici interne dell'ambiente,  $192 \text{ m}^2$

$\rho_m$  = coefficiente medio di riflessione delle superfici interne dell'ambiente,  $43\%$

$\varepsilon$  = fattore finestra,  $\varepsilon = 100\%$ , superfici verticali prive di ostruzioni =  $1$

Il coefficiente di riduzione  $\psi$  vale  $1$ , in quanto la finestra è a filo della soletta di copertura.

Quindi il fattore medio di luce diurna risulta:

$$FD_m = \frac{6 * 0.898 * 1 * 1}{192 (1 - 0.43)} = 0.049 = 4.9\%$$

### 5.3 Calcoli computerizzati

RAFIS

Ambiente A

Ambiente caratterizzato da una finestra verticale esposta sul lato sud.

FLD

Valore minimo 0,21%

Valore medio 2,98%

Valore massimo 30,15%



Scala del fattore di illuminazione naturale in %.

Ambiente B

Ambiente caratterizzato da una finestra posizionata sul soffitto.

FLD

Valore minimo 0,64%

Valore medio 8,26%

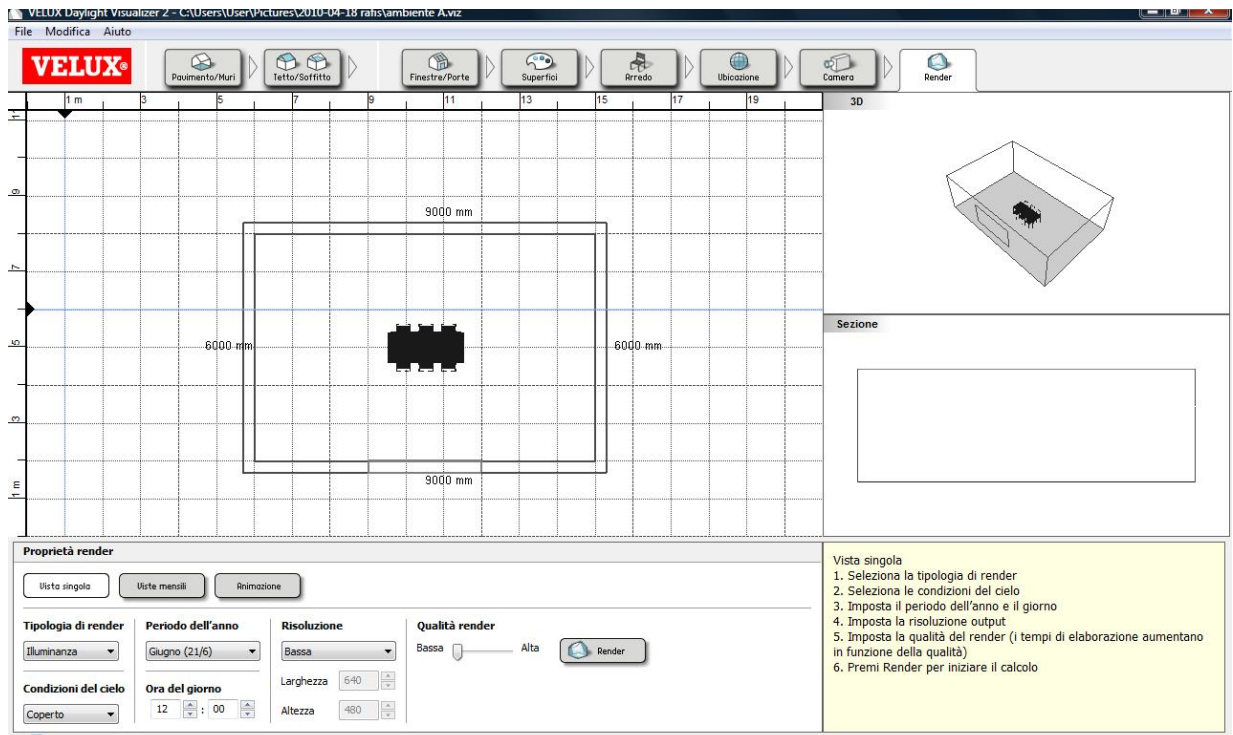
Valore massimo 30,36%



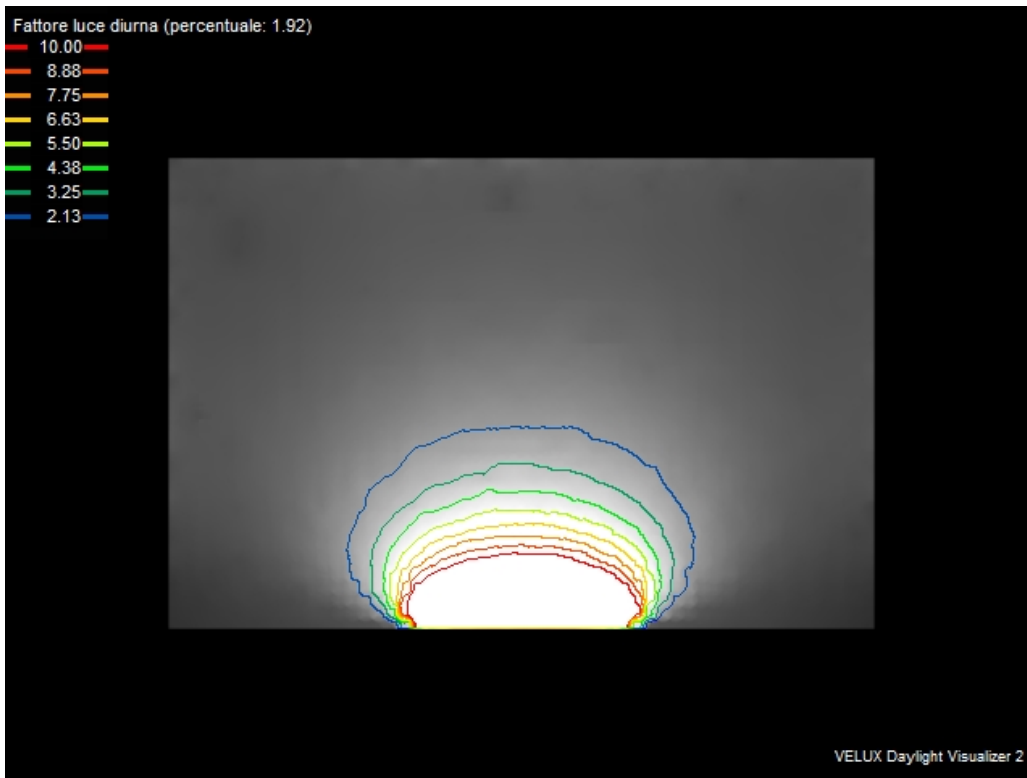
Scala del fattore di illuminazione naturale in %.

# DAYLIGHT

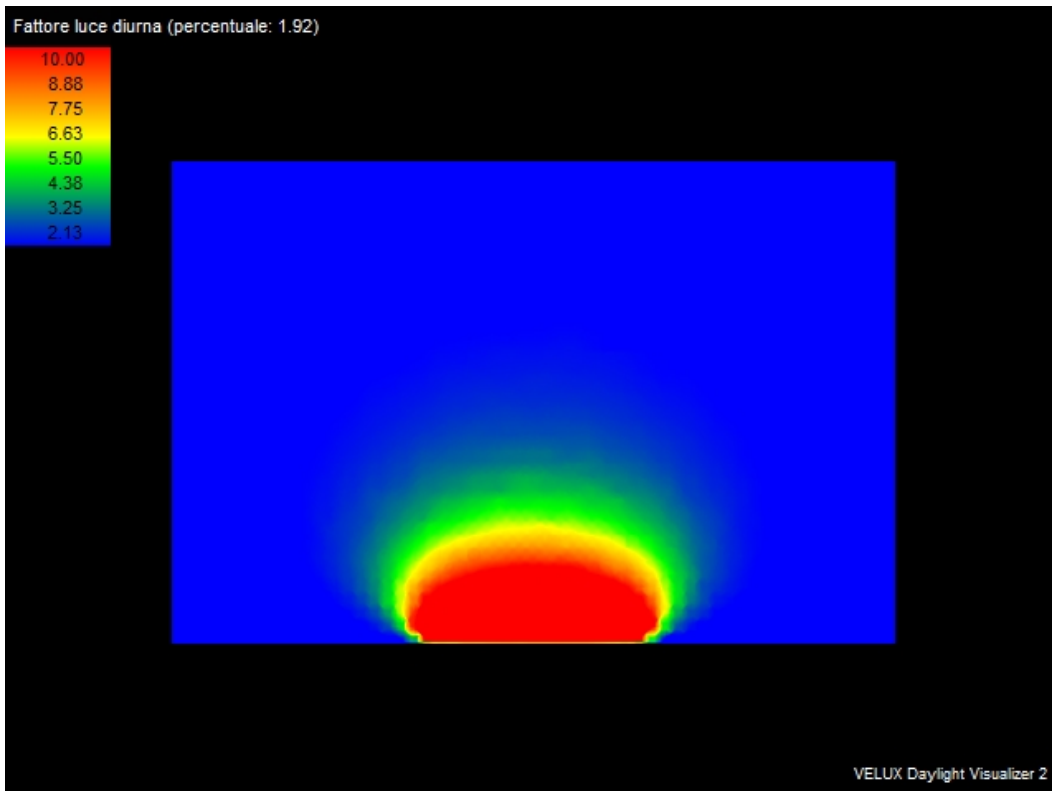
## Ambiente A



Schermata iniziale per l'inserimento dei parametri.



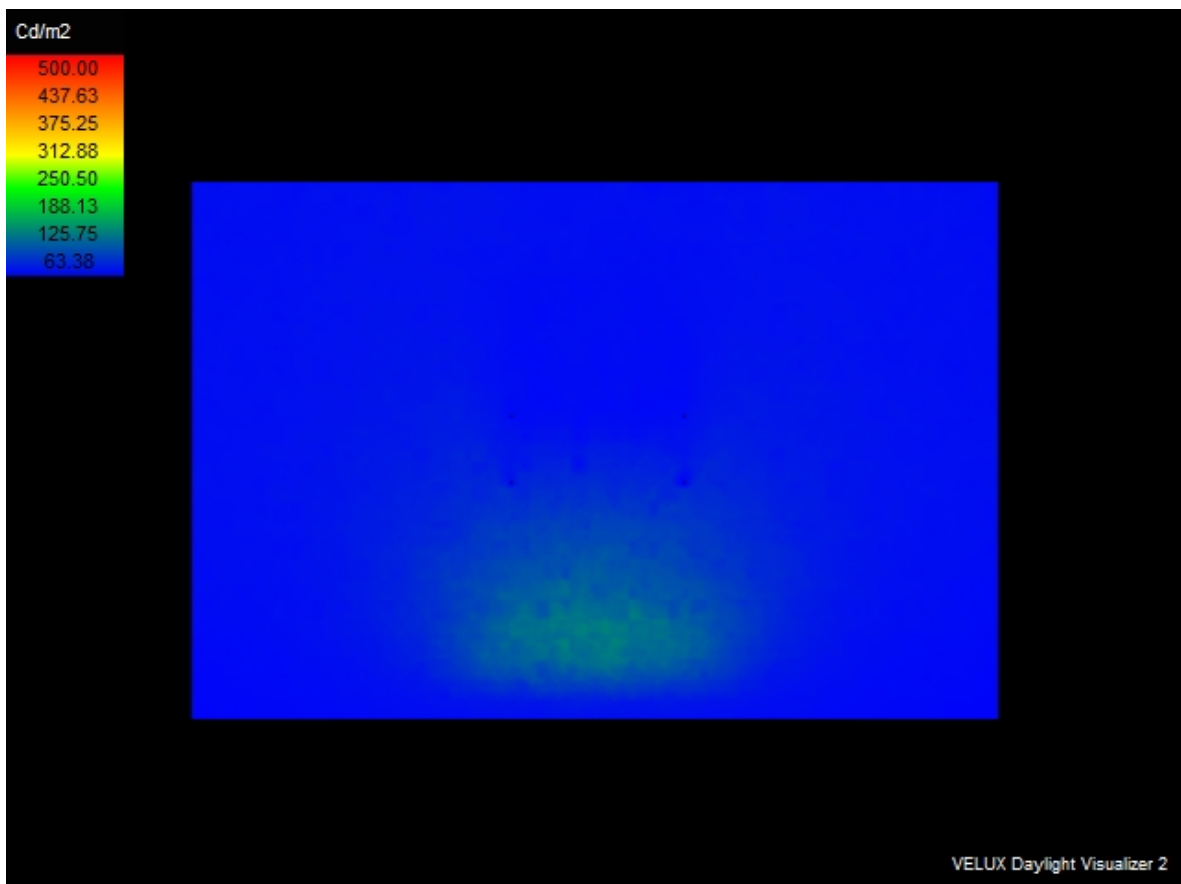
Fattore luce diurna con rilevazione iso.



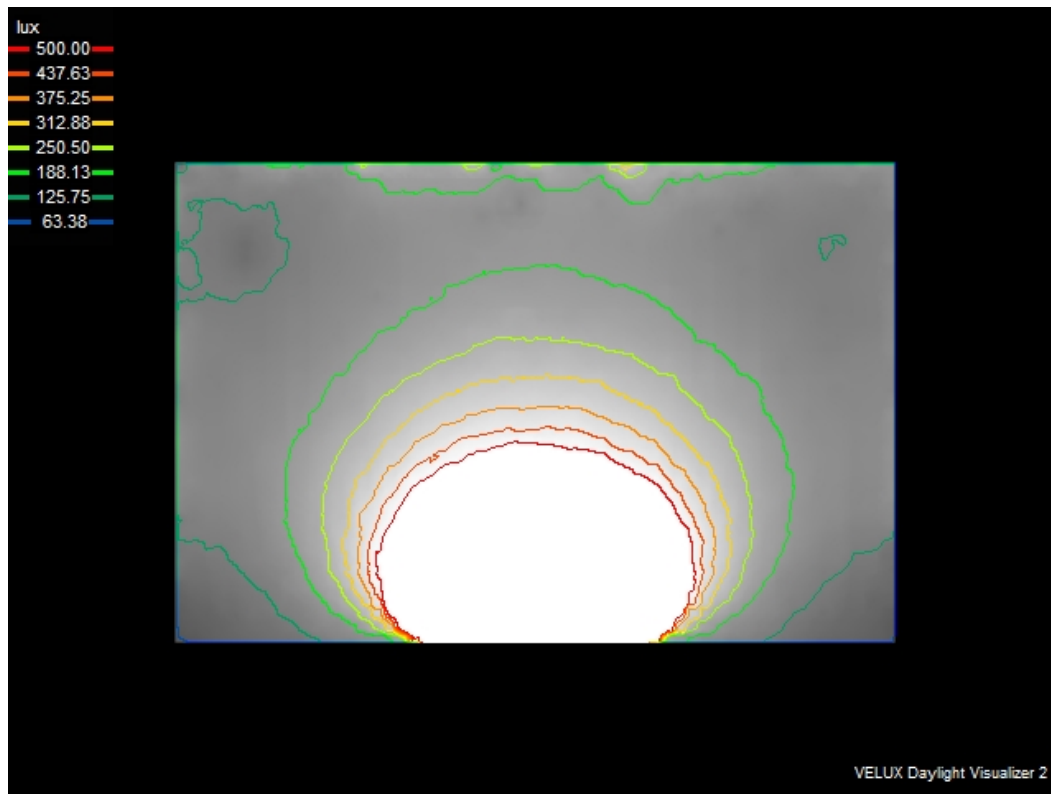
Fattore luce diurna con falsi colori.



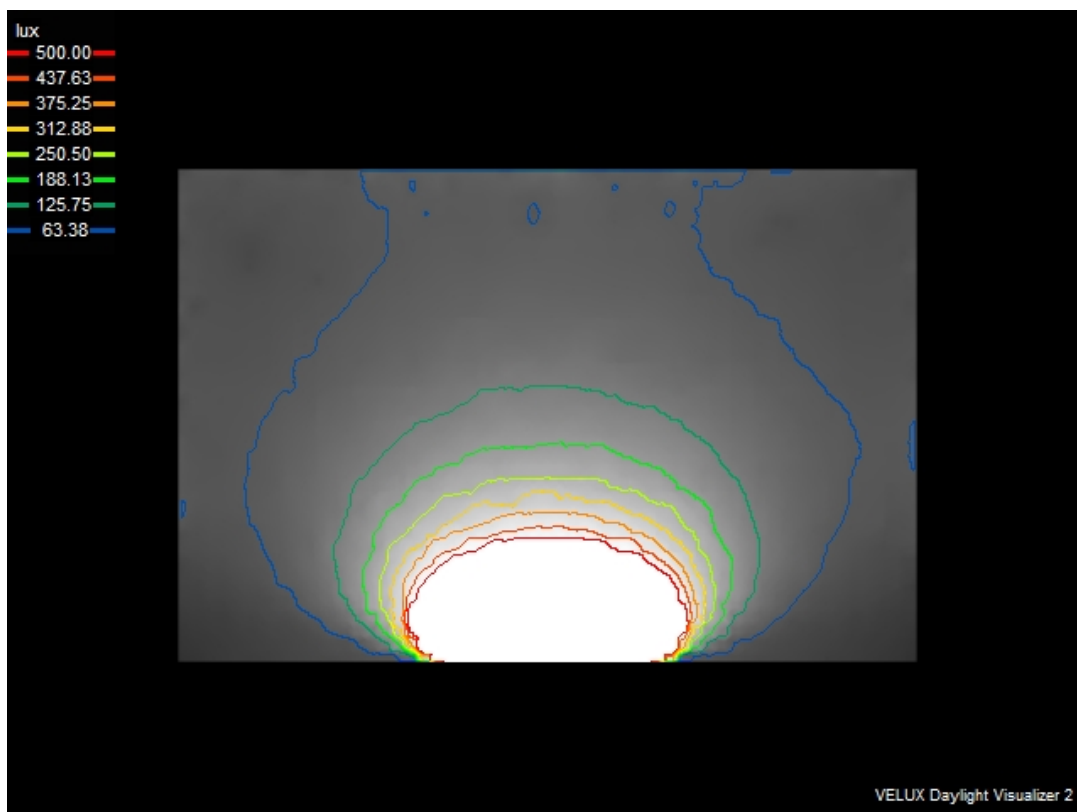
Luminanza con rilevazione iso in condizioni di cielo sereno.



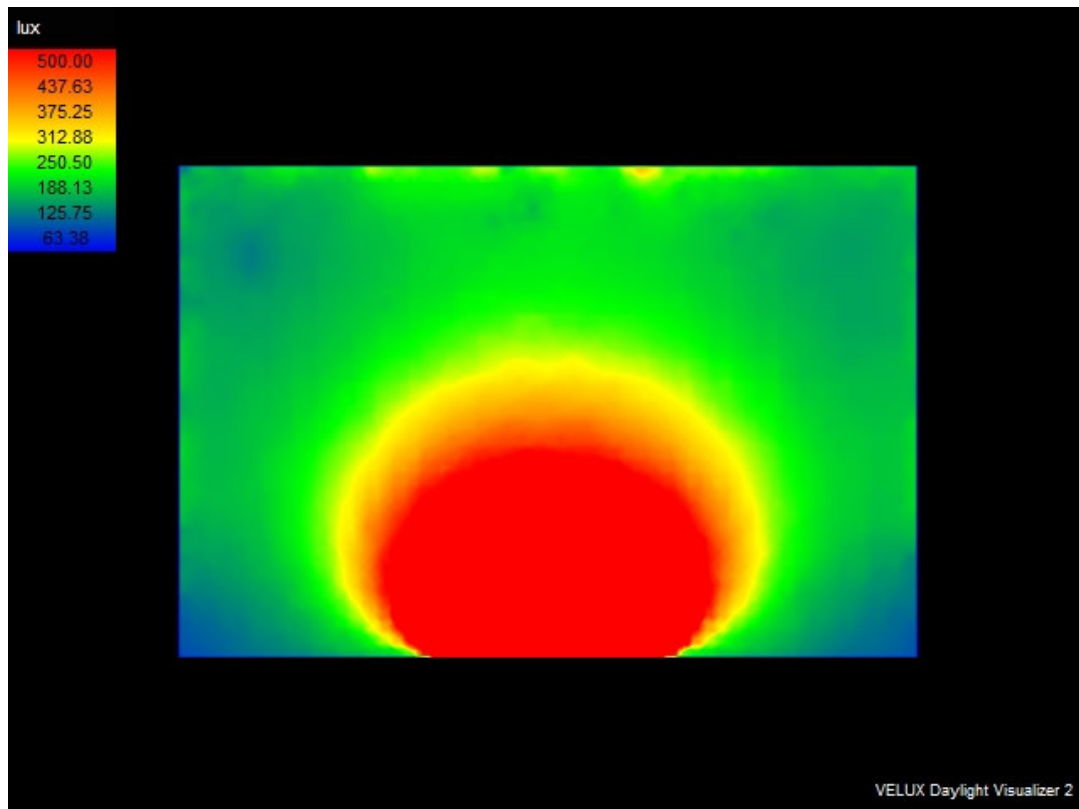
Luminanza con falsi colori in condizioni di cielo sereno.



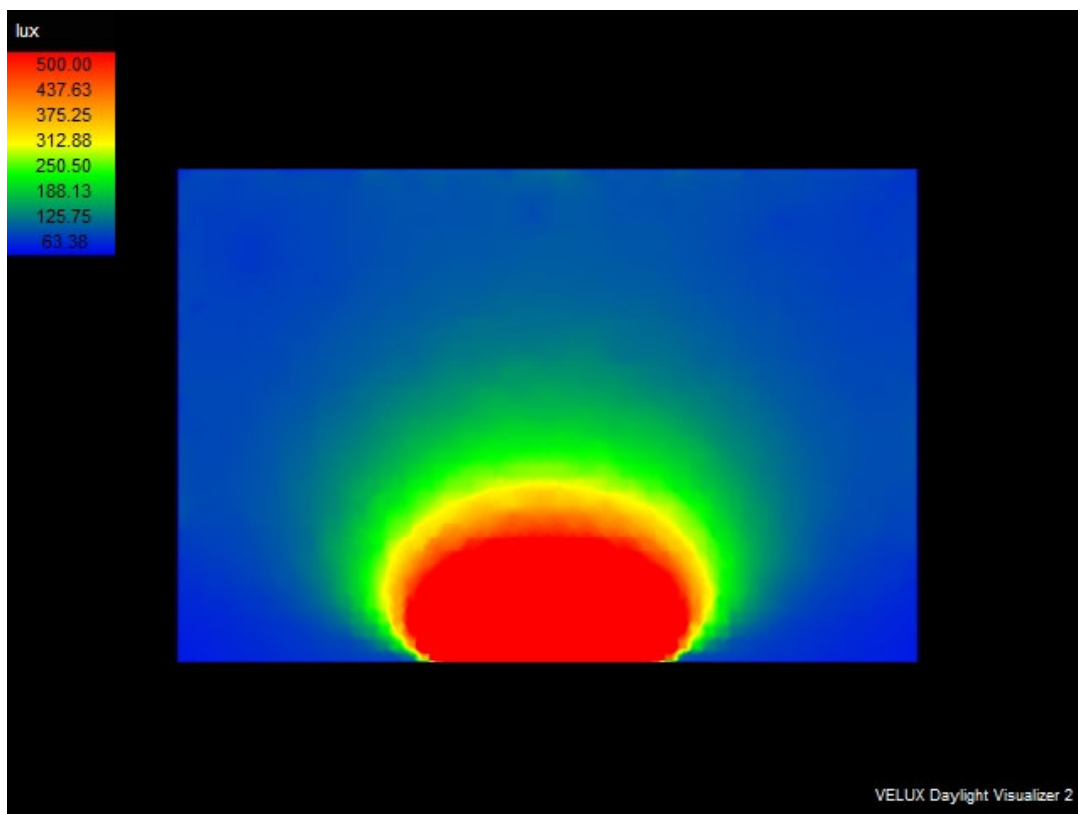
Illuminanza con rilevazione iso in condizioni di cielo sereno.



Illuminanza con rilevazione iso in condizioni di cielo coperto.



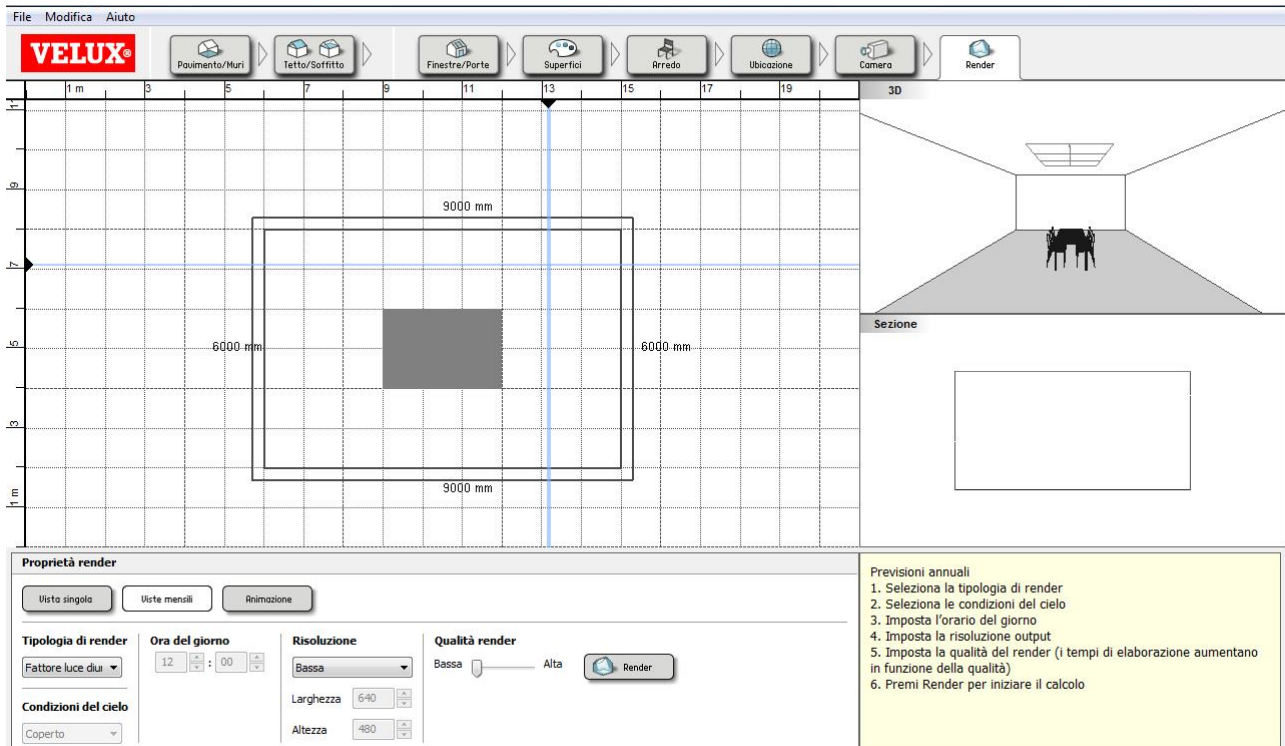
Illuminanza con falsi colori in condizioni di cielo sereno.



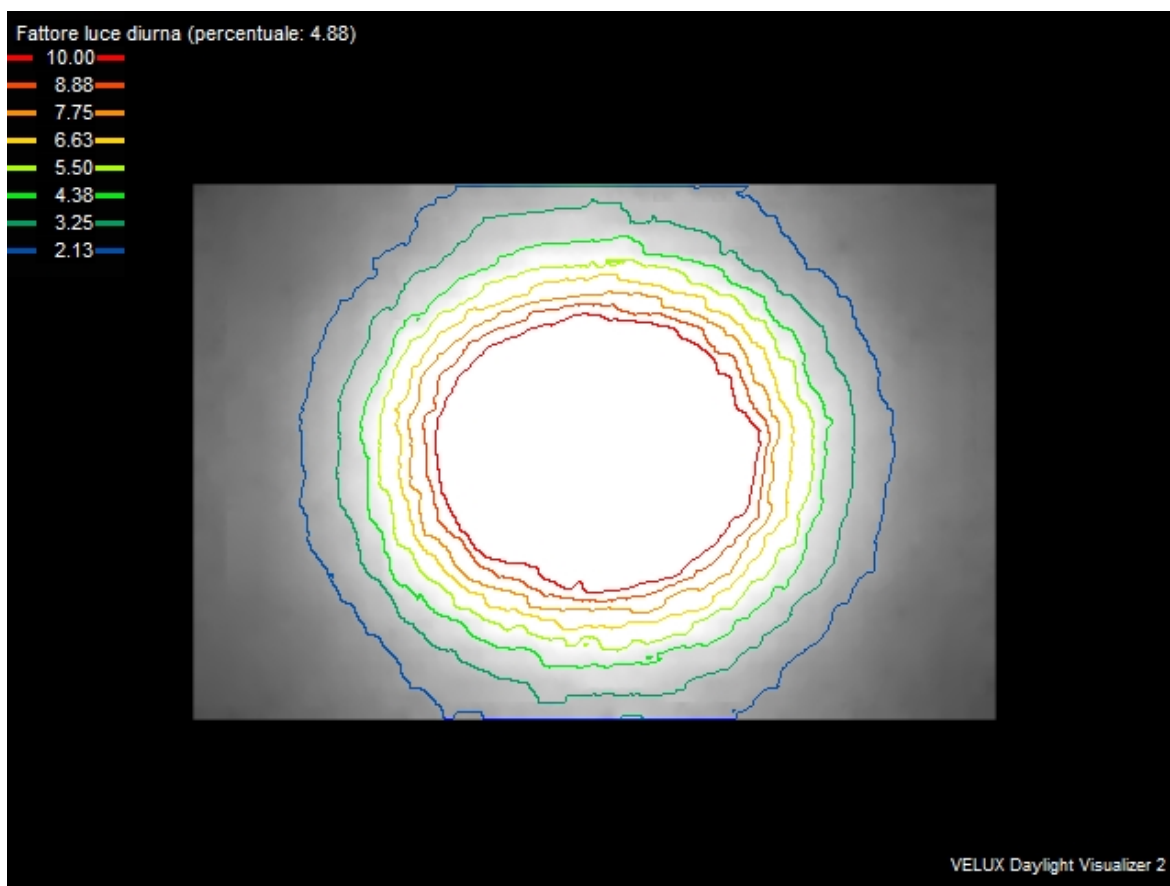
Illuminanza con falsi colori in condizioni di cielo coperto.



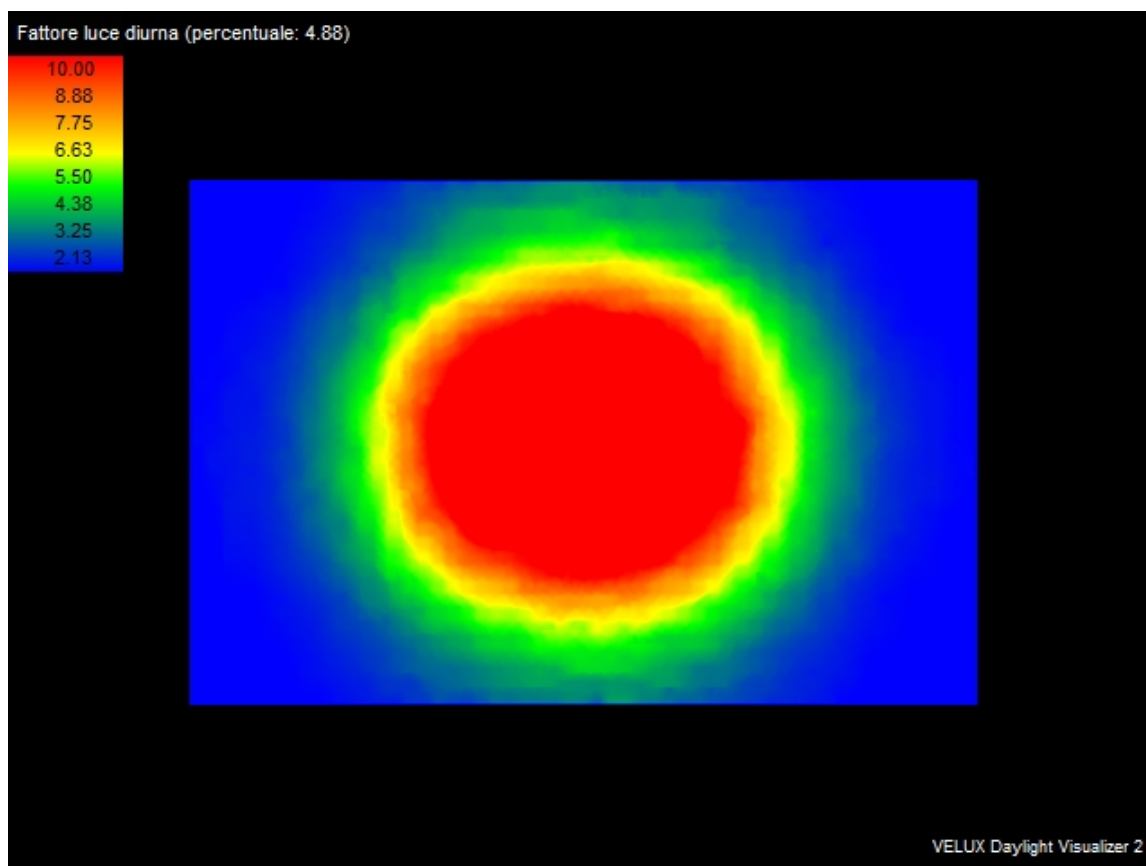
## Ambiente B



Schermata iniziale per l'inserimento dei parametri.



Fattore luce diurna con rilevazione iso.



Fattore luce diurna con falsi colori.

## 5.4 Uso di modelli in scala

Rilievi fotografici

### AMBIENTE A



### AMBIENTE B



## 5.5 Confronti e conclusioni

Avendo operato delle analisi con i diversi strumenti per il calcolo dell'illuminazione naturale si può affermare che:

- I metodi manuali hanno il vantaggio di essere di semplice utilizzo; richiedono pochi parametri sono economici (non costano nulla). Di contro hanno un campo di applicazione limitato a forme geometriche semplici e risultati approssimativi;
- I metodi di calcolo computerizzato hanno la possibilità di gestire calcolo e modelli complessi; valutare un alto numero di parametri; confrontare soluzioni progettuali diverse. Di contro hanno la complessità di utilizzo di alcuni e la difficoltà di reperire software gratuiti; tempi "lungi" nell'elaborare ambienti complessi; difficoltà a modellare o inserire i parametri di materiali innovativi piuttosto che sistemi di controllo della radiazione solare; numero limitato di condizioni di cielo; difficoltà ad ottenere immagini per un'analisi visiva;
- I modelli in scala hanno il vantaggio di avere un approccio basato su misure reali; analisi qualitative e quantitative; riproduzioni quasi fedeli delle situazioni reali; osservazione diretta dell'ambiente e valutare così il comfort visivo. Di contro si ha una notevole complessità e tempi relativamente lunghi per la costruzione di modelli molto particolareggiati; difficoltà di inserire materiali che abbiano la stessa proprietà fotometrica di quelli reali; nei modelli a cielo reale c'è difficoltà a confrontare diverse soluzioni progettuali per l'impossibilità di riferirsi sempre a condizioni standard; nei cieli artificiali, oltre alla scarsa possibilità di usare la strumentazione, c'è la possibilità di eventuali errori di scala;
- I metodi manuali trascurano la componente riflessa esternamente, mentre i metodi di calcolo computerizzato la tengono in considerazione, quindi non vi è completa corrispondenza dei risultati ottenuti;
- Rafis opera il calcolo su un piano di lavoro posto ad un'altezza fissa di 0.8 m dal pavimento (salvo intervenire manualmente sul file), a

differenza degli altri metodi che operano su un piano di lavoro posto ad un'altezza definita dall'utente di 0.9 m dal pavimento;

- Rafis non tiene conto del giorno, mese e anno, ma solo dell'orientamento della superficie vetrata e non possibilità di aggiungere sistemi di controllo della radiazione solare;
- Superlite 2.0 ha la possibilità di aggiungere sistemi di controllo della radiazione solare ed illuminazione artificiale;
- Superlite 2.0 opera solo in campo quantitativo, fornendo solo risultati numerici;
- Daylight permette di avere immagini fotorealistiche dell'ambiente interno ma non da la possibilità di modellare sistemi di controllo della radiazione solare.

Il lavoro di tesi pone particolare attenzione all'analisi dell'illuminazione naturale all'interno degli ambienti.

Si riscontra, pertanto, da parte del progettista la necessità di controllare i principali aspetti legati all'illuminazione naturale, in termini non solo di valutazione quantitativa delle grandezze fotometriche, ma anche di valutazione qualitativa dell'ambiente luminoso che risulta prodotto, di fondamentale importanza nel determinare la presenza o assenza di condizioni di comfort visivo.

Predeterminare in sede progettuale i necessari livelli di illuminamento sulle superfici di lavoro risulta, nella pratica, difficoltoso, a causa della natura dinamica ed irregolare della luce solare.

Essa, infatti, a differenza della luce artificiale, non può essere controllata e fissata dal progettista, variando essa sia in distribuzione, sia in intensità, in funzione del clima e delle stagioni e dei diversi momenti della giornata.

Inoltre, bisogna tenere conto delle caratteristiche architettoniche dell'edificio, del suo orientamento, di quello delle superfici trasparenti, della presenza di eventuali ostruzioni, prendere in considerazione, cioè, l'interazione luce diurna-edificio.

Se da un lato è posta sempre maggiore attenzione ad una progettazione consapevole e razionale degli ambienti interni, basata sull'utilizzo della luce naturale, dall'altro si registra una certa carenza di strumenti previsionali di uso immediato.

Per questo la tesi si è proposta di illustrare i metodi più semplici e diffusi per operare questo tipo di analisi.

Dal confronto emerge che alcuni metodi sono più efficaci per una valutazione qualitativa, altri per una valutazione quantitativa.

Ogni metodo ha dei limiti e di conseguenza ne viene adottato uno piuttosto che un altro a seconda del tipo di risultato che voglio ottenere.

Il progettista, in genere, tende a preferire, da subito, valutazioni qualitative, in quanto l'immagine può dare un'immediata idea e percezione dell'ambiente interno.

A questo poi seguono rilevazioni numeriche per dare un valore quantitativo alla percezione visiva iniziale.

Il lavoro svolto non è solo fine alla tesi di laurea, poiché i temi trattati riguardano anche il campo professionale, infatti l'analisi e la modellazione ambientale sono temi centrali nella professione dell'architetto, di conseguenza è stato utile approfondire questo tema anche in previsione del campo lavorativo post-laurea.

## BIBLIOGRAFIA

Chiara Aghemo, Valerio Lo Verso  
*Guida alla progettazione dell'illuminazione naturale*, AIDI, Parma, 1993

Chiara Aghemo, Cristina Azzolino,  
*Illuminazione naturale: metodi ed esempi di calcolo*, Celid, Torino, 1995

AA.VV.  
*Daylight in Architecture*, A European Reference Book, James & James (Science Publisher) Ltd, Londra, 1993

AA.VV.  
*Energy in Architecture*, John R. Goulding, J. Owen Lewis, Theo C. Steemers,  
Dublino, 1993

AA.VV.  
*Daylighting in architecture*, N. Baker, A. Fanchiotti, K. Steemers,  
Dublino, 1993

Erica Maria Francesca Graziani, Silvana Alessandra Guerra,  
*Soluzioni e tecniche per il controllo della radiazione solare*, Tesi di Laurea  
Triennale, Milano, 2004-2005

Alessandro Rogora,  
*Luce naturale e progetto*, Maggioli editore, Rimini, 1997

Alessandro Rogora,  
*Architettura e Bioclimatica: la rappresentazione dell'energia nel progetto*,  
Sistemi Editoriali, Napoli, 2003

Maria Chiara Torricelli, Marco Sala, Simone Secchi,  
*Daylight, la luce del giorno, tecnologie e strumenti per la progettazione*, Alinea,  
Firenze, 1995

## SITOGRAFIA

Per il software Rafis:

<http://www.upc.edu/aie/catala/soft/index.html>

Per il software Superlite:

<http://btech.lbl.gov/tools/superlite>

Per il software Daylight:

<http://www.theoptimizer.it/daylight-visualizer/download.html>