

ENEA

Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente



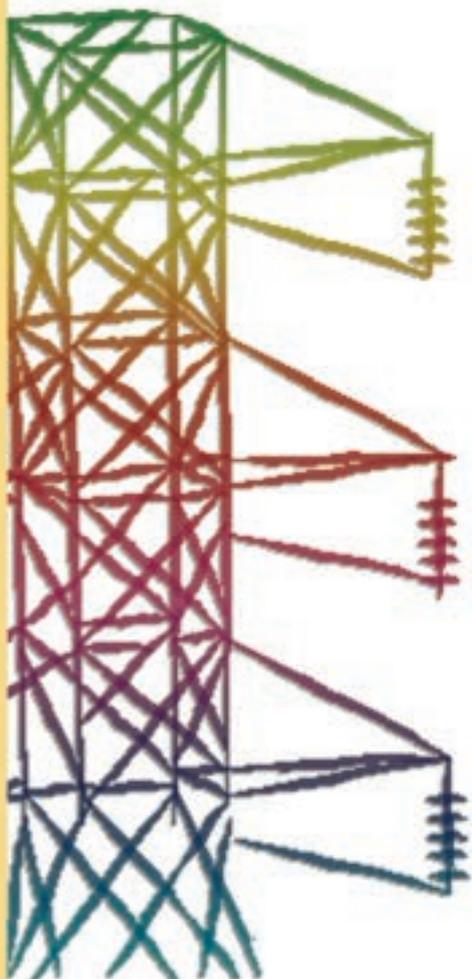
Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Integrazione luce naturale/luce artificiale in ambito industriale

Parte 6: Tecniche di modellazione avanzate e tradizionali per l'analisi dell'ambiente visivo in presenza di sistemi tradizionali e innovativi

Franco Gugliermetti, Fabio Bisegna





Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Integrazione luce naturale/luce artificiale in ambito industriale
Parte 6: Tecniche di modellazione avanzate e tradizionali per
l'analisi dell'ambiente visivo in presenza di sistemi tradizionali e
innovativi

Franco Gugliermetti, Fabio Bisegna



INTEGRAZIONE LUCE NATURALE/LUCE ARTIFICIALE IN AMBITO INDUSTRIALE
PARTE 6: TECNICHE DI MODELLAZIONE AVANZATE E TRADIZIONALI PER L'ANALISI
DELL'AMBIENTE VISIVO IN PRESENZA DI SISTEMI TRADIZIONALI E INNOVATIVI

Franco Gugliermetti, Fabio Bisegna (Dipartimento di Fisica Tecnica dell'Università di Roma La Sapienza)

Aprile 2009

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Usi finali

Tema: Promozione delle tecnologie elettriche innovative negli usi finali

Responsabile Tema: Ennio Ferrero, ENEA

Sommario

La presente relazione riporta i risultati della ricerca su diversi argomenti. La relazione è stata suddivisa in 6 parti (e files), corrispondenti ai capitoli.

Parte 1. Analisi dell'ambiente luminoso del capannone AleniaAermacchi

L'analisi è riferita al caso studio nella sua struttura generale, con particolare attenzione all'aspetto dell'illuminazione naturale. I valori di illuminamento e fattore di luce diurna sono studiati tramite simulazioni.

Parte 2. Analisi delle possibili tecniche, componenti e regolazioni per l'illuminazione artificiale/naturale

Stato dell'arte sul controllo dell'illuminazione naturale: le funzioni da svolgere, i sistemi di illuminazione diurna ovvero componenti schermanti opache o trasparenti innovativi. Il sistema di illuminazione artificiale: stato dell'arte sulle sorgenti, gli apparecchi, i sistemi di controllo e integrazione con la luce naturale. Aspetti di progettazione architettonica delle applicazioni integrate.

Parte 3. Simulazioni numeriche delle possibili soluzioni per il capannone AleniaAermacchi

Analisi dell'ambiente luminoso del caso studio simulando diverse disposizioni / aree delle superfici finestrate.

Parte 4. Linee guida per la progettazione in interni con presenza di illuminazione naturale e progettazione di massima

Riferite a illuminazione in interni con presenza di illuminazione naturale. Indicazioni per individuare le migliori soluzioni per una progettazione efficiente ed efficace della luce artificiale, che ben si integri con il contributo di luce naturale

Parte 5. Protocolli di monitoraggio

Riferite alla verifica del soddisfacimento dei requisiti normativi, laddove presenti, in funzione delle grandezze fotometriche (illuminamenti, luminanze, colore della radiazione luminosa...) sulle diverse superfici presenti all'interno di uno spazio confinato, da cui si ricavano indici quali valori medi, fattori di luce diurna, coefficienti di uniformità, indici di abbagliamento...

Parte 6. Tecniche di modellazione avanzate e tradizionali per l'analisi dell'ambiente visivo in presenza di sistemi tradizionali e innovativi

Sono presentati metodi di calcolo manuali, i modelli in scala e alcuni software di calcolo computerizzato, evidenziandone le diverse caratteristiche a confronto.

**ATTIVITA' DI RICERCA:
INTEGRAZIONE LUCE NATURALE / ARTIFICIALE
IN AMBITO INDUSTRIALE**

Nell'ambito del Tema di ricerca 5.4.3.1
*"Promozione delle tecnologie elettriche innovative negli usi finali",
di cui all'art 11 del decreto 8 marzo 2006*

ACCORDO DI COLLABORAZIONE TRA

ENEA
Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e
l'Ambiente

E IL

DIPARTIMENTO DI FISICA TECNICA
DELLA "SAPIENZA" UNIVERSITA' DI ROMA

RELAZIONE FINALE

PARTE 6

Roma, Aprile 2009

CONTENUTI

CAPITOLO 6. TECNICHE DI MODELLAZIONE AVANZATE E TRADIZIONALI PER L'ANALISI DELL'AMBIENTE VISIVO IN PRESENZA DI SISTEMI TRADIZIONALI E INNOVATIVI	3
METODI DI CALCOLO MANUALI	3
I MODELLI IN SCALA	4
SOFTWARE DI CALCOLO COMPUTERIZZATO	9
<i>Verifica dell'attendibilità delle simulazioni</i>	21
<i>Conclusioni</i>	31

Capitolo 6. Tecniche di modellazione avanzate e tradizionali per l'analisi dell'ambiente visivo in presenza di sistemi tradizionali e innovativi

I metodi generalmente impiegati per il calcolo della luce naturale sono tre:

- metodi di calcolo manuali
- modelli in scala, con impiego in cielo reale ovvero artificiale
- software di calcolo computerizzato.

Ciascuno dei tre metodi deve essere valutato sulla base di tre aspetti chiave che permettono di definirne potenzialità e limiti:

- praticità d'uso
- affidabilità nella simulazione delle sorgenti luminose
- interazione luce-ambiente

Come considerazione generale, prima di passare ad un'analisi più dettagliata dei differenti metodi, va detto che in generali tutti i metodi possono essere impiegati nelle diverse fasi progettuali con finalità ed impegno differenti. Ad esclusione poi dei metodi manuali, gli altri due metodi, caratterizzati da potenzialità e limiti completamente differenti, vengono spesso combinati ed associati per uno studio quali-quantitativo dell'ambiente luminoso più completo ed approfondito.

Metodi di calcolo manuali

I metodi di calcolo manuali (di tipo analitico o grafico) sono generalmente caratterizzati da molti limiti, in quanto applicabili esclusivamente a un numero limitato di situazioni molto semplici. Il loro campo d'applicazione è pertanto fortemente limitato, ed i risultati sono molto approssimativi e possono essere considerati solamente in una fase progettuale preliminare. I vantaggi associati a questo metodo sono: la semplicità di utilizzo, i pochi parametri richiesti e l'economicità. La Tab. 6.1 riporta in modo sintetico i vantaggi e gli svantaggi del questo metodo di calcolo.

Tabella 6.1. Metodi di calcolo manuali

Vantaggi	Svantaggi
Semplicità di utilizzo	Campo d'applicazione fortemente limitato (geometrie semplici e tecnologie tradizionali)
Pochi parametri richiesti	Risultati approssimativi
Economicità	

I modelli in scala

I modelli in scala consentono di prevedere le condizioni di illuminazione naturale in spazi confinati, analizzando così il progetto direttamente, attraverso misure dei valori delle grandezze fotometriche, sotto un cielo reale o all'interno di un cielo artificiale, e dando quindi al progettista la possibilità di controllare in tempi rapidi la validità delle soluzioni progettuali definite. L'aspetto fondamentale di questa operazione sta nel riprodurre accuratamente la geometria, i materiali, e le proprietà fotometriche delle superfici che caratterizzano il modello per ottenere dei risultati il più possibile attendibili.

L'efficacia dei modelli in scala rispetto agli altri due metodi di calcolo risulta evidente nel caso di geometrie particolarmente complesse, e inoltre risulta comunque utile come metodo di verifica al calcolo manuale e/o ai programmi di calcolo computerizzato.

Un aspetto fondamentale nella realizzazione del modello in scala è lo studio dell'ambiente luminoso naturale, infatti si può posizionare il modello sotto un cielo reale o sotto un cielo artificiale.

Nelle simulazioni fatte sotto un cielo reale, si ha la sicurezza di sperimentare e verificare gli spazi confinati nelle effettive condizioni di luce naturale, per cui è possibile ottenere risultati immediati, e una valutazione qualitativa dell'ambiente luminoso; l'approccio che ne risulta è estremamente semplice ed economico, anche se esistono limiti dovuti all'imprevedibilità e alla variabilità dell'intensità della luce esterna, per cui si può verificare nel tempo la variazione dei livelli di illuminamento e di luminanza misurati anche in condizioni meteorologiche apparentemente identiche. La scelta di sperimentare il modello sotto un cielo reale può quindi risultare vantaggiosa più in termini di visualizzazione qualitativa dell'ambiente, che dal punto di vista quantitativo; questa considerazione risulta vera in particolare nelle prime fasi progettuali, quando risulta utile ottenere facilmente e rapidamente informazioni sul modo in cui possono apparire gli ambienti interni.

Da un punto di vista quantitativo può essere più efficace ricorrere all'utilizzo dei modelli sotto un cielo artificiale, che opportunamente integrato con un sole artificiale (*heliodon*) permette di poter scegliere la distribuzione delle luminanze e il percorso apparente del sole desiderati, e di mantenere questi valori costanti nel tempo: diventa in questo modo possibile valutare le prestazioni fornite da diversi sistemi di illuminazione naturale, confrontando in tempi brevi soluzioni progettuali anche molto diverse. Tale scelta diventa quindi vantaggiosa sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo.

La Tab. 6.2 mostra in modo sintetico i vantaggi e gli svantaggi associati all'impiego di modelli in scala per la valutazione dell'ambiente luminoso.

Tabella 6.2. Modelli in scala.

Vantaggi	Svantaggi
non sono necessari fattori di scala	complessità e tempi lunghi per la realizzazione di modelli precisi e accurati
molto usati in campo progettuale	difficoltà (e costi) nel predisporre un apparato di strumenti di misura in modelli di ridotte dimensioni
accuratezza nei risultati	difficoltà di disporre di elementi e materiali nella giusta scala e con le reali proprietà fotometriche
particolarmente vantaggiosi nel caso di geometrie complesse	
riproduzione fedele di situazioni reali	
possibilità di analisi su scale diverse (urbana, indoor)	
risultati qualitativi e quantitativi confrontabili con quelli osservabili in ambiente reale	
possibilità di effettuare valutazioni qualitative attraverso la visione diretta all'interno del modello o per mezzo di riprese fotografiche	
possibilità di compiere valutazioni soggettive di comfort visivo	
validi strumenti di verifica dei metodi di calcolo manuali e computerizzati	
In più, per cielo reale:	In più, per cielo reale:
corrispondenza con le situazioni reali	impossibilità di riferirsi a condizioni standard e quindi di confrontare soluzioni progettuali diverse
rapida ed economica valutazione delle prestazioni luminose di un edificio esistente	
In più, per cielo artificiale:	In più, per cielo artificiale:
possibilità di simulare il comportamento dinamico della luce naturale	possibili errori di scala
possibilità di riprodurre numerose condizioni di cielo (sereni, coperti, intermedi)	
possibilità di riferirsi a condizioni standard e confrontare soluzioni progettuali diverse	

Generalmente, i laboratori dotati di un cielo artificiale sono attrezzati con entrambi i seguenti sistemi di simulazione:

- **sole artificiale (heliodon):** struttura che movimentata il modello in scala per simulare il percorso apparente del sole, consentendo la simulazione della componente diretta della luce solare
- **simulatore di cielo (cielo artificiale):** struttura che riproduce la distribuzione di luminanza tipica della volta celeste, consentendo la simulazione della componente diffusa della luce solare.

Tali sistemi non vengono mai usati contemporaneamente, in quanto sono diversi gli ordini di grandezza con cui essi lavorano. È necessario comunque distinguere le tipologie di cielo artificiale, che variano a seconda delle diverse funzioni che svolgono:

- **cielo a specchi:** è stato uno dei primi a diffondersi con lo scopo di compiere misure quantitative del fattore di luce diurna; per questo motivo, tali cieli sono privi del sole artificiale. I cieli a specchio sono ambienti parallelepipedi con pareti verticali rivestite di specchi, mentre il soffitto è costituito da una superficie diffondente opalina, in modo da determinare una successione infinita di riflessioni di tali superfici. La volta celeste è riprodotta attraverso una serie di sorgenti artificiali (fluorescenti lineari, regolabili in intensità luminosa) collocate esternamente rispetto al soffitto (Fig. 6.1). La distribuzione di luminanza che ne deriva è tale da simulare in maniera fedele le condizioni di cielo coperto standard CIE.

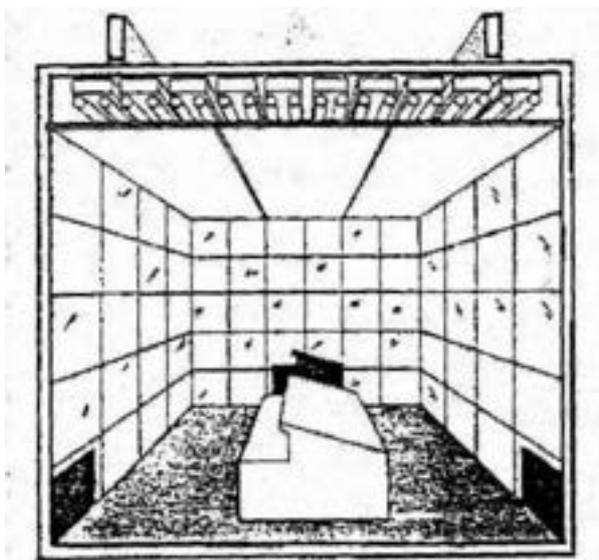


Figura 6.1. Esempio di cielo artificiale a specchi.

In Tab. 6.3 sono riportati i vantaggi e gli svantaggi associati all'impiego di un cielo artificiale a specchi.

Tabella 6.3. Caratterizzazione del cielo a specchi.

Vantaggi	Svantaggi
semplicità di costruzione	distribuzioni di luminanza riproducibili limitate al cielo coperto CIE
costo contenuto	no sole artificiale
errore minimo nella riproduzione dell'orizzonte	inter-riflessioni perturbate dalla presenza del modello

- **cieli a volta:** l'obiettivo è quello di poter dare valutazioni quantitative del fattore di luce diurna e valutazioni qualitative per lo studio di ombre, distribuzioni di luminanze e studio delle condizioni di abbagliamento. In questi cieli, la volta celeste è modellata attraverso superfici semisferiche illuminate per mezzo di sorgenti artificiali caratterizzate da un'intensità regolabile e dalla possibilità di essere

regolate individualmente o in gruppi per realizzare differenti distribuzioni di luminanza. Il modello viene collocato al centro della semisfera.

Le sorgenti artificiali possono essere collocate:

- Sul piano orizzontale, ad altezza inferiore rispetto al piano del modello: in questo caso si realizza una illuminazione indiretta, in quanto la luce naturale raggiunge il modello dopo essere stata riflessa dalla volta, costituita da una superficie opaca riflettente in maniera diffusa (Fig. 6.2)

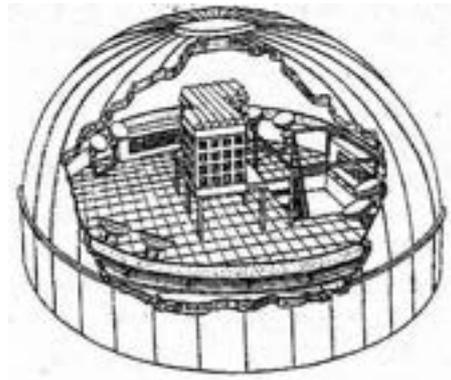


Figura 6.2. Cielo a volta con illuminazione indiretta.

- Esternamente alla superficie della volta, realizzata con materiale trasparente diffondente (Fig. 6.3);

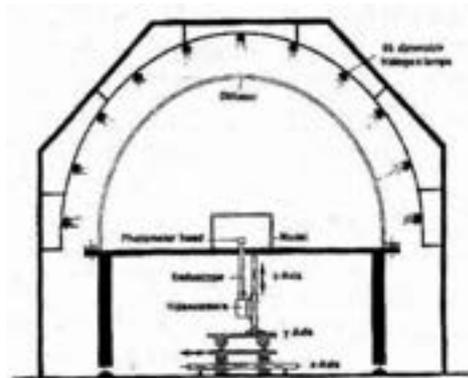


Figura 6.3. Cielo a volta con illuminazione dietro la volta.

- Sulla superficie semisferica della volta, per cui l'illuminazione che ne deriva è di tipo diretto; perché la luce che raggiunge il modello abbia caratteristiche simili alla luce naturale, le sorgenti devono essere previste in numero elevato e avere un'emissione a fascio largo.

In questi cieli è possibile prevedere l'installazione di un sole artificiale, libero di scorrere lungo un binario realizzato sulla superficie interna della volta: grazie a questo scorrimento, si può riprodurre la variazione dell'altezza solare, mentre il piano di supporto del modello, ruotando intorno al suo asse verticale, fornisce la variazione dell'angolo azimutale.

Questo tipo di cielo presenta un alto grado di complessità perché oltre ai costi elevati, possono esserci possibili errori di orizzonte, l'esigenza di una calibrazione lunga e difficoltosa e la necessità di inserire dei sistemi di ventilazione/condizionamento per disperdere il calore emesso dalle sorgenti. In Tab. 6.4 sono riportati i vantaggi e gli svantaggi associati all'impiego di un cielo artificiale a volta.

Tabella 6.4. Caratterizzazione del cielo a volta.

Vantaggi	Svantaggi
possibilità di riprodurre diverse condizioni di cieli standard	elevato grado di complessità
semplicità di accesso al modello	costo elevato
	possibili errori di orizzonte
	calibrazione lunga e difficoltosa
	elevata potenza richiesta
	manutenzione onerosa
	riflessioni parassite
	necessità di sistemi di ventilazione/condizionamento per disperdere il calore emesso dalle sorgenti

- **cieli a porzione di volta:** la volta celeste è creata sulla base del modello di Tregenza, per cui essa viene discretizzata per mezzo di figure geometriche (145 aree circolari) a luminanza uniforme (Fig. 6.4). In particolare, viene riprodotto un solo spicchio della volta celeste (1/6), costituito da 25 dischi luminosi dotati di sorgenti artificiali modulabili in intensità e controllabili individualmente per realizzare le aree a luminanza uniforme. Anche in questi cieli è possibile prevedere l'installazione di un sole artificiale.

In Tab. 6.5 sono riportati i vantaggi e gli svantaggi associati all'impiego di un cielo artificiale a porzione di volta.

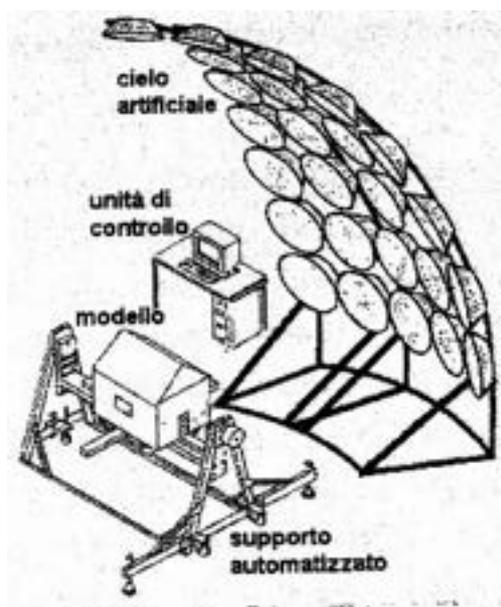


Figura 6.4. Cielo a porzione di volta.

Tabella 6.5. Caratterizzazione del cielo a porzione di volta.

Vantaggi	Svantaggi
riproduzione di distribuzioni di luminanza ricavate da misure sperimentali	possibili errori di orizzonte
possibilità di riprodurre diversi tipi di cieli	costo elevato
dimensioni contenute	calibrazione complessa
semplicità di accesso al modello	potenza richiesta
	manutenzione onerosa
	calibrazione lunga e complessa
	non corrispondenza tra illuminamenti reali e simulati nel caso di cieli sereni

Software di calcolo computerizzato

Ad oggi la maggior parte delle immagini preparate dai progettisti per anticipare la realtà è ottenuta adoperando i programmi commerciali di rendering "fotorealistico". Quest'ultimo termine non implica necessariamente che vi sia un collegamento con la fisica della luce: qualsiasi algoritmo di calcolo va bene a patto che le immagini finali raggiungano un certo livello di verosimiglianza.

Nella fattispecie la maggioranza dei softwares usati in ambito architettonico si basano su algoritmi di resa, che tengono conto soltanto dell'illuminazione diretta, trascurando le inter-riflessioni tra le superfici, e che rappresentano con caratteristiche impossibili le sorgenti luminose. Si può parlare invece di simulazione in ambito illuminotecnico solo se si usano algoritmi che riproducono la fisica del fenomeno luminoso: soltanto in questo caso le immagini finali ed i valori numerici ottenuti potranno essere utili per capire i risvolti delle scelte progettuali operate.

Gli algoritmi di calcolo operano delle approssimazioni che tengono conto soltanto di poche delle variabili che convivono effettivamente in ogni ambiente illuminato. Tali procedure si dedicano a simulare la riflessione della luce sugli oggetti, scopo raggiunto attraverso l'uso di algoritmi di primo ordine (nei quali si considera soltanto l'illuminazione diretta e la prima riflessione sulle superfici della luce proveniente dalle fonti luminose – modelli di illuminazione locale) o modelli che tengono conto delle riflessioni multiple che intercorrono tra le superfici (in grado di rendere anche effetti secondari non meno importanti per la percezione dell'ambiente – modelli di illuminazione globale); soltanto in questo caso ci sono i presupposti per simulare le reali condizioni o i potenziali effetti di un progetto.

L'illuminazione finale di un ambiente è determinata dall'interazione tra le superfici ed i fotoni emessi dalle sorgenti luminose; ma in ogni punto di una superficie i fotoni possono essere arrivati direttamente dalla sorgente luminosa (illuminazione diretta) o indirettamente attraverso uno o più "rimbalzi" sulle altre superfici (illuminazione indiretta): gli algoritmi di riflessione locale non sono in grado di rendere l'illuminazione indiretta e le riflessioni del secondo ordine, e solitamente cercano di far fronte a questa deficienza tramite l'uso della cosiddetta "luce ambiente", ovvero di un valore di illuminamento costante e definibile dall'utente che viene sommato su ogni superficie. Per questo motivo le immagini create da tali "motori di rendering" sono basate esclusivamente sull'illusione: la rappresentazione della luce, seppure soltanto quella diretta, è quasi sempre empirica.

I modelli di illuminazione globale sono capaci di rendere fenomeni come le riflessioni multiple e gli effetti di secondo ordine. Alcune superfici sono brillanti o patinate, e possiamo vedere in esse le riflessioni di altri oggetti e di altre superfici; altre bloccano la luce e proiettano ombre; altre ancora sono trasparenti e permettono all'osservatore di guardarvi attraverso: tutte queste possibilità, che poi sono reali condizioni che è normale sperimentare anche in ambienti aventi caratteristiche geometriche e materiche elementari, sono prese in considerazione e trattate all'interno di un modello di illuminazione globale, il quale molto spesso è implementato in modo da aderire a leggi fisiche e in alcuni casi riesce a gestire anche simulazione e controllo numerico.

I modelli di illuminazione globale possono essere implementati secondo due metodologie (o algoritmi di calcolo): quella di ray tracing e quella di radiosity.

- **Ray tracing**, che eccelle nella simulazione dei fenomeni di riflessione speculare, ed è in grado di fornire sia rendering di buon livello, sia valori numerici, ma in relazione a singole direzioni di osservazione (Fig. 6.5);

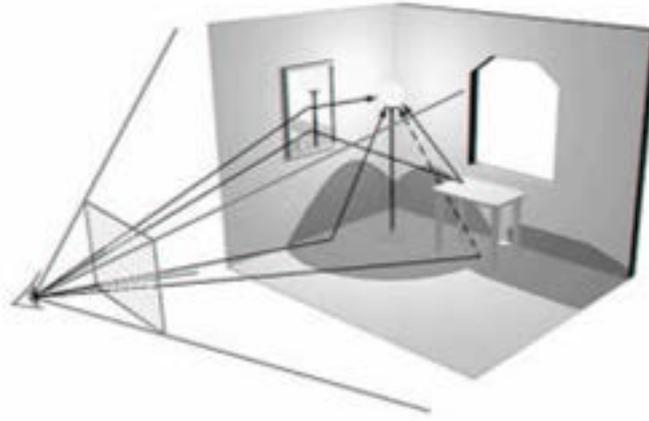


Figura 6.5. Schematizzazione della modellazione luminosa con ray-tracing.

Il ray tracing è una tecnica di calcolo globale che incorpora all'interno dello stesso schema computazionale aspetti di interazione tra luce e oggetti solitamente trattati, nei casi di modelli di riflessione locale, da differenti algoritmi studiati ad hoc. La maniera più efficace per implementare il ray tracing ricorsivo consiste nel tracciare il percorso dei raggi luminosi riflessi specularmente, trasmessi e rifratti all'interno di un ambiente. Si traccia un raggio da un punto di vista attraverso ogni pixel dello schermo in direzione della scena che si vuole rappresentare. Si tratta in particolare del backward ray tracing, in cui si considerano soltanto i fotoni che arrivano all'occhio dell'osservatore, piuttosto che tutti i fotoni che vagano nella scena da rappresentare. Una serie di raggi è tracciata a ritroso dalla posizione dell'occhio dell'osservatore attraverso il pixel del monitor, fino a quando non interseca una superficie descritta nel modello dell'ambiente considerato. Un raggio d'ombra è quindi arbitrariamente mandato verso le sorgenti luminose da questo punto di intersezione (nel complesso quindi i raggi vengono tracciati dal punto di vista fino alla sorgente). Le riflessioni multiple e la trasparenza sono considerati all'interno dello stesso algoritmo, tracciando sempre raggi a ritroso.

- Radiosity, che eccelle nella simulazione di fenomeni di inter-riflessione diffusa; permette di ottenere dati quantitativi precisi e una rappresentazione grafica media dell'ambiente complessivo, calcolando i livelli medi di energia luminosa presenti sulle diverse superfici (Fig. 6.6).

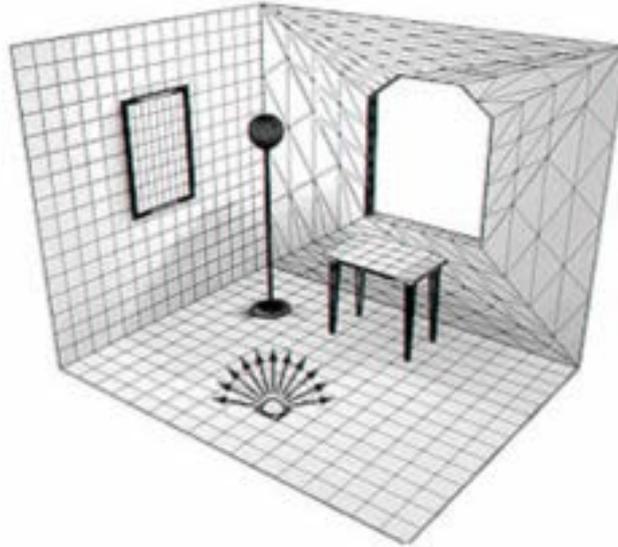


Figura 6.6. Schematizzazione della modellazione luminosa con radiosity.

Il metodo di calcolo usato dagli algoritmi di radiosity calcola le caratteristiche di illuminazione di punti discreti dell'ambiente, dopo aver suddiviso ogni superficie in una sottosuperficie (*mesh*) che accorpa poligoni più piccoli chiamati elementi (con proprietà fotometriche omogenee; ad es. il coefficiente di riflessione). Gli algoritmi di *radiosity* richiedono che tutte le superfici siano diffusori ideali che seguono la legge di Lambert, cioè che riflettano la luce ugualmente in ogni direzione. Quindi in questo modo non è possibile rendere la riflessione speculare (caratterizzata da una preponderante direzionalità). Ogni elemento riceve l'energia luminosa e ne restituisce un'aliquota all'ambiente sino a quando tutta l'energia riflessa non è stata totalmente assorbita. Calcolata la distribuzione luminosa nella scena, la si può esaminare in tempo reale: infatti la soluzione calcolata con l'algoritmo di radiosity è indipendente dal punto di osservazione.

La Tab. 6.6 mostra in modo sintetico i vantaggi e gli svantaggi associati all'uso di algoritmi di ray tracing nei software per la valutazione dell'ambiente luminoso.

Tabella 6.6. Algoritmi di ray tracing

Vantaggi	Svantaggi
calcolo dell'illuminazione diretta e delle ombre	necessità di effettuare il calcolo in funzione di un punto di vista
calcolo della riflessione speculare e della rifrazione attraverso materiali trasparenti	calcolo complesso e dispendioso in termini di tempo (soprattutto in funzione del numero di sorgenti luminose presenti)
corrispondenza con le dinamiche reali di propagazione e distribuzione della luce (migliore di quella intrinseca a qualunque algoritmo, incluso il radiosity)	
simulazione di textures non omogenee e punti di superficie	

La Tab. 6.7 mostra in modo sintetico i vantaggi e gli svantaggi associati all'uso di algoritmi di radiosity nei software per la valutazione dell'ambiente luminoso.

Tabella 6.7. Algoritmi di radiosity

Vantaggi	Svantaggi
calcolo accurato delle inter-riflessioni tra diffusori ideali	le riflessioni speculari non possono essere rese e quindi specchi ed altre superfici parzialmente speculari non possono essere rappresentati, così come fenomeni di rifrazione e trasparenza
indipendenza dal punto di osservazione, in modo da consentire la resa immediata di viste arbitrarie e di animazioni	la suddivisione in mesh ed elementi richiede l'allocazione di molta memoria rispetto a quella delle superfici di partenza
l'uso di sorgenti superficiali è parte integrante del modello di calcolo	gli algoritmi di suddivisione delle superfici spesso conducono ad un numero maggiore di artefatti nelle immagini finali rispetto a quanto non si possa avere con l'uso di <i>ray tracing</i>
possono essere visualizzati effetti come penombra e sfumature dettagliate all'interno delle ombre	
si possono osservare immediatamente dei risultati con un successivo miglioramento nell'accuratezza dell'immagine	

Se un modello di illuminazione globale è rafforzato da un motore di calcolo basato sulle leggi della fisica, esso è in grado di produrre immagini e dati numerici significativi che possono essere analizzati per valutare il progetto sotto i profili prestazionali legati alla luce.

Il principio di funzionamento dei programmi di calcolo computerizzato si basa fondamentalmente sulla conoscenza della distribuzione di luminanza della volta celeste, a partire dalla quale è possibile la valutazione di illuminamenti e luminanze all'interno degli ambienti.

Alcuni programmi si basano sul processo integrato di entrambi gli algoritmi precedentemente illustrati: ray-tracing sovrapposto ad un precedente calcolo di radiosity, per ottenere una totale completezza nei calcoli. In generale, si può comunque affermare che il grado di precisione è inversamente proporzionale ai tempi di calcolo.

Indipendentemente dagli algoritmi impiegati, nelle valutazioni di luce naturale si verificano errori a tutt'oggi rilevanti, a causa delle ipotesi ed approssimazioni su cui si basa la simulazione illuminotecnica. I risultati che si ottengono possono essere molto lontani rispetto alle situazioni effettive, i dati di illuminamento calcolati presentano delle discrepanze consistenti rispetto ai valori misurati sul campo. Inoltre, per alcuni materiali opachi la riflessione viene assunta dal software come perfettamente diffondente, mentre nella maggior parte dei casi essa è semidiffondente; le soluzioni tecnologiche recenti, poi, come i light shelf, i camini di luce, i materiali trasparenti innovativi, etc., non possono essere simulati perché ad oggi realtà troppo complesse. La maggior parte dei software, poi, assume l'ipotesi di comportamento perfettamente diffuso per le superfici dell'ambiente, per cui non risulta possibile modellare superfici speculari e/o semispeculari.

Il principale vantaggio relativo all'uso dei computer è la loro vasta capacità di calcolo, per cui si possono simulare le condizioni di illuminazione naturale a geometrie molto complesse; una volta realizzato il modello su cui effettuare le simulazioni, inoltre, si

possono cambiare i singoli parametri e confrontare soluzioni progettuali differenti, con evidenti vantaggi pratici per il progettista. Attraverso i software di calcolo illuminotecnico, si ottengono due tipi di risultati:

- uno qualitativo, fotorealistico, attraverso il rendering, che consente una visualizzazione realistica dell'oggetto;
- uno quantitativo, fotometrico, attraverso i calcoli che consentono la determinazione delle grandezze fotometriche (fondamentalmente luminanze ed illuminamento).

I programmi di calcolo specificamente orientati allo studio della luce naturale sono ancora pochi; la maggior parte dei software nascono infatti per lo studio della luce artificiale, più semplice da calcolare, vengono poi ampliati con moduli che consentono delle valutazioni di luce naturale, e per questo pochi sono in grado di tener conto degli effetti e dell'influenza della dinamica della luce naturale.

Nonostante tutti questi problemi, comunque, i software per il calcolo illuminotecnico della luce naturale forniscono uno strumento utile e semplificativo in sede progettuale, in quanto consente al progettista di verificare la validità delle soluzioni elaborate per la realizzazione dell'ambiente luminoso, e di apportare per tempo, prima che l'edificio venga costruito, eventuali correzioni rispetto al progetto iniziale. La Tab. 6.8 mostra in modo sintetico i vantaggi e gli svantaggi associati all'impiego di software per la valutazione dell'ambiente luminoso.

Esistono attualmente sul mercato diversi programmi di calcolo disponibili per la valutazione della luce naturale, sia in versione freeware, sia di tipo commerciale. Un software illuminotecnico per la luce naturale ideale si dovrebbe valutare in base alla precisione dei dati fotometrici che caratterizzano il modello (materiali, colori, fattori di riflessione, condizioni del cielo), alla qualità dei modelli fotorealistici che presentano (minimizzazione del mottling, delle perdite di luce, etc.). A fronte degli evidenti vantaggi introdotti dal loro utilizzo, risulta opportuno evidenziare gli errori che si possono riscontrare con questi software, che evidentemente variano da programma a programma, ma che possono essere caratterizzati come:

- **perdite di luce**, cioè presenza di luce in parti dell'ambiente o su superfici dove non dovrebbe essere presente; tale errore è dovuto a discontinuità nella riproduzione di superfici, soprattutto in corrispondenza di giunzioni o sovrapposizioni fra superfici;
- **parti non illuminate**, cioè zone dell'ambiente che rimangono buie, perché non incluse nel procedimento di distribuzione del flusso luminoso;
- **definizione delle ombre**, in questo caso gli errori possono riguardare l'intersezione tra le superfici o la discontinuità fra le diverse parti dell'ombra portata da uno stesso oggetto o fra l'ombra e l'oggetto/superficie che l'ha generata; entrambe le tipologie

di errore sono legate all'impiego di mesh poco fitte e dettagliate nel processo di radiosity;

- **mottling**, cioè discontinuità nella visualizzazione dell'ambiente luminoso, dovuto alla non continuità nella simulazione della volta celeste come sorgente luminosa;
- **saturazione**, cioè perdita della differenza relativa di luminosità attribuita alle diverse parti dell'ambiente in presenza di elevati livelli di illuminamento;
- **rappresentazione dei colori**, cioè errori introdotti nella coerenza tra il colore impostato dall'utente, quello visualizzato nel rendering, e il corrispondente valore di luminanza attribuito nel calcolo delle superfici.

Tabella 6.8. Metodi di calcolo computazionali

Vantaggi	Svantaggi
valutazioni approssimate in breve tempo	difficile conversione di dati numerici in immagini
gestione di calcoli e modelli complessi con PC (basse potenze di calcolo e costi)	complessità di utilizzo
simulazioni di luce naturale e artificiale	risultati diversi in funzione degli algoritmi usati
valutazione di un elevato numero di parametri	errori sensibili rispetto a valori sperimentali
differenti livelli di precisione ed approfondimento	ipotesi semplificative nei modelli matematici (comportamento lambertiano)
no problemi di scala	lunghi tempi di implementazione
facilità di confronto tra soluzioni progettuali diverse	difficile modellazione di materiali innovativi e schermi
	difficile modellazione dei cieli reali
	condizioni di cielo simulabili limitate
	lunghi tempi di apprendimento: specialisti
	costi elevati
	difficile conversione di dati numerici in immagini
	complessità di utilizzo
	risultati diversi in funzione degli algoritmi usati

Di seguito, si propone un elenco, non esaustivo, di alcuni di questi software. Tra questi Radiance è quello più accreditato presso la comunità scientifica internazionale.

Radiance

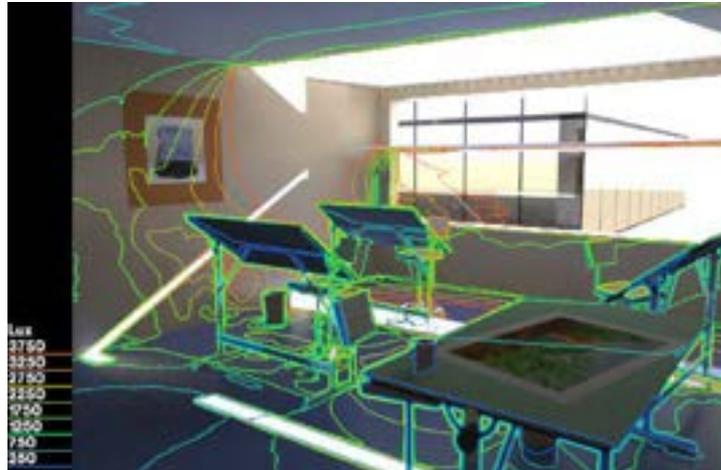
Software disponibile gratuitamente, molto utilizzato, ha la possibilità di essere integrato ad altri software o di essere utilizzato indipendentemente.

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

Piuttosto che fornire semplicemente un motore di rendering fotorealistico, Radiance incorpora una serie di strumenti in grado di ottenere risultati numerici, in modo da mettere in grado il ricercatore o il progettista di misurare, simulare e progettare reali configurazioni di illuminazione(Fig. 6.7).

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

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



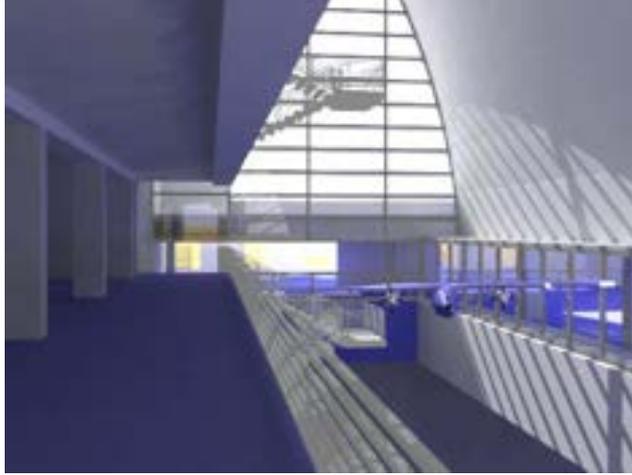


Figura 6.7. Esempio di simulazione e rendering ottenibili con Radiance.

Adeline

Software a pagamento, utilizza una versione di windows per Radiance.

Lightscape

Software disponibile a pagamento, dedicato esclusivamente al calcolo illuminotecnico. Esegue la valutazione puntuale della componente diretta e riflessa della luce sia naturale che artificiale su qualsiasi superficie reale o immaginaria; dà inoltre la possibilità di inserire modelli architettonici con forme differenti.

Lightscape è uno strumento di ultima generazione di visualizzazione e illuminazione che produce ambienti e immagini realistici generati dal computer attraverso una precisa simulazione della luce e del comportamento dei materiali. E' la prima applicazione ad integrare le tecniche di radiosity e ray tracing con un'illuminazione basata sulle leggi della fisica.

I progettisti usano lightscape per simulare progetti sotto specifiche condizioni di materiali e di illuminazione.

E' un sofisticato prodotto commerciale che mira al fotorealismo con una esplicita attitudine per l'architettura: la tecnica adottata fa seguire al calcolo radiosity quello in ray tracing: il calcolo del primo reso accettabile da una tecnica di affinamento progressivo, quello del secondo alleggerito dal calcolo delle ombre portate (Fig. 6.8).

Una volta preparato il modello con l'assegnazione dei materiali specifici e delle luci, il software inizia a calcolare l'illuminazione diffusa diretta ed indiretta del modello usando il processo di **radiosity**. In seguito si possono estrarre i risultati (definiti con questa prima soluzione di radiosity) renderizzandoli solo col radiosity (e quindi tenendo conto solo della luce diffusa) oppure facendo seguire a questo il processo di ray tracing (aggiungendo così

le riflessioni speculari, ombre più rifinite e effetti di luce migliorati). Per i risultati quantitativi viene considerato solo il processo di radiosity.

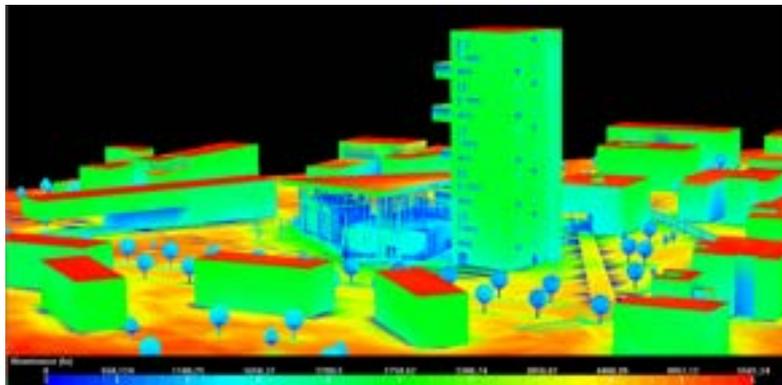
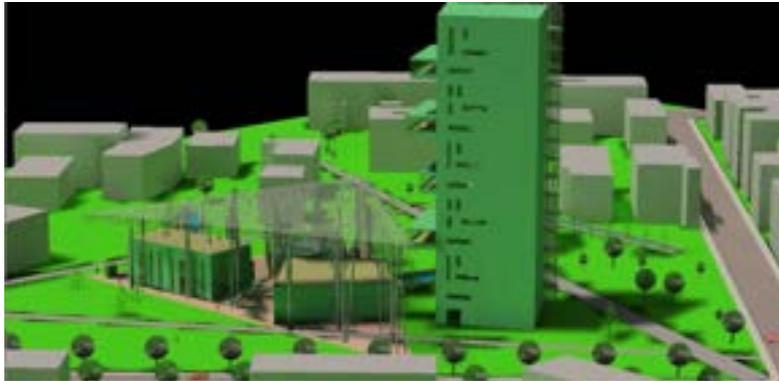


Figura 6.8. Esempio di simulazione e rendering ottenibili con Lightscape.

Microstation

Software a pagamento, prodotto dalla casa americana Bentley. È un CAD per lavorazioni tecniche e modellazioni grafiche, con il vantaggio che fornisce anche calcoli illuminotecnici molto definiti, con la possibilità di creare un'animazione della dinamica solare (Fig. 6.9).





Figura 6.9. Esempio di rendering ottenibili con Microstation.

Radoray

Software a pagamento, è integrato a 3D Studio Max per poter effettuare i calcoli in **radiosity** e rendering foto realistici (Fig. 6.10).



Figura 6.10. Esempio di rendering ottenibili con Radoray.

Genelux

Software gratuito, funziona attraverso il web. L'utente carica sul sito il file del progetto da analizzare e successivamente scarica i risultati dei calcoli, che vengono eseguiti sul server.

Relux

Software gratuito, è in grado di calcolare oltre che l'illuminazione naturale e artificiale, anche quella integrata naturale e artificiale. Per sfruttare questa potenzialità, è necessario inserire il progetto in un luogo "reale", inserendo le coordinate della latitudine e la longitudine del sito di progettazione, e l'indicazione dell'orientamento Nord. Dopo aver definito questi parametri geometrici, per effettuare il calcolo occorre definire anche la data completa per il calcolo (giorno ed ora) e il tipo di cielo normalizzato CIE.

Nel software sono possibili solo due condizioni di cielo, entrambe normalizzate CIE, la condizione di cielo sereno e la condizione di cielo coperto. E' inoltre necessario definire il grado di precisione dei calcoli da effettuare, secondo diverse tipologie di calcolo: solo percentuale diretta, indiretta bassa, indiretta media.

Relux Professional è uno strumento di modellazione base e di rendering usato principalmente nel settore di progettazione della luce. I rendering che seguono le leggi della fisica, si basano su dati fotometrici e sono sviluppati tramite un processo di **radiosity**. L'aggiunta di un plug-in chiamato Vision al programma, che si basa sul software Radiance, calcola simulazioni di luce realistiche permettendo di inserire un grande numero di materiali con caratteristiche migliori; l'utilizzo anche del **ray tracing** in questo caso permette la rappresentazione di specchi e materiali trasparenti.

Relux Professional stesso comunque già offre delle facilitazioni per le proprietà di riflessione spettrale delle superfici e l'assegnazione di materiali per elementi riflettenti e trasparenti. I calcoli forniscono sia simulazioni realistiche che diagrammi di illuminamento (Fig. 6.11).



Figura 6.11. Esempio di rendering ottenibili con Relux Professional (in alto) e con l'aggiunta del plug-in Vision al programma (in basso).

Verifica dell'attendibilità delle simulazioni

Per testare le principali differenze tra i programmi e le loro caratteristiche peculiari, sono state fatte delle simulazioni con i programmi Radiance, Lightscape e Relux per due differenti tipi di ambiente assegnando alla rappresentazione numerica dei risultati nei vari programmi la stessa scala di valori in modo tale da poter confrontare i risultati. Si sono analizzati un ambiente tipo e un ambiente reale, nella fattispecie un ufficio (per il quale è stato possibile mettere a confronto tra loro oltre i risultati delle simulazioni dei vari programmi, anche quelli delle misurazioni effettuate in ambiente).

Ambiente tipo (Fig. 6.12)

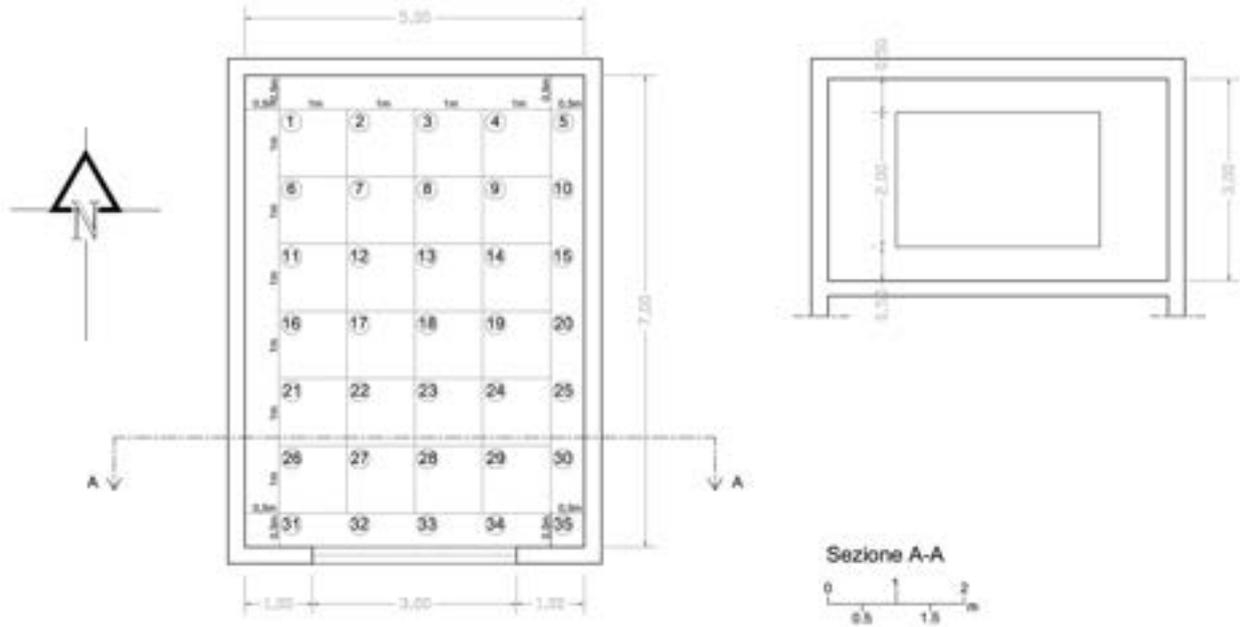


Figura 6.12. Pianta e sezione

Simulazione dell'ambiente tipo: 21 Dicembre ore 14 cielo sereno

Simulazioni con Radiance (Fig. 6.13 e 6.14)

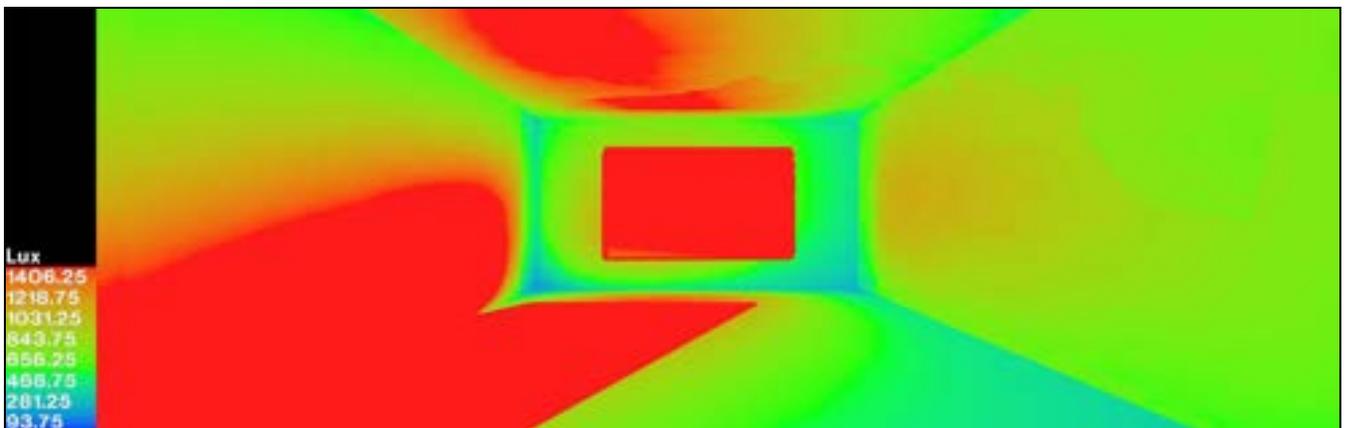


Figura 6.13. Illuminamento

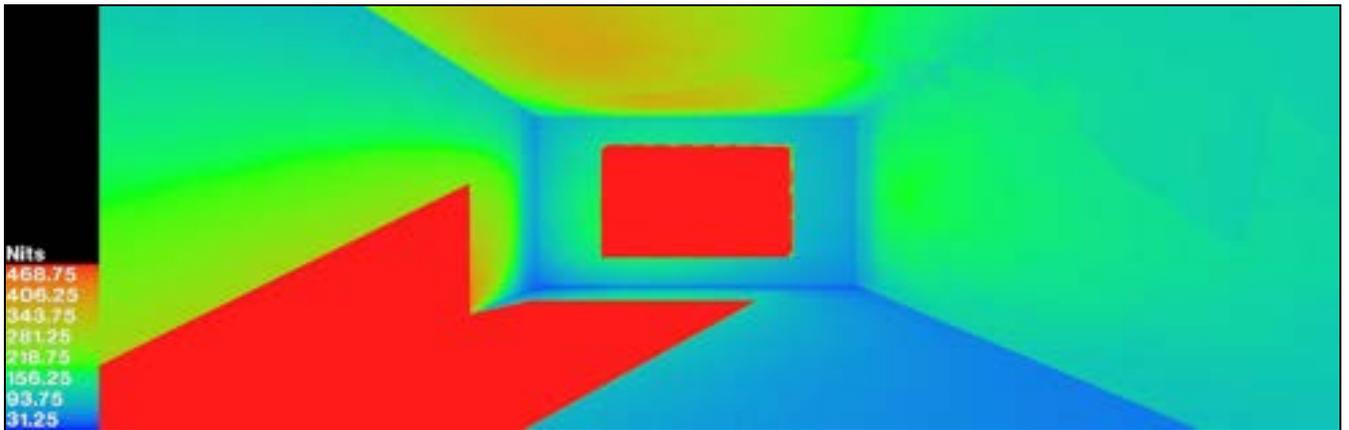


Figura 6.14. Luminanza

Simulazioni con Lightscape (Fig. 6.15 e 6.16)

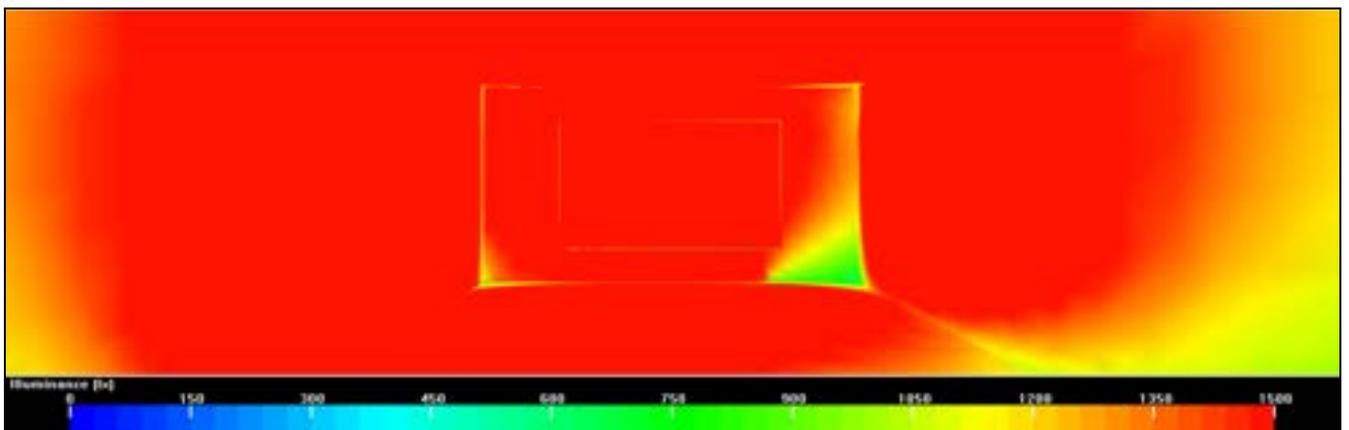


Figura 6.15. Illuminamento

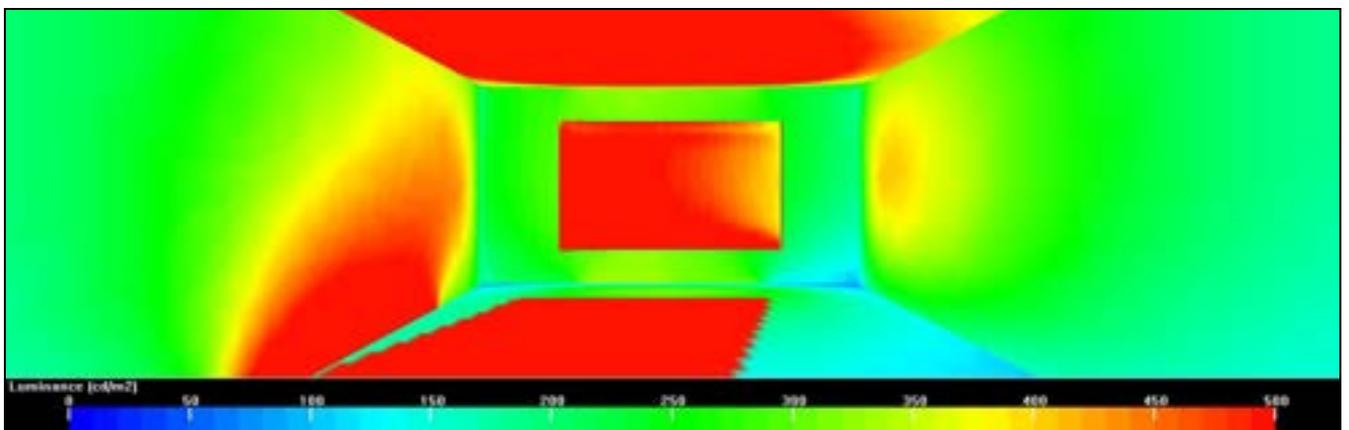


Figura 6.16. Luminanza

Simulazioni con Relux (Fig. 6.17 -19)

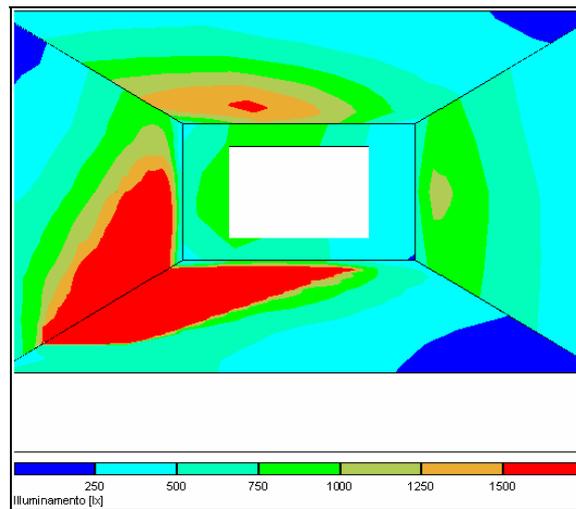


Figura 6.17. Illuminamento

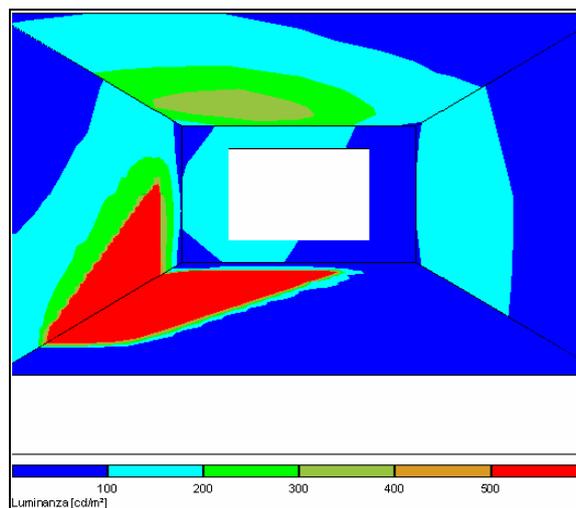


Figura 6.18. Luminanza

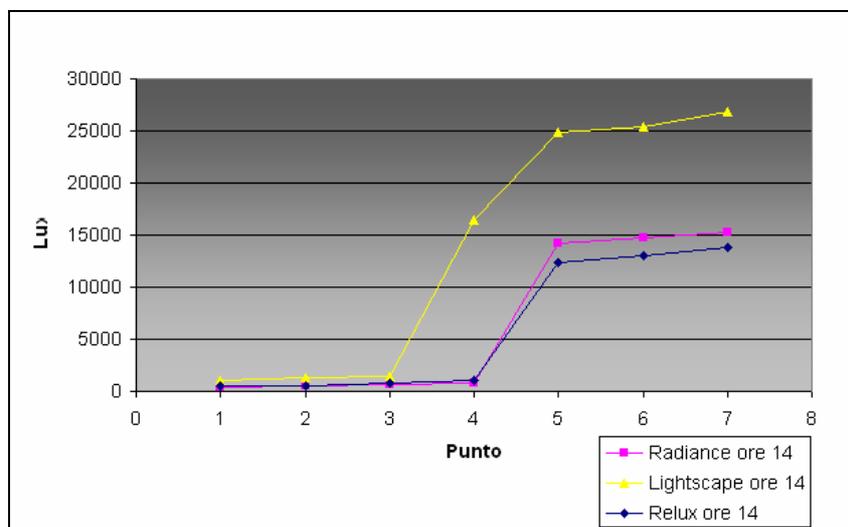


Figura 6.19. Confronto tra le simulazioni dell'ambiente tipo nei vari software per condizioni di cielo sereno (punti: 3, 8, 13, 18, 23, 28, 33 ovvero lungo la linea di mezzeria della finestra)

Simulazione dell'ambiente tipo: 21 Dicembre ore 14 cielo coperto

Simulazioni con Radiance (Fig. 6.20 e 6.21)

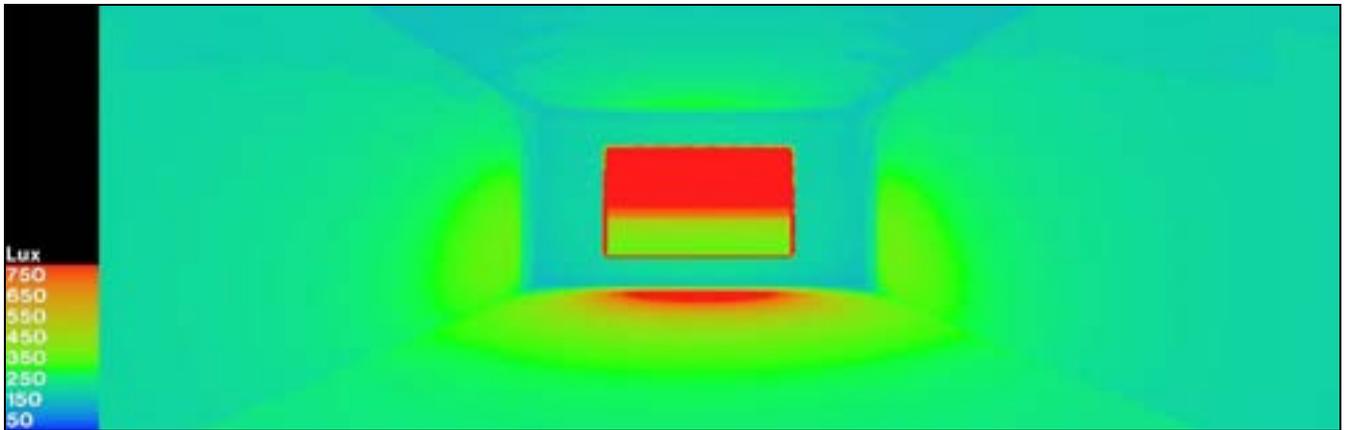


Figura 6.20. Illuminamento

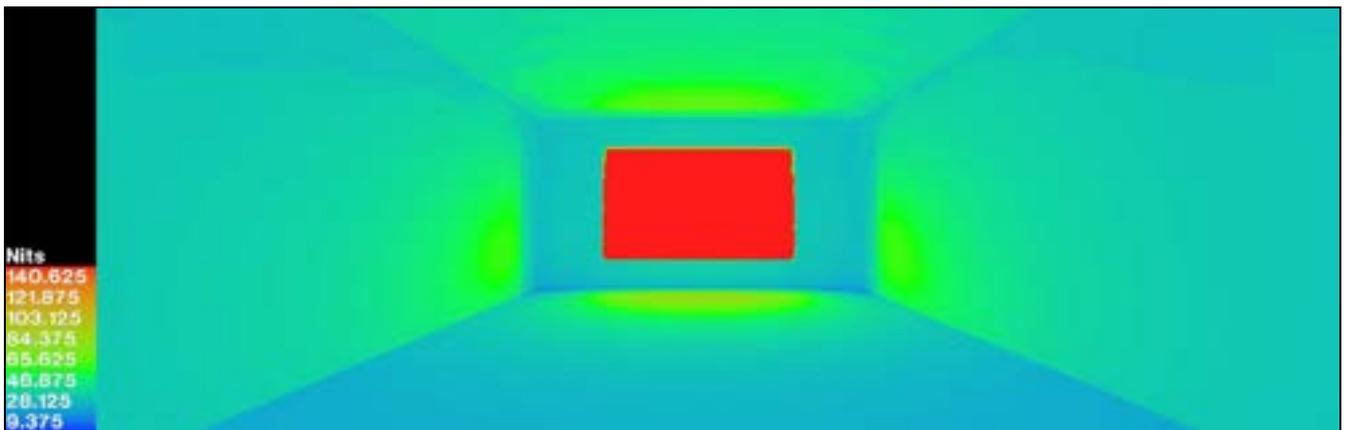


Figura 6.21. Luminanza

Simulazioni con Lightscape (Fig. 6.22 e 6.23)

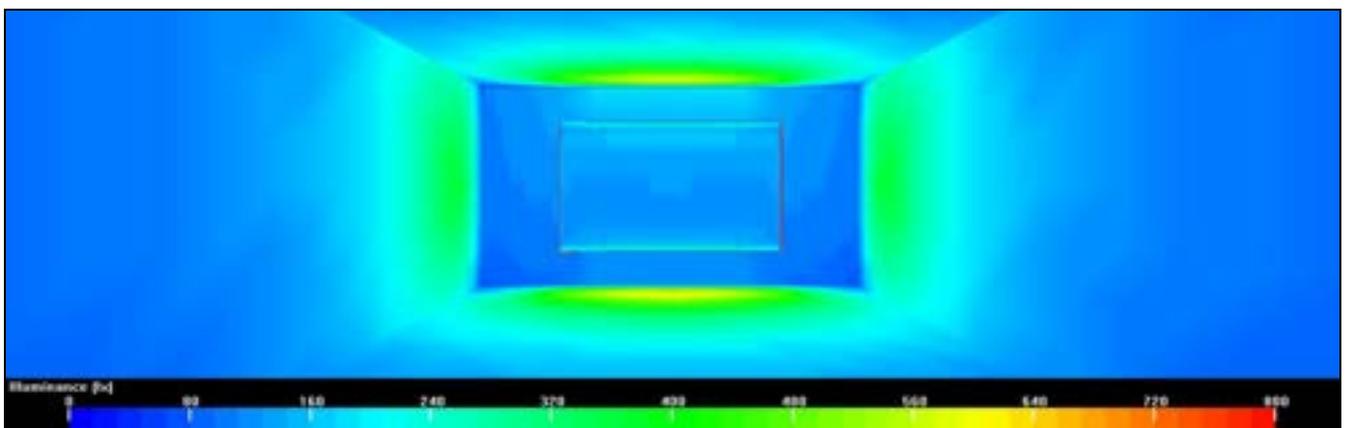


Figura 6.22. Illuminamento

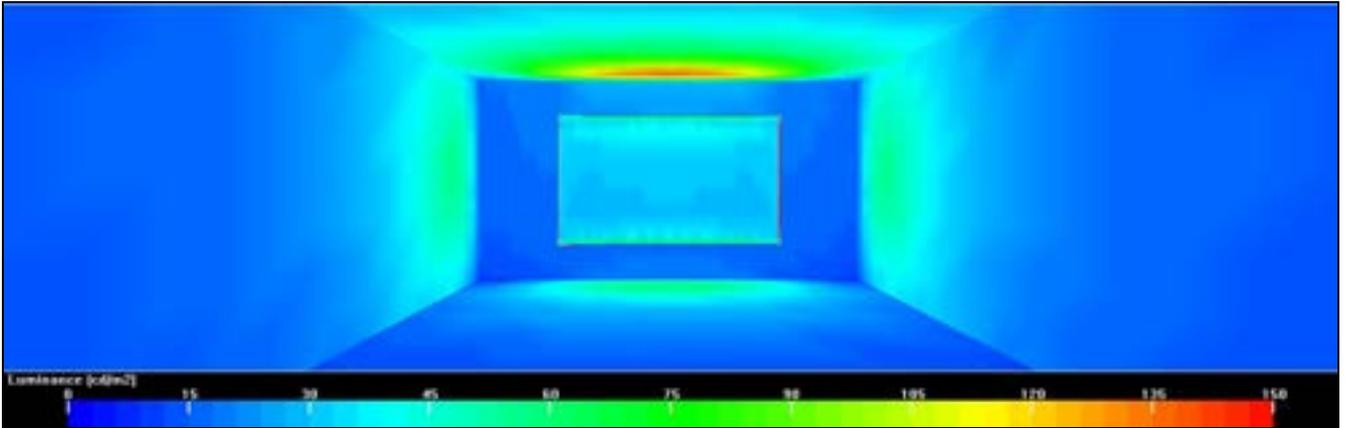


Figura 6.23. Luminanza

Simulazioni con Relux (Fig. 6.24 -26)

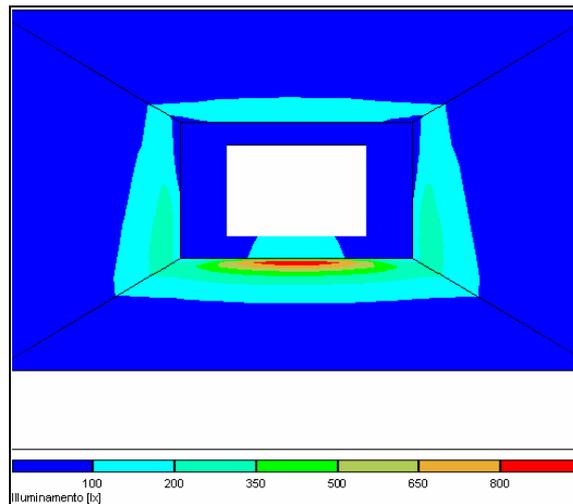


Figura 6.24. Illuminamento

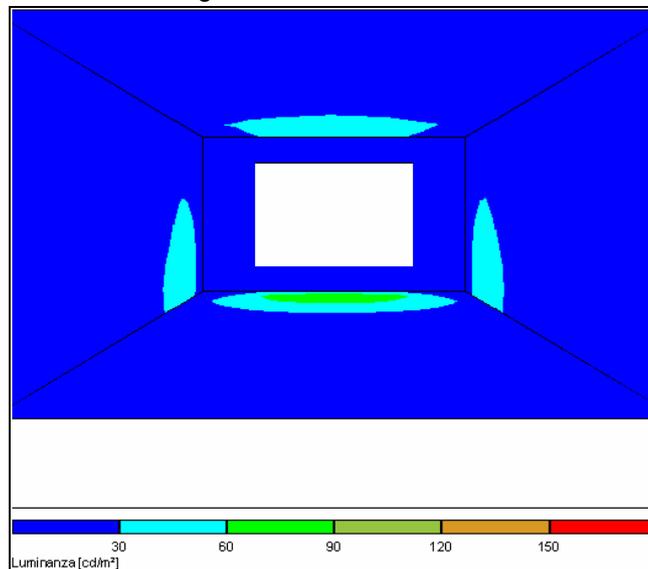


Figura 6.25. Luminanza

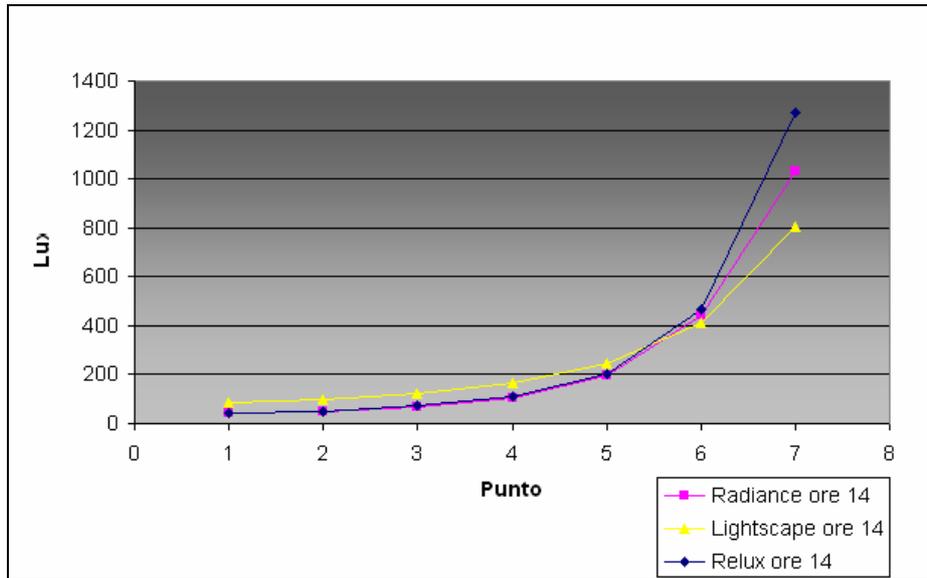


Figura 6.26. Confronto tra le simulazioni dell'ambiente tipo nei vari software per condizioni di cielo coperto (punti: 3, 8, 13, 18, 23, 28, 33 ovvero lungo la linea di mezzera della finestra)

Ambiente reale: ufficio (Fig 6.27)

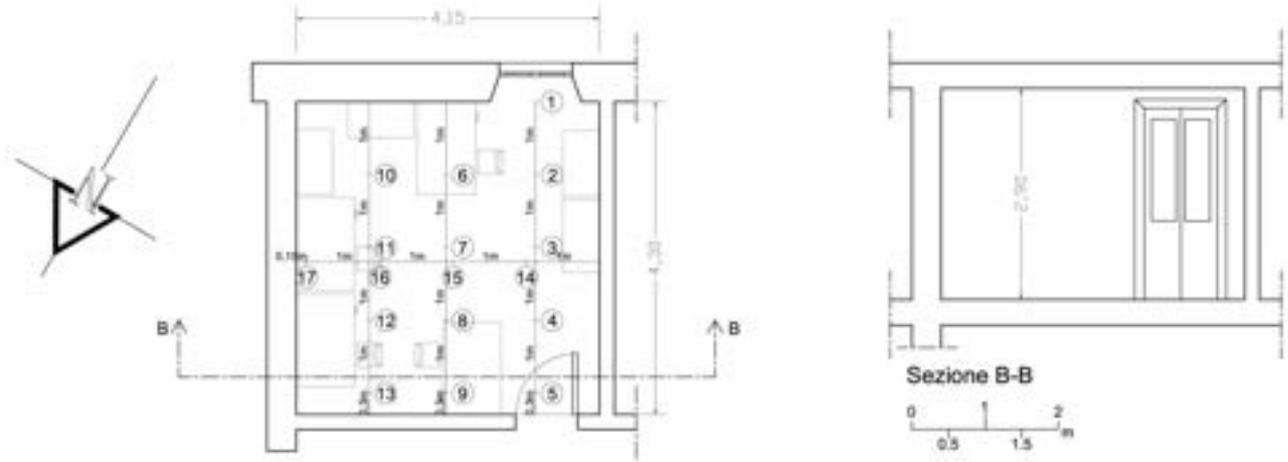


Figura 6.27. Pianta e sezione

Simulazione dell'ambiente reale: **21 Dicembre ore 16 cielo sereno**

Simulazioni con Radiance (Fig. 6.28 e 6.29)

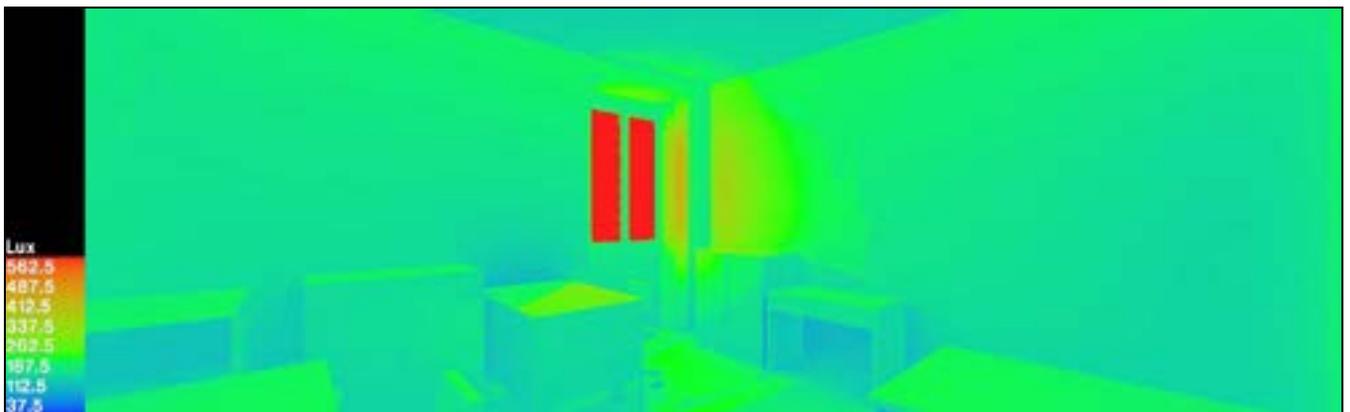


Figura 6.28. Illuminamento

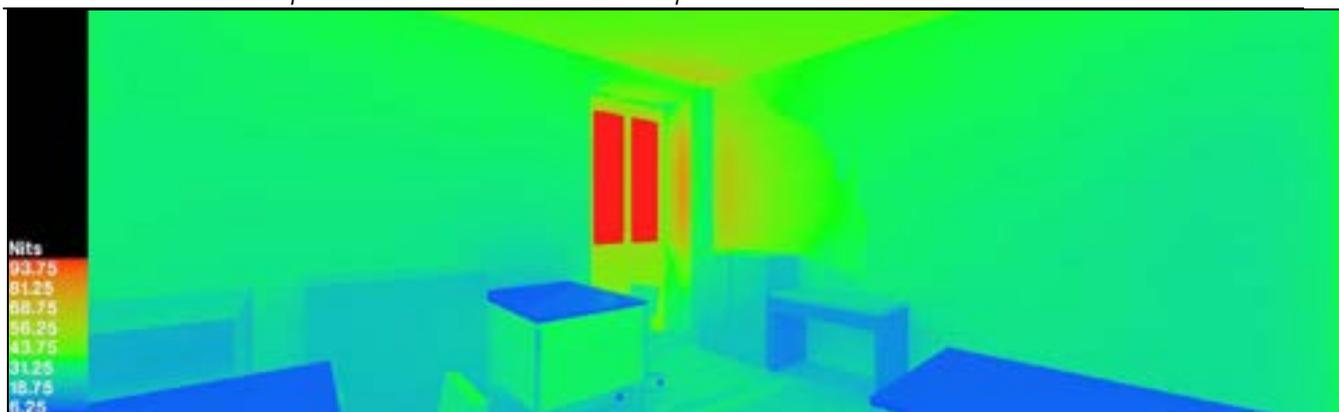


Figura 6.29. Luminanza

Simulazioni con Lightscape (Fig. 6.30 e6.31)



Figura 6.30. Illuminamento

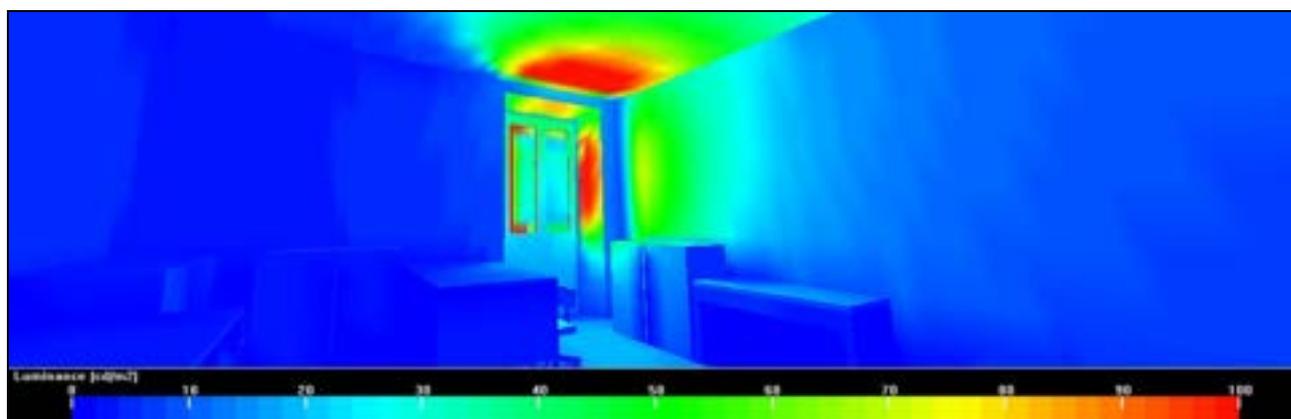


Figura 6.31. Luminanza

Simulazioni con Relux (Fig. 6.32-34)

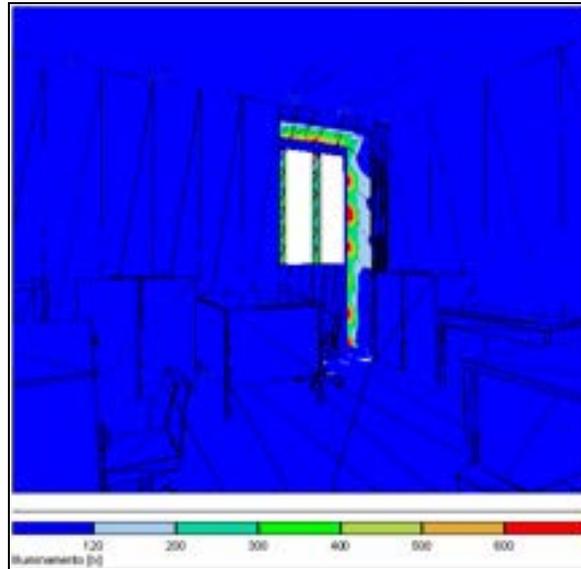


Figura 6.32. Illuminamento

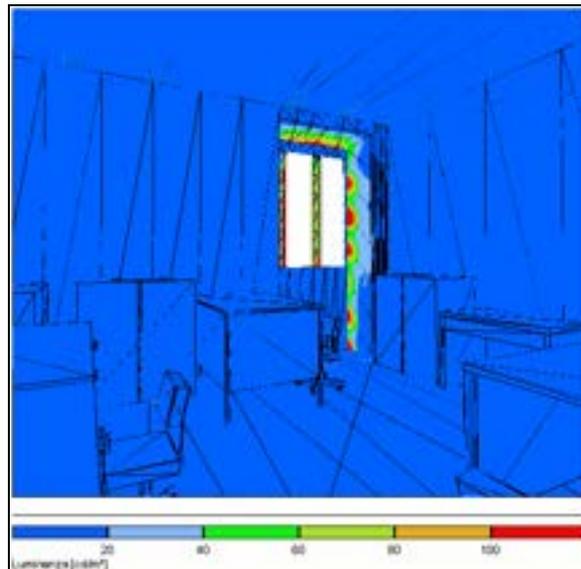


Figura 6.33. Luminanza

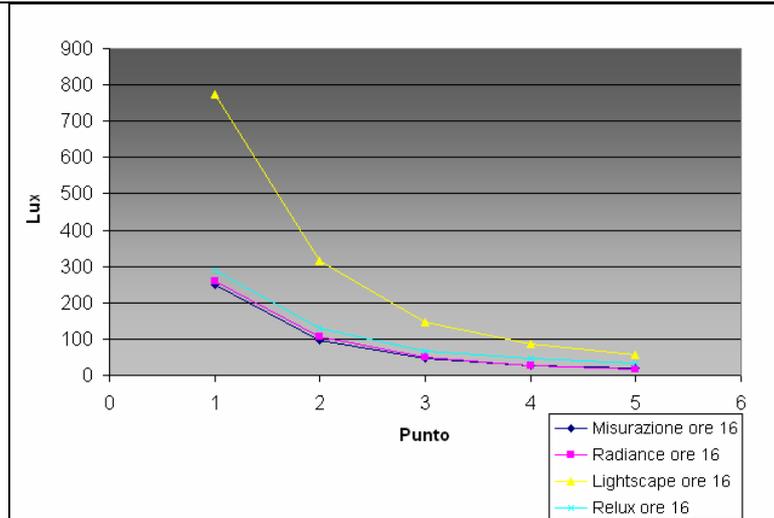


Figura 6.34. Confronto tra le simulazioni dell'ambiente reale nei vari software e le misurazioni effettuate per condizioni di cielo sereno (per i punti: 1-5 ovvero lungo la linea di mezzera della finestra)

Conclusioni

Ad un primo confronto tra le simulazioni e i risultati numerici ottenuti con i vari software effettuati sull'ambiente tipo creato al computer, si nota una somiglianza di risultati tra Radiance e Relux per le due condizioni di cielo simulate. Le simulazioni fatte per l'ambiente reale dell'ufficio, che vedono sempre una discrepanza di risultati del software Lightscape rispetto agli altri, avvalorano allo stesso tempo la tesi della maggiore attendibilità di risultati di Radiance (che pur avendo valori simili a quelli ottenuti con Relux, mostra risultati numerici più vicini a quelli delle misurazioni effettuate nell'ambiente reale e quindi più accurati).