Università di Bologna - Facoltà di Ingegneria
Corso di Disegno dell'Architettura II
Anno Accademico 2010 - 2011

Rappresentazione tridimensionale di modelli digitali per l'architettura

di Simone Garagnani
simone.garagnani@unibo.it

In questo contributo verranno esaminate le diverse metodologie utilizzate per modellare in tre dimensioni l'organismo di architettura, sino ad arrivare ad una corretta visualizzazione delle forme nello spazio, mediante l'ausilio degli strumenti informatici. Il modello ottenuto e il suo trattamento successivo permetteranno la stesura di tavole contenenti viste assonometriche o prospettiche più o meno realistiche per l'illustrazione delle proporzioni tra i volumi e dei materiali impiegati. Verranno inoltre presentate soluzioni alle più comuni criticità che possono presentarsi a chi approccia per la prima volta la tematica. Sono state inserite a tal proposito numerose immagini a corredo del testo, frutto dell'attività didattica svolta dagli allievi durante il Laboratorio Progettuale di Disegno dell'Architettura II.

Simone Garagnani *si è laureato a pieni voti in Ingegneria Edile presso l'Università di Bologna, dove ha frequentato la Scuola di Dottorato presso Il D.A.P.T. Dipartimento di Architettura e Pianificazione Territoriale, sviluppando una ricerca Ph.D. intitolata: "Modelli Digitali e Archivi di Progetto - Sistemi integrati di documentazione per l'architettura".*
Presso la Facoltà di Ingegneria ha incarichi di tutorato e docenza nei corsi di Disegno dell'Architettura I e II, Rilievo dell'Architettura, Modellazione virtuale per l'Architettura ed Informatica Grafica. Al momento è titolare di un contratto di assegno di ricerca post-dottorato presso il D.A.P.T. Esercita parallelamente l'attività di libera professione come ingegnere progettista, collaborando con vari studi di Ingegneria ed Architettura ed occupandosi di tecniche per il disegno assistito e la modellazione tridimensionale.

"Ma sopra tutte le invenzioni stupende, qual eminenza di mente fu quella di colui che s'immaginò di trovar modo di comunicare i suoi più reconditi pensieri a qualsivoglia persona, benchè distante per lunghissimo intervallo di luogo e di tempo?" [1]

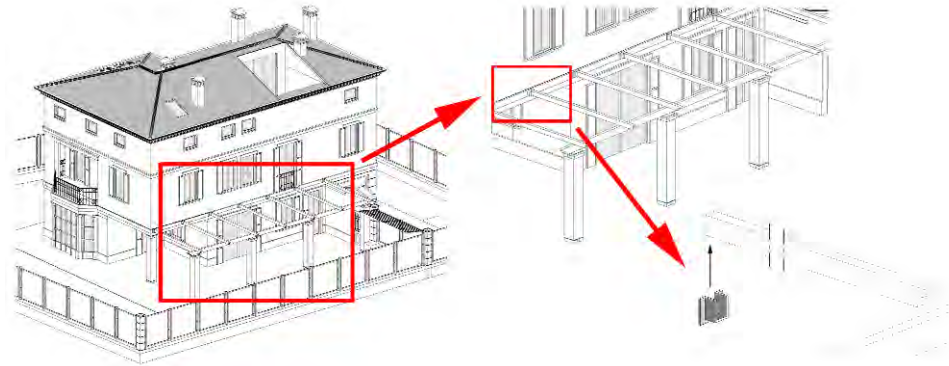
Galileo Galilei

COMUNICARE IN TRE DIMENSIONI

L'efficacia della comunicazione del progetto è un obiettivo rilevante da perseguire, ancor più da quando la tecnologia digitale si è affiancata alle tradizionali tecniche di *racconto grafico* dell'architettura con strumenti potenti e versatili; infatti si riscontra una presenza oramai dominante dell'immagine nel mondo dei media, con la finalità di prefigurare il comportamento e la percezione delle forme tridimensionali della realtà[2].

Quando si approccia la computer grafica dal punto di vista storicistico, si può rilevare che fin dalla metà degli anni '70 lo sviluppo tecnologico della percezione dello spazio, soprattutto in architettura, è stato motivato dalla ricerca del realismo, in altre parole dallo sforzo di concepire tecniche che rendessero le immagini di sintesi quasi indistinguibili dalla fotografia o dalle riprese televisive e cinematografiche. Solo successivamente si sono concentrati studi e risorse anche verso altre tecniche informatizzate di presentazione più descrittive e meno fotorealistiche, al fine di rendere apprezzabili con immediatezza anche informazioni qualitative e quantitative di dati che non fossero solo geometrici, in settori scientifici quali ad esempio la medicina, le scienze ambientali, l'ingegneria e l'urbanistica territoriale. Dunque, la generazione di un modello di progetto tridimensionale riveste una grande importanza nel flusso creativo in architettura, e può oggi contare su tecniche consolidate di visualizzazione digitale, sia per curare la geometria delle forme che per valutarne analiticamente vizi e difformità non facilmente rilevabili dalle canoniche proiezioni ortogonali.

E' quindi auspicabile una soluzione di continuità dai tradizionali metodi di

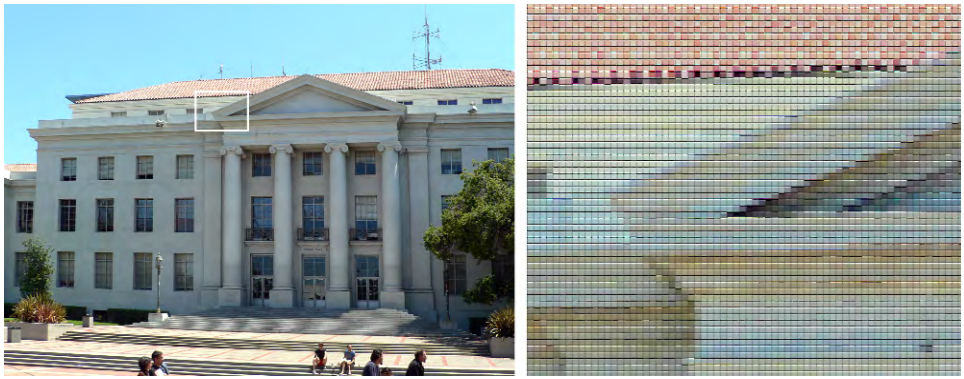


progettazione, funzionanti attraverso piante ed alzati, per abbracciare una concezione tridimensionale già dallo schizzo ideativo, seguendo una logica oggi proposta da svariati programmi CAD? Certamente "*pensare in tre dimensioni*" è una condizione imprescindibile per il progettista, ed in questo intento un calcolatore può fornire un valido compendio, tuttavia occorre rammentare che per comprendere e organizzare lo spazio, la Geometria Descrittiva mongiana è ancora di fondamentale impiego e rilevanza. Ciò poiché la *vera forma* di piani e superfici non deve essere una concezione astratta nel processo figurativo del progettista, bensì un punto di partenza per andare oltre ed esplorare i vasti orizzonti della geometria vettoriale, "*dal momento che essa svolge ancora, e sempre, la essenziale funzione di esercitare la mente a leggere, a immaginare, a modellare lo spazio*"[3]

Nell'immagine in alto, una sintesi del concetto di modellazione per componenti: il modello è letteralmente "costruito" mediante l'assemblaggio dei vari "pezzi" che lo compongono nella realtà esecutiva. Tale approccio permette una verifica costante della fattibilità reale dell'intervento.
Inoltre un modello tridimensionale che contenga l'informazione di tutte le componenti può essere utilizzato per conoscere le quantità di materiale da utilizzare e le modalità di messa in opera, caratteristiche di indubbia importanza per il progettista architettonico.

I CONCETTI DI BASE.

Nell'introdurre procedure e metodi per realizzare un elaborato formalmente corretto, occorre comprendere in prima istanza cosa si intenda esattamente con il termine di modello. Esso è fondamentalmente un archivio tridimensionale di informazioni, dove ogni singolo componente viene disegnato (*modellato*) in relazione al proprio funzionamento, alle proprie caratteristiche morfologiche e alla complessità con la quale si rapporta agli altri elementi dell'insieme. In buona sostanza, un modello di architettura può essere paragonato alla costruzione virtuale del fabbricato che rappresenta, dove il livello di dettaglio fino al quale giungere è

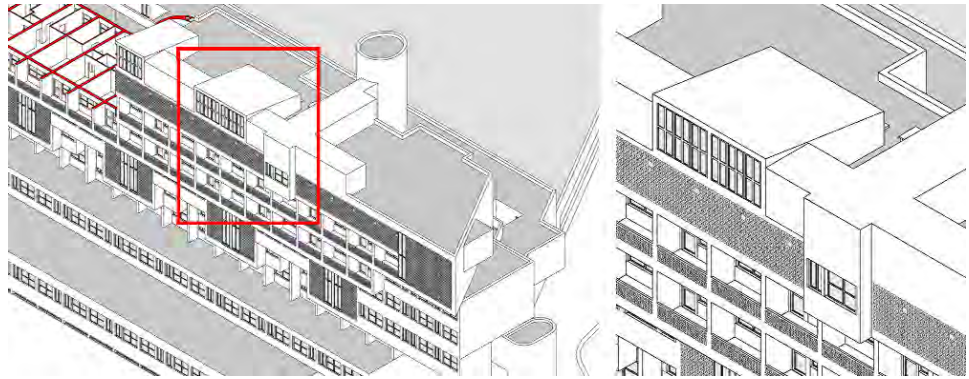


dichiarato solamente dalla finalità comunicativa del modello stesso. Senza infatti soffermarsi troppo su trattazioni estranee a questo contesto, si tenga presente che è sempre opportuno non dedicare ad una modellazione geometrica un tempo eccessivamente superiore a quanto strettamente necessario. Realizzare un lavoro molto dettagliato per una visualizzazione magari ad alta scala genera infatti un aumento dei tempi di calcolo per le procedure successive di visualizzazione prospettica. In altre parole, se un edificio deve essere rappresentato in una scena da un'angolazione molto ampia e da un punto di vista distante, non è necessario che sia ricco di dettagli o composto da superfici complesse. Normalmente si possono creare le finiture aggiungendo semplicemente delle trame o delle tessiture fotografiche, vale a dire delle immagini *raster* che opportunamente disposte sulle superfici del modello contribuiscono a creare effetti grafici descrittivi di materiali o di componenti troppo piccoli per essere modellati.

Al contrario un fabbricato rappresentato in primo piano e a distanza ravvicinata dovrebbe essere il più possibile ricco di particolari, per trasmettere la suggestione di completezza e verosimiglianza se richiesta nella comunicazione che il progettista vuole offrire. Con l'esperienza ci si abituerà a realizzare con anticipo il livello di precisione e rifinitura al quale giungere per le finalità desiderate.

Conoscere, almeno in parte, la terminologia e la metodologia generale che sta alla base della *computer graphics* può aiutare a comprendere meglio il funzionamento di programmi, anche complessi, di disegno assi-

Nella figura in alto, un esempio classico di "pixelizzazione". L'immagine, ottenuta mediante certi valori di risoluzione (pixel per pollice), se ingrandita non "tiene" la visualizzazione e i punti colorati sgranano producendo il tipico effetto di scalettatura. Ecco dunque che aumentando i valori di risoluzione, è possibile aumentare la definizione quindi le possibilità di ingrandimento di un'immagine bitmap. Purtroppo però un incremento di risoluzione software (ottenuto cioè con un programma informatico) non è identicamente uguale ad un'alta risoluzione già impostata in fase di realizzazione dell'immagine stessa. Ne deriva che laddove possibile (immagini fotografiche, rendering, ecc...) è sempre consigliabile tenere alti i valori di risoluzione.



stito. È importante iniziare con una distinzione fondamentale, vale a dire la differenza esistente tra quelle che vengono definite *immagini raster* e i disegni in *grafica vettoriale*. Le prime sono sostanzialmente mappe di pixel, ovverosia immagini visualizzate in stampa o a schermo mediante la disposizione di punti colorati (*PICture ELements o pixels*) come se questi fossero tessere di un più vasto mosaico che è l'immagine stessa. I disegni vettoriali invece sono generati in modo completamente differente, mediante algoritmi matematici e trasformazioni geometriche; invece di definire il colore di ogni singolo pixel che compone l'insieme, nel caso di un disegno vettoriale vengono usate coordinate e formule matematiche per esplicitare aree, volumi e forme.

Tutti i più comuni programmi CAD (*Computer Aided Design*), come AutoCAD, Archicad o Revit, operano in formato vettoriale, memorizzando i risultati della modellazione all'interno di file contenenti coordinate ed equazioni di punti nello spazio. Perché utilizzare dunque due sistemi così diversi per la rappresentazione del disegno di architettura? Sostanzialmente per un fattore di scala. Infatti nelle immagini raster il numero di pixel per pollice nelle direzioni orizzontali e verticali definisce la *risoluzione*, ovvero la nitidezza del dettaglio[4]. Poiché questo valore si basa su una griglia di dimensioni fisse, alterando la scala delle immagini raster si perde in termini di qualità, in quanto a maggiore ingrandimento di una bitmap corrisponde direttamente un maggiore ingrandimento dei pixel, fino a produrre l'effetto di *pixelizzazione*. Ne deriva che per stampare o visualizzare un'immagine di grandi dimensioni, occorre un file

Nell'immagine in alto, a differenza di un formato bitmap o raster, si può evidenziare come un disegno vettoriale non perda di qualità in seguito ad ingrandimento; il tratto degli spigoli è rappresentato da vettori caratterizzati da una terna di numeri reali (x,y,z) ad indicarne gli estremi nello spazio. Di conseguenza incrementare la scala di visualizzazione ha il significato matematico di restringere il dominio geometrico di visualizzazione, che conterrà i medesimi punti e consentirà al calcolatore di tracciare i segmenti che li congiungono senza ingrandimento di pixel, bensì solamente con incremento del loro numero tra gli estremi. Un immagine vettoriale è disgiunta dal concetto di risoluzione.

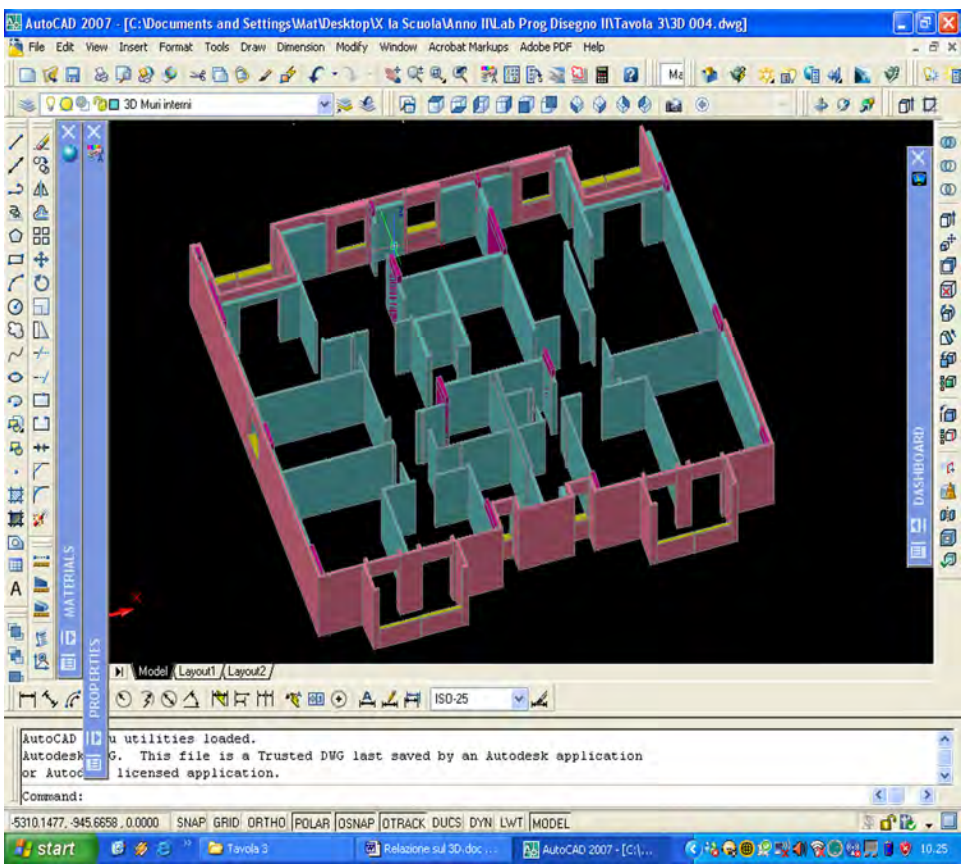
raster di alta risoluzione, cioè comprensivo di molti pixel per pollice. Tali file sono estremamente pesanti in termini di occupazione di memoria del calcolatore, ma adeguati per ottenere stampe fotografiche ben definite su supporto cartaceo.
Un archivio di dati vettoriali invece non necessità di risoluzione nel tracciamento, essendo il calcolatore a "riempire di pixel" le linee interposte tra i vertici noti, aumentandone o diminuendone il numero a seconda del fattore di ingrandimento imposto dall'operatore. Il concetto appena esposto di apparente antinomia tra raster e vettore diverrà un elemento di enorme rilevanza più oltre, quando si tratterà del *rendering*.
Di rilievo è anche la comprensione del *principio di gerarchia* per un archivio vettoriale. Le informazioni organizzate in un modello sono strutturate con un linguaggio ben preciso che integra la geometria, le indicazioni grafiche sui materiali e la reciproca collocazione spaziale degli oggetti a formare la *scena*. Quest'ultima si qualifica come quel dominio spaziale in tre dimensioni contenente gli oggetti da rappresentare, le eventuali fonti luminose che con essi interagiscono, le informazioni sul punto di vista, sovente indicato con l'icona di una fotocamera in grado di chiarire all'operatore con immediatezza da quale angolo si visualizzerà la scena e dove si troveranno ombre e spigoli nascosti.
Tuttavia, le gerarchie all'interno di un file digitale nascondono potenzialità estremamente più efficaci; si pensi alla canonica suddivisione in layer dei più tradizionali software CAD, all'interno dei quali stratificazioni differenti in uno stesso disegno indicano elementi con caratteristiche diverse[5].
Infatti introdurre specifiche gerarchie stratificate è molto vantaggioso, particolarmente all'aumentare del livello di complessità del modello, quando il calcolatore per quanto potente e veloce potrebbe presentare rallentamenti prestazionali dovuti al grande numero di punti da gestire. In tal caso, visualizzare i layer interessati dalla modellazione ed operare solamente su quelli è la strategia più adeguata. Software di disegno assistito come AutoCAD infatti, presentano una caratteristica che è stata migliorata, soprattutto nelle ultime versioni del programma: i layer sono più agevolmente gestibili tra le varie finestre di visualizzazione e possono essere, come già da tempo avviene, "congelati", ovverosia ne può venire

impedita la rigenerazione durante le fasi di tracciamento.
Ciò implica un minor carico di lavoro per il processore del computer con il risultato di una più agile manipolazione del modello a video e di una più efficace rigenerazione degli spigoli.

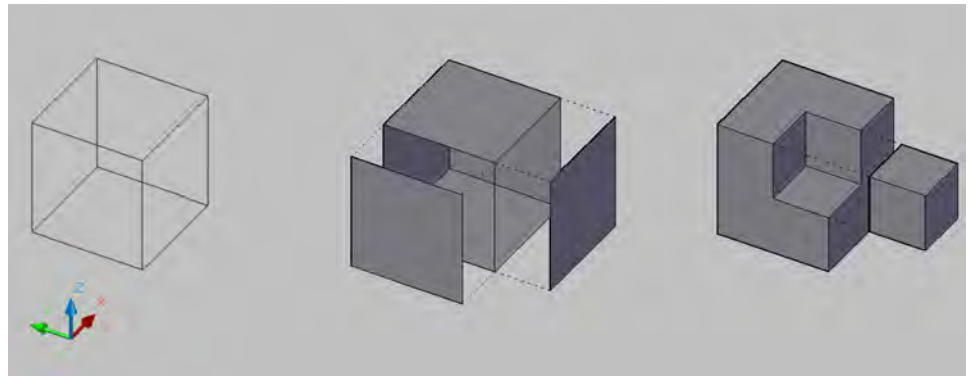
LA MODELLAZIONE

Tra gli svariati settori di utilizzo degli strumenti digitali in architettura, la modellazione tridimensionale assistita è interpretata come quel processo teso a tradurre l'informazione di progetto in un modello grafico, modificabile e riproducibile, in grado di *poter realizzare, oltre che una descrizione dello spazio "oggettivo", quella dello spazio "percettivo", inteso come la sua definizione relazionale data con il rapporto con gli altri spazi*[6]. Abbandonando la planarità dei disegni in proiezione ortogonale, l'informazione geometrica della coordinata di profondità può essere trasmessa in vari modi. A seconda di come è strutturato il modello, per rispondere a questa necessità si distinguono diversi metodi di modellazione.
Quello più comune è costituito dalla modellazione poligonale, dove la geometria degli oggetti è approssimata da una rete o una griglia di facce poligonali piane. Con questo metodo è possibile rappresentare con un'accuratezza prescelta pressoché qualsiasi tipo di forma geometrica, tuttavia maggiore è il numero delle faccette, maggiore è il numero dei vertici che le descrivono e ciò causa un incremento dell'informazione contenuta con conseguente accrescimento delle dimensioni del file.
Similmente a quanto già espresso per la risoluzione di un'immagine raster, è possibile agire sul numero di tali poligoni aumentandolo o diminuendolo a seconda della necessità di approssimazione richiesta. E' possibile immaginare un oggetto modellato con poligoni come se questo fosse generato da un sottile foglio di carta, sagomato in tutte le sfaccettature create dagli spigoli. Un modello poligonale risulta pertanto vuoto al proprio interno.
Un ulteriore avanzamento della tecnologia di rappresentazione digitale legato a questo tipo di superfici vuote all'interno, è espresso dalle *superfici bicubiche parametriche*,dove le singole faccette che prima erano poligoni appartenenti ciascuno al proprio piano, sono adesso perimetrate da

segmenti curvilinei, descritti nel dominio spaziale da equazioni matematiche in grado di approssimarne più accuratamente la forma. Tali superfici vengono definite con il nome di *NURBS (Non Uniform Rational B-Splines)* e per il loro grado di accuratezza, nonché per la relativamente semplice riproducibilità all'interno dei file, sono in certa misura più leggere rispetto alle equivalenti più approssimative poligonali. Queste superfici sono utilizzate nella modellazione di precisione come nel caso del design industriale o nella rappresentazione di geometrie estremamente complesse che capita di incontrare studiando l'architettura moderna.
Esistono anche altri tipi di modellazione più raffinati, in grado di approssimare la geometria dello spazio con un crescente grado di precisione: è il caso ad esempio delle tecniche di *suddivisione spaziale*, ma si termi-



Nell'immagine a sinistra, la struttura di un modello tridimensionale. Il piano tipo rappresentato, esplicita una prima gerarchia dei componenti: le pareti esterne appartengono infatti ad un layer diverso dalle tramezzature interne. Lo stesso dicasi per i bancali in prossimità delle aperture nelle pareti, distinti per layer e caratteristiche dai paramenti esterni del livello.



neràquesta rassegna citando la tecnica forse più congeniale alla modellazione tridimensionale di organismi di architettura: si tratta della rappresentazione CSG (*Constructive Solid Geometry*)[7]. Questa altro non è che una definizione esatta delle geometrie contenute all'interno di rigidi e ben precisi limiti. Molti oggetti infatti possono essere rappresentati dalla combinazione di forme elementari, o *primitive geometriche*, che rapportandosi tra di loro generano forme più complesse. Ad esempio l'apertura di un vano destinato ad ospitare una porta in una parete può essere pensato come una sottrazione dello spazio che sarà occupato dalla porta, rimosso dal volume della parete. Questa logica di sottrazione, analogamente all'addizione o all'intersezione tra primitive solide tridimensionali, viene definita come una operazione di *algebra Booleana*, dal nome del matematico britannico George Boole che per primo ne teorizzò le peculiarità. Un elemento modellato con metodiche CSG risulta essere "pieno", a differenza dei modelli a superfici visti in precedenza, e pertanto gode di caratteristiche intrinseche di matericità, contenendo il proprio volume[8].

Occorre chiarire che il concetto di addizione e sottrazione di volumi da primitive solide, è una sorta di montaggio del pezzo che deve essere rappresentato: pertanto è il progettista che disegnando ad esempio un parallelepipedo al quale verrà sottratto un secondo parallelepipedo, attribuirà a quell'oggetto la valenza di parete con un foro destinato ad una finestra. Sono stati scritti invece dei programmi definiti "*verticali*", mirati cioè alla specifica progettazione architettonica tridimensionale, dove gli oggetti sono *parametrizzati* in primitive specifiche secondo le quali si compone l'in-

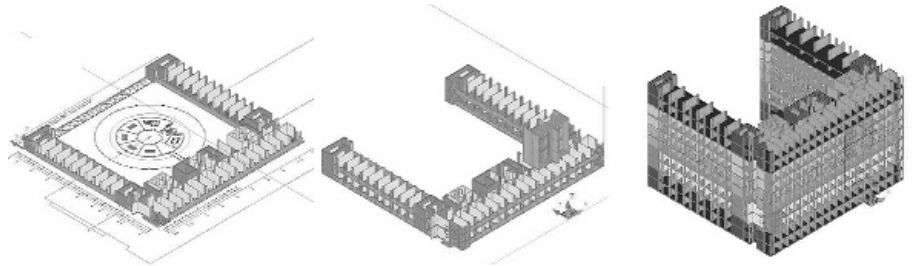
Nell'immagine in alto, un semplice parallelo tra un modello wireframe (da sinistra), uno poligonale ed uno CSG. Il primo è rappresentato solamente dai segmenti che ne definiscono gli spigoli, il secondo vede lo spazio che occupa come delimitato da facce poligonali ed è cavo all'interno; il terzo, solido, contiene informazione anche della natura materiale che lo caratterizza, e per il quale un software come ad esempio AutoCAD può eseguire operazioni di algebra booleana.

sieme: le pareti sono recuperate da un archivio interno di pareti già composte, le finestre (anch'esse catalogate) possono essere interattivamente posizionate su queste pareti e così di seguito. L'associazione elemento concettuale ed oggetto tracciato dunque viene predefinito dalla libreria del software. Questi modelli però non hanno nella maggioranza dei casi caratteristiche note di massa CSG.

Il problema più rilevante nella manipolazione di oggetti solidi, ottenuti per estrusione e rivoluzione che siano, è l'aumentare del "peso" del file al crescere del dettaglio rappresentato. Per limitare quanto più possibile questo

Nell'immagine a lato, un esempio di composizione dei "pezzi" modellati singolarmente a partire da una vista di pianta, sino ad arrivare al completo edificio. Il volume occupato dal piano interrato (in basso) è stato sottratto booleanamente dal blocco di terreno e rifinito poi con l'estrusione delle pareti divisorie dei vari locali.

Si noti che per ottenere una rappresentazione di questo tipo, essendo pareti e dettagli solidi, è possibile letteralmente tagliare secondo piani anche diversi il modello completo, per visualizzare con maggior chiarezza espositiva l'interno.

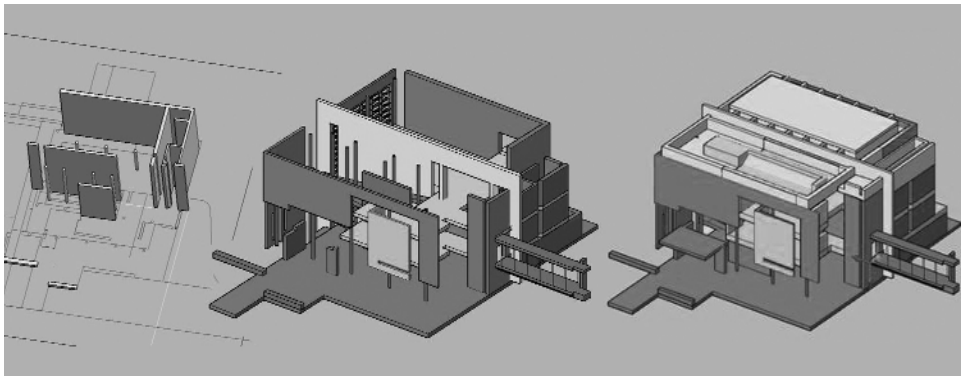


disagio, si consiglia di utilizzare appieno la potenzialità dei layer del modellatore in uso, attivando solamente quelli necessari alle operazioni da svolgere nel preciso momento in cui queste devono essere effettuate.

LA VISUALIZZAZIONE AL TRATTO

Assemblato un modello tridimensionale in tutti i suoi componenti, si pone la problematica di come utilizzarlo al meglio per valorizzarne visivamente i contenuti, inserendoli in una tavola di presentazione formalmente corretta; si può utilizzare il calcolatore con profitto mirando all'ottenimento di disegni tradizionali, con tecniche di rappresentazione al "*tratto*", oppure effettuando un *rendering* dove la tecnica classica della prospettiva può essere abbinata all'applicazione di retini solidi o pattern più complessi (*texture*), di utilizzo usuale nel disegno automatico[9]. Quello che si può ricavare è un insieme di entità grafiche vettoriali "piatte", più maneggevoli ma soprattutto più modificabili, pronte per essere rifinite con i comandi tradizionali 2D ed in più con il beneficio di poter ospitare blocchi di dettagli bidimensionali che altrimenti sarebbe stato difficoltoso modellare in precedenza, come ad esempio gli alberi per i contesti paesaggistici o le sagome antropomorfe per evidenziare rapporti metrici od ergonomici del costruito. Tecnicamente questo processo può partire dalla stampa su periferiche virtuali, atte a generare file contenenti le viste appiattite impostate in camera. E' necessario però prestare attenzione a tutti i dettagli che vengono inseriti dopo la generazione della vista ed al corretto orientamento di retini regolari (vale a dire la corrispondenza prospettica ad esempio delle fughe di pavimentazioni finite con

In alto, gestione di un modello complesso. Quando la modellazione di un edificio, anche se composto di elementi modulari ripetibili, diviene ricca di dettaglio e conseguentemente di informazione che il calcolatore deve gestire, può risultare opportuno lavorare un livello per volta. Ultimato un piano infatti, è possibile racchiudere tutti gli elementi in "blocchi", che verranno assemblati tra loro nella fase di ultimazione. Un blocco infatti raggruppa oggetti senza una vera e propria operazione di unione booleana, quindi risulta più leggero in termini di occupazione di memoria. Inoltre una volta che sia stato correttamente posizionato, può sempre essere "esploso" per ritornare ad una modalità dove sia consentito l'apporto di modifiche.



piastrelle, filari di mattoni lungo le pareti, ecc.); è da curare poi la corrispondenza del punto di vista con sagome e profili, l'omogeneità degli spessori del tratto utilizzati per rappresentare i diversi componenti, la continuità delle linee di spigolo ottenute, ecc.

Spigoli nascosti, superfici ombreggiate da tinte uniformi e contorni vettoriali in vista sono quello che i teorici definiscono come NPR (*Non-Photorealistic Render*), tecnica di rappresentazione che vede i suoi fondamenti nella visualizzazione di oggetti tracciati e presentati come *scketches*, schizzi o disegni al tratto. Si tratta in buona sostanza di una simulazione delle geometrie di architettura alla "*vecchia maniera*", mediante viste planimetriche o prospettiche di scorci trattati come se fossero stati disegnati a riga e squadra, oppure esasperando la digitalizzazione come bozzetti stesi a mano libera e poi rifiniti con la simulazione di tecniche classiche quali le campiture a pantone o ad acquerello. Per ottenere questi effetti però, si parte sempre da modelli digitali tridimensionali.

In estrema sintesi, per visualizzare al meglio e valorizzare gli aspetti contenuti nel modello tridimensionale in un disegno al tratto, occorre prestare particolare attenzione a:

- *punto di vista*, mai troppo basso se in assonometria, mai troppo lontano se in prospettiva,
- *spessore dei tratti*, commisurato alla "densità" della stampa e proporzionale alla scala di visualizzazione del modello,
- *livello di modellazione adeguato alla vista proposta*: è inutile modellare oggetti e componenti che risulteranno poi nascosti o

In alto, modellazione stratificata di un edificio. Partendo da canoniche viste di pianta o prospetto, si modellano i componenti attraverso l'estrusione dei profili. Una metodologia corretta è quella di partire dall'interno, con la generazione delle pareti divisorie, e via via chiudere il modello con i paramenti dell'involucro esterno. In tal modo si può evitare di dover di volta in volta accendere e spegnere livelli diversi per poter vedere letteralmente dove eseguire le operazioni di modellazione, e si è garantiti riguardo la completezza delle partizioni. Si rammenti che è sempre opportuno modellare solo quello che realmente è necessario, pertanto ci si occuperà degli interni nel caso si si deciso in precedenza di ricavare sezioni dove essi si debbano rappresentare o viste fotorealistiche per visualizzare magari materiali di finitura degli ambienti creati.

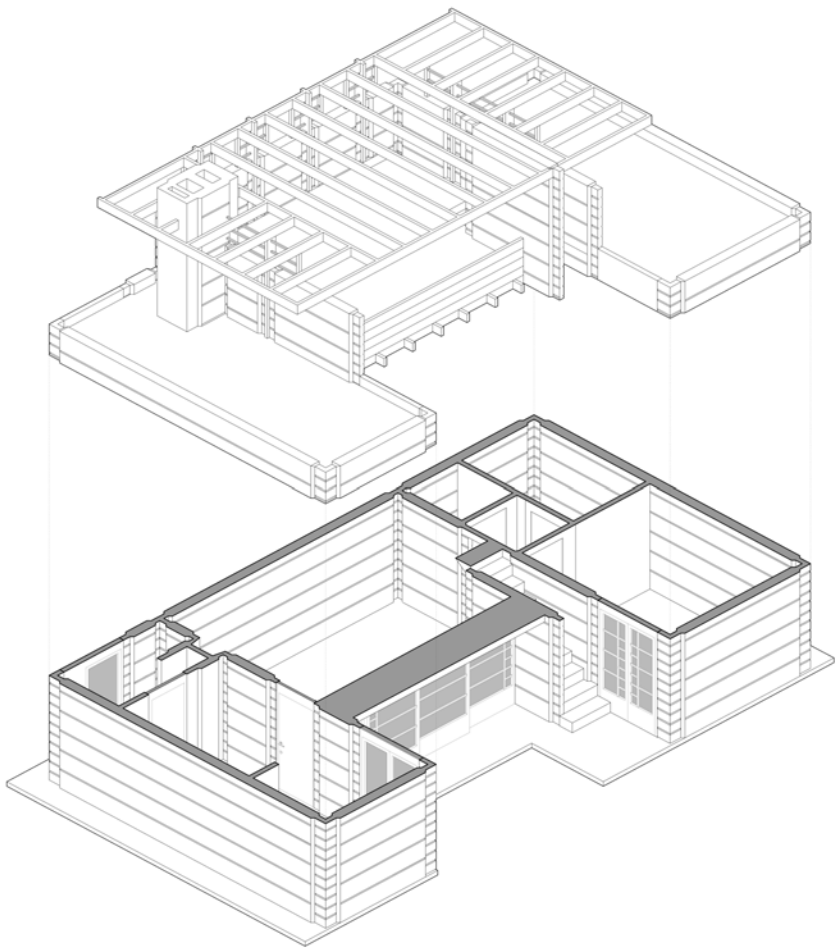
giungere ad inserire dettagli talmente minuti da risultare *invisibili* nella resa finale o peggio ancora talmente densi di spigoli da *impastare* il tratto,

- *inserimento di blocchi complessi come elementi bidimensionali:* inutile e dispendioso modellare ad esempio un albero se risulta possibile inserirne un blocco preconfezionato e più dettagliato quando la vista è preparata definitivamente in 2D,
- *posizionamento corretto di retini e campiture* a seconda del punto di stazione dell'assonometria o della prospettiva.
- *tracciamento di linee ad indicare le traiettorie per ricomporre ideal-*

Nell'immagine a destra, una vista di sezione prospettica al tratto per il modello di un blocco edificato in linea. Malgrado la corretta modellazione di tutti gli elementi, ben rappresentati in funzione del dettaglio richiesto dalla distanza del punto di vista, la sezione operata non contribuisce a fornire una informazione leggibile delle partizioni interne. Il piano di sezione orizzontale infatti risulta troppo prossimo all'altezza del punto di stazione prospettico, senza garantire per questo la percezione dell'altezza utile dei vani sino al pavimento calpestabile che si sarebbe dovuto vedere nella rappresentazione. Aver alzato il punto di vista incrementandone la coordinata di altezza, avrebbe portato ad un risultato migliore.

mente le componenti esplose della vista: tale accorgimento non solo comporta una correttezza formale del modello, ma rende più leggibile la geometria e come si ricompone idealmente.

- *scelta adeguata dei punti di passaggio per i piani di sezione*: di norma non si dovrebbero mai tagliare verticalmente elementi snelli come i pilastri od orizzontalmente oggetti a lastra come i solai, per non trasmettere false informazioni di massa nella lettura della sezione. Si devono privilegiare invece le percorrenze verticali, cercando di operare sezionamenti su vani scale con le relative rampe di collegamento.



A lato, un modello sezionato in vista assonometrica al tratto. Il disegno tridimensionale è stato ottenuto mediante una separazione di volumi appartenenti all'insieme complessivo ultimato: occorre preò prestare grande attenzione alla posizione del piano che delimiterà le porzioni volumetriche. In questo caso, pur essendo la visualizzazione chiara ed esplicativa, la parte di soletta del balcone aggettante sopra la vetrata del piano terra (di spessore trascurabile se paragonata all'altezza totale del fabbricato) è stata sezionata anch'essa dal piano di taglio. Questo genera una superficie di campitura ingannevole, anche se il risultato è corretto: sembra infatti che lo spessore della soletta longitudinale sia una parete molto più evidente rispetto alle altre. Occorre ricordare che il piano di sezione, così come nelle canoniche rappresentazioni in proiezione ortogonale, non dovrebbe mai passare per elementi snelli paralleli al piano stesso, solai, setti o pilastri che siano.

Nell'immagine in alto, una visualizzazione ottenuta mediante un algoritmo di "geometria piatta". Il modello, selezionato il punto di vista desiderato, viene proiettato su un piano ortogonale a questo e letteralmente "schiacciato" in un disegno vettoriale bidimensionale. Questo permette rifiniture altrimenti difficoltose da operare direttamente nel tridimensionale, e campiture per indicare fondali e materiali. Occorre prestare attenzione agli spessori di penna delle linee componenti, soprattutto se molto fitte e ravvicinate, come nel caso evidente delle protezioni per le scale esterne di collegamento verticale. In questo caso poi, l'aggiunta di alberature già a modello "schiacciato", altrimenti onerose in termini di modellazione e calcolo se inserite nel 3D, non solo rende più gradevole e verosimile la visualizzazione, ma permette un maggiore controllo sul risultato finale dell'inserimento.

IL RENDERING FOTOGRAFICO PER LA STAMPA FINALE

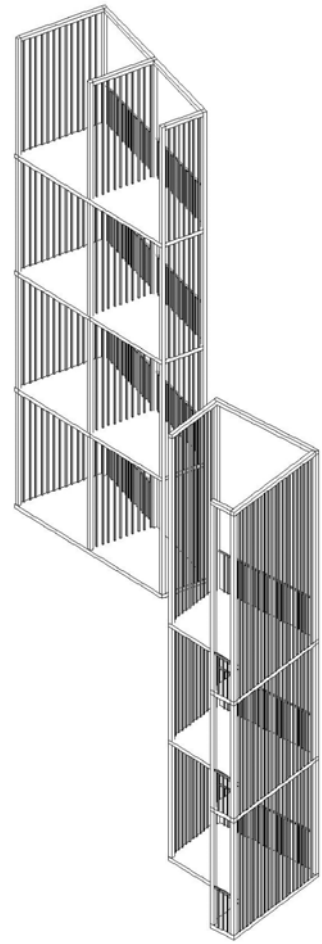
Il fondamento del fotorealismo o della rappresentazione ombreggiata in genere sta nel calcolo dell'interazione tra gli oggetti presenti nella scena modellata e la luce su essi incidente. Questa la principale differenza con un disegno al tratto, oltre alla peculiarità che il rendering cessa di essere un archivio di informazione vettoriale per divenire un'immagine di pixel.

L'influenza reciproca che si produce tra oggetti tridimensionali ed una fonte luminosa può infatti essere calcolato analiticamente ed il risultato può essere proiettato in un piano a due dimensioni, così da essere visualizzabile da periferiche bidimensionali in modalità raster: è il caso ad esempio delle immagini dei modelli 3D generate sui monitor di un computer. Il calcolo dell'incidenza luminosa sugli oggetti produce superfici che vengono definite *ombreggiate*, dal momento che gli algoritmi utilizzati per generare queste viste sono in grado di definire quali siano le porzioni dei solidi in luce e quali quelle in ombra.

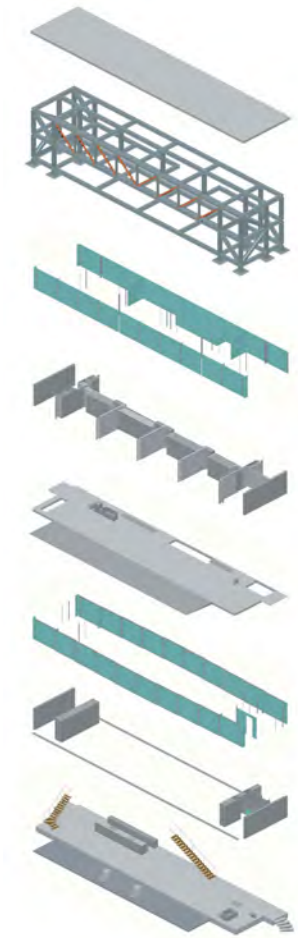
A seconda del metodo utilizzato per il calcolo, si possono ottenere approssimazioni del comportamento reale della luce anche molto sofisticate, giungendo a simulazioni fisiche che affondano le loro radici nella cosiddetta *equazione di rendering*[10].

Storicamente questa trattazione matematica ha fornito le basi per i due grandi successi raggiunti nella rappresentazione di immagini ombreggiate, vale a dire la generazione dei famosi algoritmi sviluppati da Gouraud nel 1971 e da Phong nel 1975. Questi metodi individuano la base teorica per due distinti filoni di processo, utilizzati oggi da quasi tutti i motori di

rendering moderni e che determinano il comportamento più o meno realistico della simulazione dei percorsi luminosi: un primo metodo di calcolo fa riferimento alla *luce locale o diretta*, dove la sorgente luminosa, puntiforme o di area che sia, investe gli oggetti modellati nello spazio tridimensionale in maniera diretta e i raggi luminosi da essa generati possono essere equiparati a semirette uscenti dalla fonte e incidenti con traiettoria rettilinea sulle superfici della scena. Il secondo metodo di calcolo, alternativo al primo e molto più sofisticato della luce diretta, è quello della *riflessione globale,* nel quale il modello di comportamento della luce considera come la riflessione della stessa avvenga da un oggetto all'altro; in altre parole un punto qualunque della superficie di un oggetto modellato viene investito non solamente dalla luce diretta ma anche dalla riflessione della luce prodotta dalla stessa sorgente e trasmessa di rimando dagli oggetti circostanti. L'interazione globale è per gran parte un problema ancora irrisolto anche se in questi ultimi tempi sono stati sviluppati degli algoritmi in grado di riprodurre con una certa precisione il comportamento reale della luce nello spazio; tali algoritmi si rifanno a tecniche di *global illumination*, *ray tracing*, *radiosity, unbiased rendering* e così via.
E' tuttavia curioso rilevare che, soprattutto nel campo dell'animazione digitale, la maggioranza delle immagini è prodotta usando ancora il metodo di riflessione locale di Phong.
Si rende qui giunti necessario fare menzione di una problematica che fin dai primi anni settanta del secolo scorso si è presentata come delicata da risolvere: la rimozione delle linee nascoste nelle viste di oggetti 3D. Questo algoritmo infatti, ha subito nel tempo intensi processi di sviluppo giungendo alla formulazione di quello che viene comunemente chiamato *z-buffer*, ovvero un modello molto elegante ma decisamente empirico in grado di nascondere gli spigoli non visibili dal punto di osservazione dal quale viene generata l'immagine e dalla caratteristica di velocità di calcolo snella ed affidabile.
Questo aspetto citato risulta decisamente importante per gli scopi che si vogliono raggiungere in questa trattazione, dal momento che i più comuni motori di rendering sono costituiti da almeno due componenti necessari: un algoritmo in grado di generare le ombre proprie e portate, ed un



Un dettaglio della protezione delle scale esterne, stralciato dal modello nella pagina precedente. Quando la modellazione giunge ad un dettaglio avanzato dei componenti, occorre prestare molta attenzione al risultato finale. In questo caso, la scala di stampa non genera sovrapposizione di linee evidente, tuttavia se viene rimpicciolita ulteriormente senza variare lo spessore dei tratti, alcune sovrapposizioni potrebbero generare delle illeggibili aree scure, non utili alla chiara comunicazione del progetto.



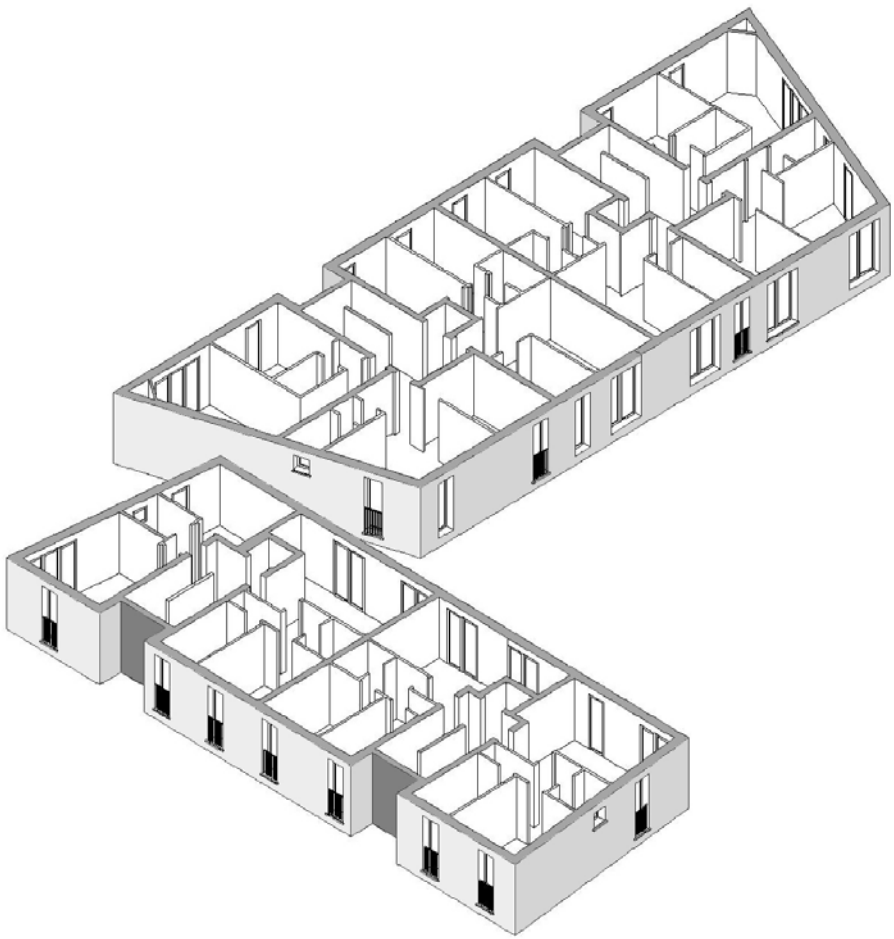
Semplice rendering a bassa risoluzione per comunicare in esploso l'ordine di "montaggio" dei diversi componenti di un organismo edilizio.Il punto di vista scelto è ortografico, non sono stati associati materiali e non vi sono luci che potrebbero rendere difficoltosa la lettura introducendo effetti di ombra. Se la visualizzazione fosse stata necessaria per una stampa a grande formato, sarebbe stato opportuno definire molti più dettagli, non apprezzabili a questa scala

algoritmo in grado di nascondere gli spigoli delle superfici non in vista.
Tutto questo risulta molto agevole da calcolare quando il modello è costituito da poligoni, ovvero le già esposte superfici costituite da triangoli o quadrilateri delimitanti porzioni discrete di superficie. In breve, per un algoritmo di rimozione delle linee nascoste , maggiore è la complessità del modello da visualizzare con tecniche di shading, maggiore sarà il tempo impiegato dal calcolatore per ombreggiare e generare correttamente le viste. Potrebbe pertanto rendersi vantaggioso generare dei piani di ritaglio, o *clipping planes*, in grado di restringere il campo applicativo di calcolo dell'algoritmo e di conseguenza di semplificare e rendere più veloce tutta la procedura di generazione.
Il rendering è un processo che esecutivamente si compone di diversi passi, e generalmente richiede una buona quantità di prove ed errori per raggiungere la qualità di immagine che si desidera. È importante iniziare con delle visualizzazione di prova mantenendo i valori di default per i parametri del programma che si sta utilizzando, in modo da valutare attraverso i risultati ottenuti quali impostazioni sia necessario modificare in seguito.
Fondamentalmente gli step da seguire sono i seguenti:
- la modellazione di tutti gli elementi componenti la scena, secondo le modalità già esposte,
- la scelta di un punto di vista, prospettico o assonometrico,
- la creazione delle luci[11],
- la creazione dei materiali, intesi come caratteristiche proprie delle superfici e inclusivi di colore proprio, di tessitura, di trasparenza, di riflessione, di rifrazione e di mappatura di *bump* (rugosità) se richiesta,
- la definizione delle modalità di associazione dei materiali agli oggetti presenti nella scena modellata, vale a dire a quali elementi vengono correlati i materiali creati e in quale modalità (mappature alla giusta scala e posizionate secondo riferimenti cubici, cilindrici o sferici, a seconda della geometria dell'oggetto bersaglio),
- l'aggiunta di uno sfondo o di un effetto realistico di contesto,
- il controllo di dettaglio per i parametri al fine di ottenere visualizzazioni sempre più verosimili e dettagliate,

- l'avvio del calcolo,
- il salvataggio dell'immagine raster ottenuta.

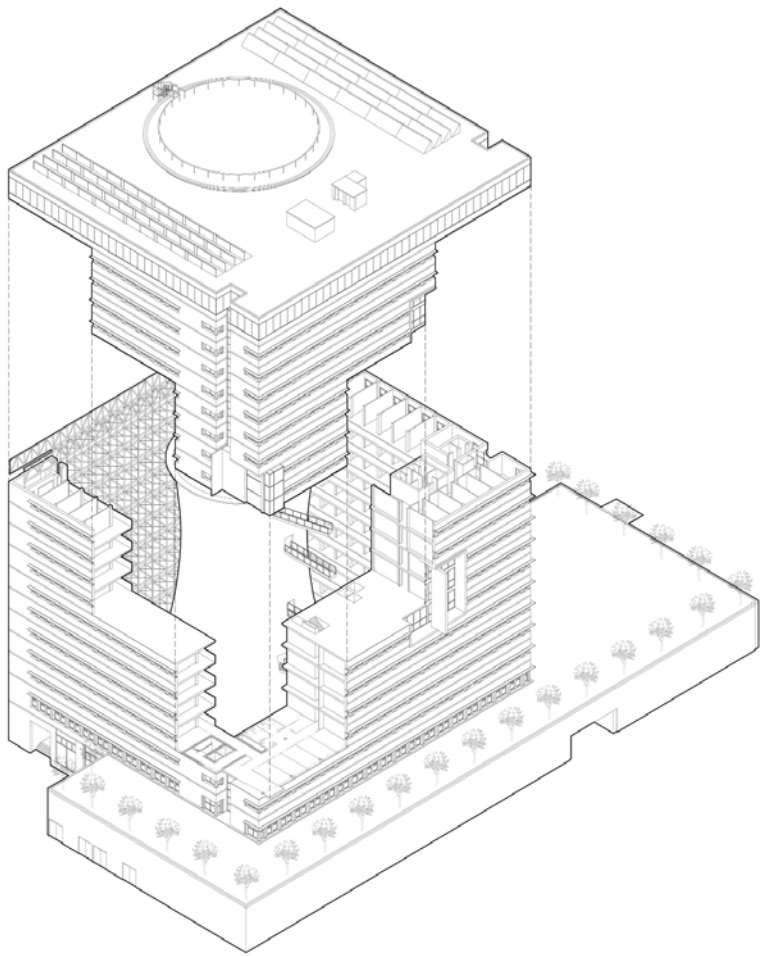
L'ordine con il quale questi passi devono essere compiuti non è necessariamente prefissato: è possibile ad esempio creare o associare materiali prima di aggiungere le luci, oppure dopo un rendering non troppo soddisfacente si possono introdurre elementi alla scena per poi ricominciare il calcolo successivo, e così via.

Affrontare pertanto la fase di rendering utilizzando i parametri standard ancor prima di aggiungere luci e materiali è importante per rivelare qua-



Algoritmo per occultare gli spigoli nascosti: se nell'immagine a lato il calcolatore avesse visualizzato anche tutti i bordi di giunzione tra pareti e solaio di piano, la lettura delle partizioni sarebbe stata pressochè impossibile. Celare quanto effettivamente non è visibile è una regola da considerarsi anche in fase di modellazione: è inutile impiegare tempo e risorse per modellare qualcosa che poi non verrà mostrato nelle viste finali.

lunque problema che potrebbe insorgere nella visualizzazione del modello. E' conveniente generare durante i tentativi, viste a bassa risoluzione per ottenere un render in poco tempo e valutare via via l'entità delle modifiche, oppure come concesso da alcuni software si può selezionare una regione della vista e sottoporla a rendering per velocizzare il calcolo, visualizzare solo quel dominio di pixel e valutare il risultato prima di introdurre variazioni[12]. Procedendo con le opzioni standard, quasi tutti i modellatori sul mercato usano delle luci di default, che in linea di massima non sono però realistiche e non producono il massimo risultato otte-



A lato, un esploso assonometrico correttamente rappresentato in "geometria piatta". Il componente che viene staccato dal complesso è visualizzato con una traiettoria di tratteggio che sottolinea il movimento apparente degli spigoli sezionati.
In visualizzazioni tecniche come questa, il corretto dosaggio di spessore per retini e contorni è molto importante per non creare appesantimenti a chi è chiamato a "leggere" il disegno.

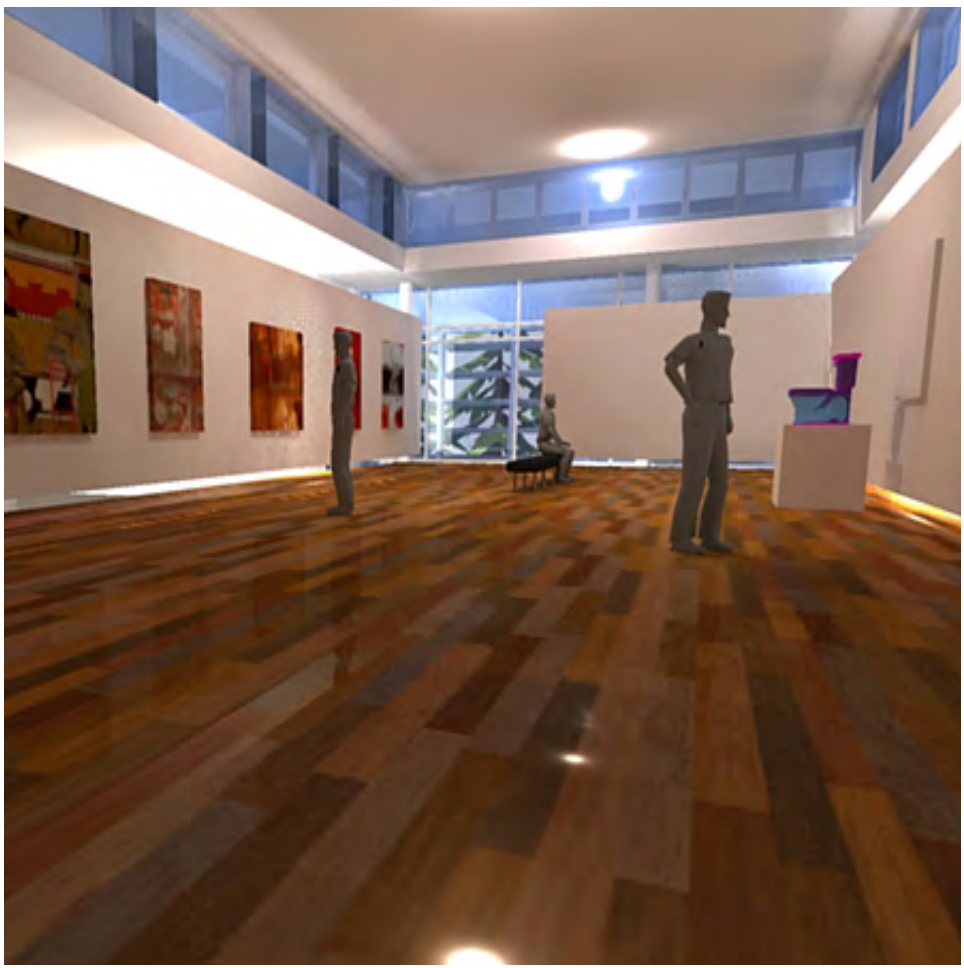
nibile dal motore grafico.
Per aumentare la qualità generale dell'illuminazione dunque, si introdurranno ora termini comuni a molti ambienti di rendering, classificando tipologie di sorgenti luminose differenti per applicazione e risultati.
La *luce standard o ambientale* (quella che in buona sostanza permette di "vedere" gli elementi presenti nella scena) consiste in una o più fonti luminose che illuminano uniformemente il modello da tutte le direzioni: pertanto non esiste un verso di orientamento univoco e di solito non vengono generate ombre portate.

Nell'immagine laterale, una prospettiva al tratto, correttamente sviluppata, soprattutto per la scelta del punto di stazione.
In architettura infatti è importante porsi nella posizione di chi realmente fruirà degli spazi di progetto, non solo come verifica dell'"impatto del costruito", ma come analisi della percezione che si può avere dello spazio progettato.

Il *punto luce o luce omnidirezionale* invece è una sorgente luminosa che emette raggi uscenti da una posizione specifica e che si irradiano in tutte le direzioni. Esso possiede la proprietà caratteristica (attivabile) di vedere attenuata la propria luminosità a seconda della distanza, in altre parole più la luce emessa è lontana dalla sorgente puntiforme, meno sarà intensa nella vista. Il punto luce può essere definito generalmente una intensità variabile (valori numerici maggiori solitamente inducono una brillantezza maggiore) e dalla possibilità di generare le ombre portate, per aggiungere grande realismo all'immagine finale. L'opzione ombra può

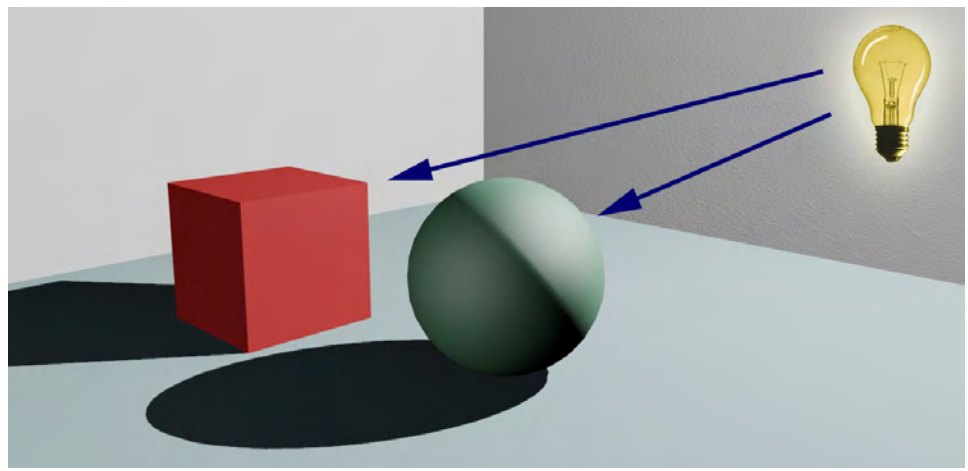
A lato, una vista rendering con alcuni problemi di luci, materiali ed inquadratura: la scelta di un fondo scuro, ad alto contrasto, dovrebbe essere mediata da una colorazione del modello molto più chiara, per ottenere una lettura più nitida delle ombreggiature e dei volumi. Inoltre si dovrebbero scegliere viste prospettiche, anche frontali, dove la deformazione sul quadro prospettico non risulti eccessiva, meglio se con punto di fuga verticale all'infinito (linee verticali parallele). Da ultimo, il problema delle luci. Illuminare ad arte un modello digitale richiede un buon numero di tentativi per giungere a risultati apprezzabili. In questo caso una sola fonte luminosa genera ombre molto nette e coprenti. Sarebbe stato opportuno inserire una seconda luce frontale, non generante ombre e di intensità più bassa della prima, per "riempire" (viene infatti definita come luce di riempimento) i punti critici di luce, contribuendo ad un contrasto più morbido e decifrabile.

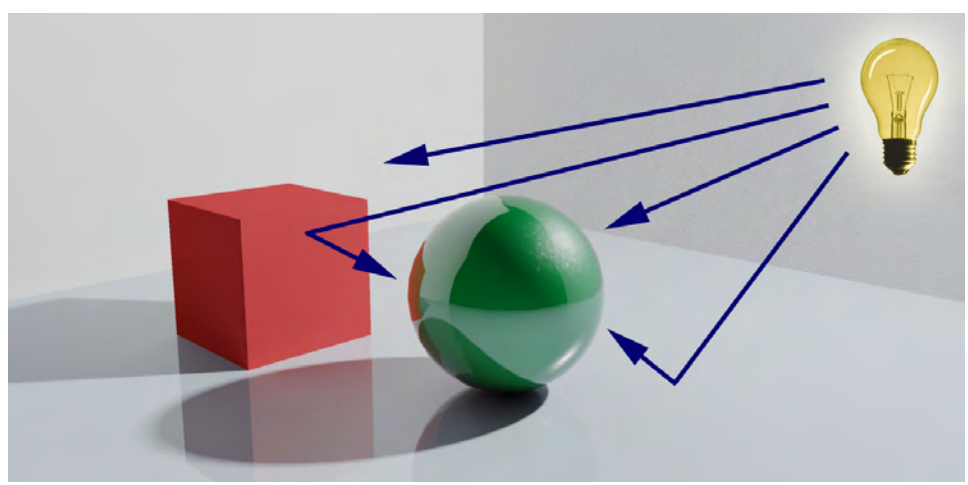
essere generata di regola sia in modalità ben definita (*ray-tracing*) che in modalità morbida (*mapped shadow*). La prima risulta essere molto più realistica ma è nel contempo più esosa in termini di tempi di calcolo. Naturalmente la luce puntiforme può avere anche caratteristiche cromatiche e il parametro di colore che di solito appare nelle proprietà è il riferimento principale per cambiare la tinta della radiazione luminosa uscente. Una *luce spot* invece differisce dal punto luce poiché possiede una direzione; infatti non si deve soltanto specificare una posizione della sorgente ma anche la direzione del bersaglio da illuminare.



Una buona scelta di tipologia per le luci ed una corretta combinazione di intensità risulta fondamentale nella realizzazione di viste per interni. La luce in questo caso non è naturale e deve permettere la leggibilità di materiali e volumi in ambienti generalmente ristretti. In questi casi è consigliabile posizionare le fonti luminose in funzione del punto di vista, per valutare come intervenire gradualmente sui singoli contrasti.

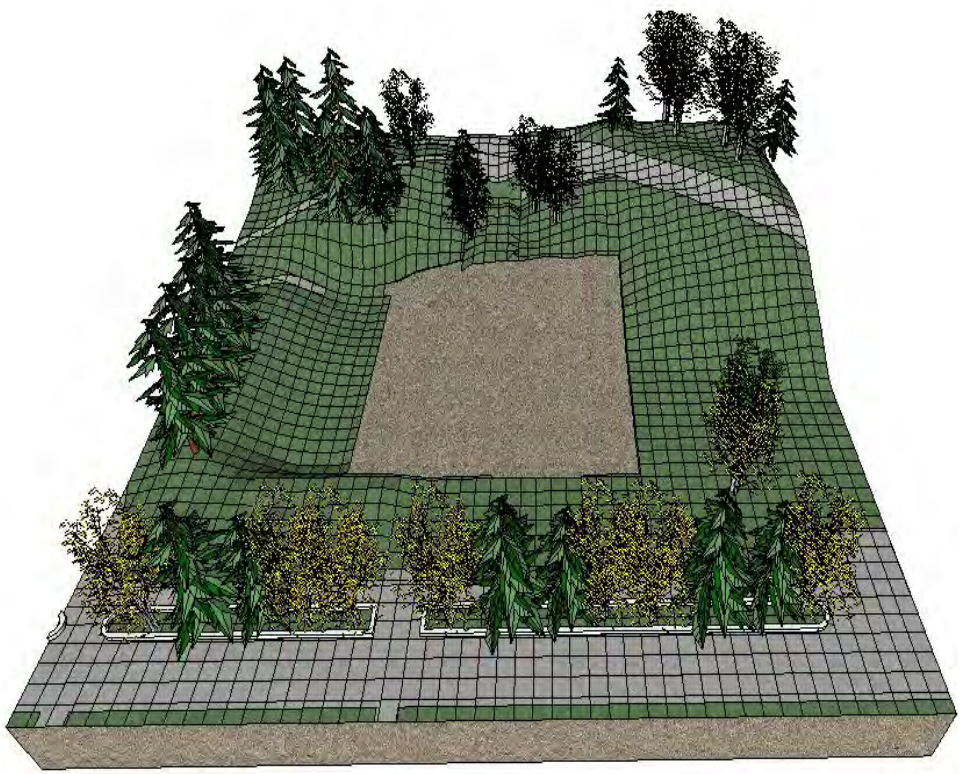
Una *luce distante* da ultima, agisce con una modalità simile al comportamento del sole, dal momento che i suoi raggi giungono da molto lontano (idealmente la sorgente è posta ad infinito) e praticamente possono essere tutti considerati come paralleli tra loro. Una luce distante non ha di norma mai attenuazione. Per ottenere una simulazione geografica dell'inserimento del proprio modello d'architettura all'interno di un contesto realistico, ovvero in esterni, questo modello di luce è ideale; essa in molti modellatori può essere addirittura simulata inserendo precise coordinate geografiche ed elementi di caratterizzazione dell'atmosfera[14].





A lato, sintesi dei principi alla base dei più diffusi algoritmi di illuminazione per rendering. In alto, il metodo ray-tracing, dove ogni singolo raggio uscente dalla fonte luminosa viene calcolato come un segmento incidente sulle superfici degli oggetti che popolano la scena, generando parti in luce e parti in ombra netta, sia propria che portata.
In basso invece, l'effetto della radiosity e, più in generale, della global illumination, due tecniche similari dove non entra in gioco solo la luce diretta che investe i corpi, ma anche quella riflessa e diffusa dagli elementi sui vicini. In questo caso le ombre sono più morbide e con bordi meno netti, vi sono riflessi di luce provenienti dalle pareti ed una quota di radiazione che colpisce un qualunque elemento viene riflessa sul vicino. Il risultato è molto più fotorealistico, ma generalmente queste tecniche richiedono dei tempi di calcolo ed una raffinatezza di scelta dei parametri luminosi molto avanzati.

L'ultimo atto del flusso di lavoro si finalizza nella presentazione dell'elaborato ottenuto mediante la modellazione e il successivo trattamento di calcolo rendering. La scelta di colori, sfumature, luci e materiali dovrebbe già tenere conto in fase di rendering del tipo di supporto che sarà utilizzato al termine del processo per esibire il lavoro svolto. Infatti immagini su fondo scuro dove le geometrie dell'oggetto d'architettura spiccano con alto contrasto poiché caratterizzate da colori chiari ed ombre morbide, bene si potrebbero prestare a una visualizzazione su monitor ma il corrispettivo risultato su carta potrebbe condurre ad un risultato



Nell'immagine a lato, un esempio di realizzazione corretta di modellazione del terreno, utilizzata poi per inserire il modello dell'edificio in un contesto. La resa è ottenuta con illuminazione standard senza ombre e in modalità non fotorealistica.
Anche in questo caso la precisione attribuita al movimento del terreno varia a seconda della necessità di verosimiglianza richiesta, tuttavia il tracciamento in pianta di curve di isolivello (polilinee o spline) e il loro successivo riposizionamento ad altezze differenti nello spazio, consente alla totalità dei modellatori in commercio di applicare un comando di "loft" per interpolare abbastanza fedelmente la superficie da rappresentare.
Ancora una volta, si consiglia di non attribuire valori di griglia o mesh troppo elevati per non aggiungere un quantitativo di vertici eccessivo, che appesantirà notevolmente la gestione del modello senza di ritorno fornire un dettaglio maggiormente significativo.
Si tenga presente che tale considerazione può farsi anche per la vegetazione, da inserire il meno possibile come modello tridimensionale, ma da aggiungere in una fase successiva con programmi di grafica raster (fase di post-render).

piatto e poco caratterizzato. Senza addentrarsi in digressioni aventi per oggetto il processo di calibrazione di monitor, stampanti o plotter, è bene ricordare che non sempre il colore si mantiene invariato con il passaggio da un supporto di visualizzazione ad un altro. Supponendo di voler preparare una tavola da stampare su carta, le immagini ottenute dal calcolo possono essere impaginate con programmi di grafica e di fotoritocco, con l'avvertenza di mantenere una risoluzione adeguata alla grandezza della stampa che si vorrà ottenere. In conclusione, si consiglia di memorizzare le immagini destinate all'impaginazione con formati di

Una scelta di colorazione del materiale uniforme, quando le luci sono posizionate e dosate correttamente, garantisce un effetto molto accattivante alla presentazione di architettura. Il realismo non deve però essere perseguito al pari della verosimiglianza: a volte un disegno credibile è molto più "narrativo" di una vista talmente realistica da confondersi con la fotografia.
In questa composizione di rendering e disegni al tratto, il risultato appare non solo corretto ma anche efficace nella descrizione del progetto.

archiviazione non distruttivi; infatti immagini in formato TIFF, anche se di dimensioni rilevanti, conservano a titolo di esempio una fedeltà dell'informazione di colore maggiore delle equivalenti immagini compresse in formato JPEG. Anche nella fase di stampa come già esposto in quella di rendering, porta grandi benefici l'utilizzo di anteprime e stampe di porzioni di tavola a grandezza reale: in tal modo infatti si possono valutare correttamente luminosità e saturazione dei colori per ottenere ancora una volta un disegno il cui scopo è da sempre quello di "raccontare" un'idea nella maniera più chiara e leggibile possibile.

A sinistra, uno scorcio di modello dai contrasti esasperati: la tecnica può essere presa in considerazione per comunicare l'efficacia della schermatura solare, ma difficilmente una vista come questa può essere letta nelle forme, anche se la mappatura dei materiali ed il complessivo inserimento in un contesto di vegetazione è formalmente corretto. L'utilizzo di più fonti luminose di riempimento permette di ovviare a queste problematiche di ombreggiamento.

Note

1 - Galilei G., *Dialogo dei massimi sistemi*, pag. 98, 1632

2 - Cfr. De Rubertis R., "*Geometria descrittiva:anno zero?"* in *"L'insegnamento della geometria descrittiva nell'era dell'informatica,* a cura di Fiorucci T., Gangemi Ed., Roma, 2003.

3 - Docci M., Migliari R., "*La scienza della rappresentazione. Fondamenti applicazioni della geometria descrittiva*", Roma, 1992-1999.

4 - Lo schermo di un computer non può mostrare linee o disegni, ma soltanto punti; se questi sono sufficientemente piccoli, tali da essere più piccoli della risoluzione percepita dall'occhio umano, l'osservatore ha l'impressione di vedere linee anziché punti allineati, e disegni anziché ammassi di puntini distinti.

5 - In Autodesk AutoCAD ad esempio, i layer racchiudono elementi con proprietà definite dall'operatore, come strati aventi caratteristiche omogenee o semplicemente blocchi di oggetti da tracciare con specifiche tipologie di linea o colore.
Un file accessorio poi, con estensione .ctb o .stb, si incaricherà poi di sintetizzare le caratteristiche dei vari layer presenti nel disegno, in modo da poterli tracciare su file o su carta secondo le preferenze impostate.

6 - Mingucci R., *Disegno interattivo*, Patron Editore, Bologna, 2003

7 - "The CSG method is a volumetric representation - shape is represented by elementary volumes or primitives". cfr. Watt A., *3D computer graphics Third edition*, Addison Wesley, 1999.

8 - Ci si riferisca ad esempio al comando "*massprop*" ("*propsol*"nella versione italiana) del più diffuso tecnigrafo digitale CAD, AutoCAD: l'esecuzione di questa istruzione infatti rende disponibile a video tutta una serie di informazioni geometrico-fisiche dell'oggetto selezionato quali le coordinate del baricentro, il volume intrinseco, momenti e prodotti di inerzia e così via. Il calcolo di questi valori è reso possibile proprio dalle caratteristiche volumetriche, racchiuse nell'oggetto.

9 - A titolo informativo, sempre in AutoCAD, questo tipo di approccio può essere attuato mediante una manipolazione tesa a trasformare il modello tridimensionale in una serie di possibili viste bidimensionali dello stesso, in grado di mantenere le caratteristiche di vettorialità e proporzione, a meno della perdita delle informazioni di profondità, esplicitate dalla terza coordinata spaziale del modello originario.
Ad oggi l'algoritmo che permette di ottenere questo risultato è alla base del comando di *"geometria piatta",* anche se funzionante ancora solamente su viste ortografiche e non di prospettiva. Una alternativa è la stampa virtuale in formato .DXB.

10 - L'equazione di rendering descrive matematicamente il flusso di energia luminosa che popola un'intera scena, restituendo valori di distribuzione utili a simulare le condi-

zioni di luminosità del modello.

L'equazione ha la forma:

$$L_0(x,\vec{w}) = L_e(x,\vec{w}) + \int_{\Omega} f_r(x,\vec{w}',\vec{w})\, L_i(x,\vec{w}')(\vec{w}' \cdot \vec{n})\, d\vec{w}'$$

dove:

$L_0(x,\vec{w})$	è la luce uscente da una particolare posizione x in direzione w
$L_e(x,\vec{w})$	è la luce emessa dalla stessa posizione nella medesima direzione
$\int_{\Omega} \dots d\vec{w}$	è la sommatoria infinitesima sulla superficie di un emisfero di tutta la luce entrante su di essa
$f_r(x,\vec{w}',\vec{w})$	è la parte di luce riflessa dalla posizione x verso l'esterno (BRDF)
$L_i(x,\vec{w}')$	è la luce entrante da una particolare posizione x in direzione w
$(\vec{w}' \cdot \vec{n})$	è l'attenuazione della luce entrante nella scena dovuta all'angolo di incidenza tra raggio e superficie

11 - Quasi tutti i pacchetti software che generano viste raster incorporano almeno quattro tipi diversi di luce standardizzati. Questi sono: la luce standard, la luce distante (che simula quella solare), il punto luce ed il faretto o spotlight.

12 - Per attuare questo tipo di metodologia di verifica in AutoCAD, si può selezionare una regione a schermo, successivamente dal pannello di controllo *render* della dashboard si può fare riferimento all'icona associata. Questo causerà l'esecuzione del comando RENDERCROP, disponibile a partire dalla versione 2007 del software.

13 - AutoCAD 2007 prevede una funzione di luce distante in grado di simulare il percorso solare: dal pannello di controllo esteso della dashboard infatti, è possibile impostare una localizzione geografica - comando GEOGRAPHICLOCATION. così come è possibile regolare le proprietà dell'illuminazione solare scegliendo la voce modifica il sole dal pannello di controllo esteso della dashboard - SUNPROPERTIES.

14 - Per amministrare, modificare e visualizzare le impostazioni di tutte le luci presenti nella scena, si può scegliere il comando lista luci sempre dalla dashboard di AutoCAD oppure si può digitare il comando LIGHTLIST. Le luci possono essere difficoltose da selezionare, come ad esempio nel caso delle luci distanti che non hanno un'icona in grado di identificarne la posizione nel disegno. La lista delle luci serve proprio per modificare più comodamente tutte le fonti luminose già inserite all'interno della scena.

Riferimenti bibliografici

G. Congiu, *Autocad 2007 : base e avanzato*. - GC Edizioni. - 3 v.

E. Pruneri, *Autocad 2007 e LT : guida pratica*. - Mondadori informatica, 2007.

Colori perfetti: la guida pratica per scoprire tutti i segreti del colore all'interno di Adobe Photoshop - Future Media Italy, 2006.

R. Celano, *Adobe Photoshop CS* - Mondadori informatica, 2004.

D. McClelland, *Photoshop CS Tutto&Oltre* -Apogeo, 2004.

Adobe Photoshop CS2. Classroom in a book. Corso ufficiale Adobe.
Editore Pearson Education Italia (collana Adobe, classroom in a book), 2005.

D. McClelland, R. C. Fuller with L.Ulrich Fuller, *Photoshop CS2 Bible* -Hardcover, 2005

S. Singh Hacking Photoshop CS2 - Paperback, 2005

R. Mingucci, *Disegno interattivo* - Patron Editore, 2003.

Los, Grossa, Pulitzer, *Elaborazione elettronica nel progetto di architettura* - Franco Muzzio Editore, 1990.

C. Mezzetti (a cura di), *La rappresentazione dell'architettura. Storia , metodi, immagini* - Edizioni Kappa, 2000.