



Maria Pignataro

Professore Associato di Disegno presso il Politecnico di Milano, insegna "Disegno" e "Modellazione 3d" nella Scuola di Ingegneria Edile Architettura. E' responsabile scientifico del Laboratorio Prototipi presso il Polo Territoriale di Lecco. Ha curato la realizzazione di diversi modelli fisici, tra cui quello per l'Expo 2015 Milano.

Geometrie complesse e modellazione fisica per la costruzione dell'architettura *Complex geometries and physical modelling for the construction of architecture*

La costruzione dell'architettura è preceduta, sempre più spesso, dalla costruzione del suo modello fisico e ciò dipende dalla complessità delle forme geometriche che caratterizzano il progetto e dalla evoluzione delle tecniche di produzione dei modelli fisici. Per le geometrie dell'architettura contemporanea, molto variabili nel loro sviluppo tridimensionale, la rappresentazione sullo schermo piatto del computer risulta spesso insufficiente mentre il ricorso al loro modello fisico permette di cogliere a colpo d'occhio l'insieme del progetto e di verificarne meglio le forme.

La realizzazione del modello comporta trasformazioni sostanziali del progetto architettonico con l'applicazione di nuove costruzioni geometriche del modello, del tutto peculiari, basate su un processo di estrema semplificazione delle forme. Si vuole qui documentare il lavoro didattico sviluppato nel corso di "Modellazione 3d".

The construction of architecture is today increasingly often preceded by the construction of its physical model to different scales: this depends on the complexity of geometric shapes characterising contemporary architecture and the evolution of construction techniques.

For geometries of contemporary architecture, highly variable in their three-dimensional development, representation on the flat screen of the computer is often insufficient, while recourse to the physical model allows the overall project to be appreciated at a glance and its shapes to be better examined.

Creation of the model involves major transformations of the architectural design with the application of new and very particular geometric constructions of the model, based on a process of extreme simplification of shapes. The intention is to document the teaching experience developed during "3D Modelling" lessons of Politecnico in Milan.

Parole chiave: architetture di forma complessa, modellazione digitale, modellazione fisica, prototipazione rapida, controllo del progetto

Keywords: complex-shaped architectures, digital modeling, physical modeling, rapid prototyping, project control

INQUADRAMENTO GENERALE. LA COSTRUZIONE DEL MODELLO FISICO. FATTORI INNOVATIVI Da pochi anni, si assiste alla convergenza di diversi fattori che, seppur in forma non ancora esplicita, attribuiscono al modello fisico un ruolo importante nella costruzione dell'architettura.

Tali fattori sono riconducibili, in sintesi, ai nuovi approcci progettuali e alle recenti innovazioni nei metodi di produzione dei modelli fisici.

Le nuove tendenze progettuali, infatti, sempre più coinvolte dalle potenzialità di impiego dei software di modellazione digitale, sviluppano, in maniera anche diffusa, architetture dalle forme geometriche complesse.

La necessità di integrare tali forme a prestazioni elevate di confort ambientale, ed in una prospettiva di sostenibilità energetica, rende piuttosto complesso il controllo dell'insieme delle variabili in gioco. Si devono realizzare ricerche sulle caratteristiche morfologiche dell'edificio, sulle prestazioni dei componenti singoli o assemblati fra loro, finalizzate a tali scopi specifici.

In questo ambito, si sviluppano le realizzazioni di modelli fisici di una parte dell'edificio o di un singolo componente per la verifica del progetto.

Il trasferimento dei metodi di produzione industriale, secondo procedimenti cad-cam, alle tecniche di realizzazione del modello è un altro dei fattori innovativi nell'ambito della modellazione fisica del progetto. L'aspetto fondamentale di tale innovazione consiste nello stretto legame che si viene a instaurare tra rappresentazione digitale e materializzazione dell'architettura, mediante l'ausilio di macchine, in virtù delle quali il modello fisico viene realizzato direttamente dai file del progetto digitale, opportunamente modificati.

Le macchine di prototipazione oggi disponibili sviluppano lavorazioni sostanzialmente di tre tipi: per addizione di materiale (abs, polvere di amido, ecc.), per sottrazione di materiale (legno, resine, acciaio, ecc.), per taglio e incisione di materiale in fogli (cartoncino, perspex, legno, vetro, ecc.). I primi due tipi eseguono file elaborati con modellazioni tridimensionali in formato STL e simili, il terzo tratta materiali in fogli, secondo file 2D in formato dwg. A dimostrazione della diffusione di tali tecniche combinate di rappresentazione del

progetto (modellazione digitale e modellazione fisica), sono entrate da poco in distribuzione macchine di prototipazione da ufficio delle dimensioni simili di una fotocopiatrice e di rapido utilizzo. In altri termini, la produzione artigianale e un po' imprecisa del modello tradizionale resta ancorata al disegno manuale del progetto, mentre all'evoluzione delle tecniche di rappresentazione digitale si collega saldamente la prototipazione cad-cam dell'architettura.

Questo, se da un lato comporta la perdita del 'fascino' intrinseco al modellino fatto a mano, dall'altro conferisce nuove valenze alla rappresentazione del progetto e dei suoi elementi costruttivi: metodi che implicano, in maniera del tutto peculiare, la conoscenza approfondita, sia della geometria descrittiva, sia dei software di modellazione da utilizzare.

PROCEDIMENTI PER LA COSTRUZIONE GEOMETRICA DEL MODELLO

Bisogna innanzitutto considerare che la costruzione del modello fisico è fortemente condizionata dal metodo di produzione che si vuole adottare e dai materiali che si intende utilizzare. Tali scelte vengono determinate dalle caratteristiche morfologiche del progetto, dalla scala dimensionale e dal grado di dettaglio, oltre che dalle caratteristiche degli elementi costruttivi, nel caso di particolari costruttivi a partire dalla scala 1:20. Sulla base di questi vincoli vengono modificati i disegni digitali, secondo un processo decisionale che consiste in un vero e proprio 'progetto' del modello.

Morfologia del progetto e scala di rappresentazione

Le caratteristiche morfologiche del progetto orienteranno la scelta del metodo di prototipazione verso sistemi di lavorazione tridimensionale, nel caso di forme complesse con superfici dalle geometrie non sviluppabili, oppure verso sistemi di lavorazioni bidimensionali, nel caso di progetti connotati da superfici piane o comunque riconducibili a solidi semplici, di rotazione, ecc.. Ognuno di questi due metodi indica contemporaneamente il software e le macchine da utilizzare, oltre ai tipi di materiali: da questi discenderanno

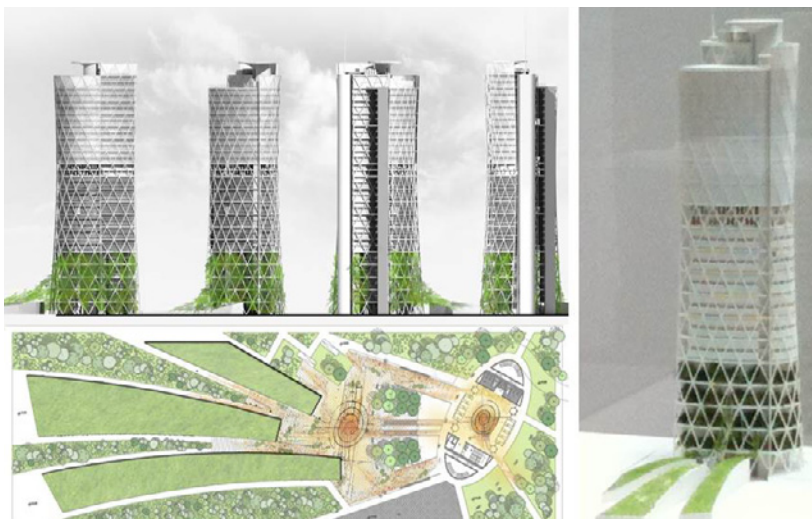
le costruzioni geometriche dei file di disegno che genereranno il modello fisico.

A scopo esemplificativo, riporto due progetti modellati dal Laboratorio Prototipi del Politecnico di Milano, Polo territoriale di Lecco, per dimostrare il percorso decisionale verso la scelta dei due diversi metodi che hanno portato allo sviluppo di costruzioni geometriche differenti.

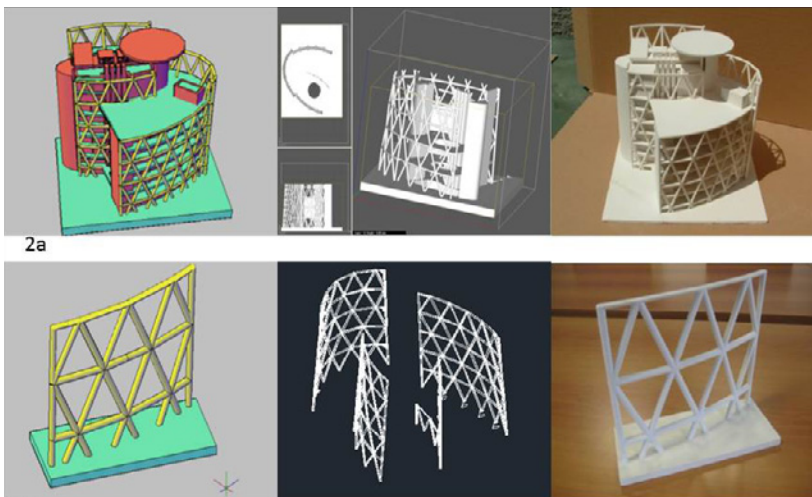
Nel Concorso Internazionale riservato agli studenti per un progetto di housing in Malesia¹ l'analisi del progetto evidenziava una morfologia semplice, con l'utilizzo esclusivo di superfici piane, anche disposte in posizioni generiche rispetto ai piani di riferimento, come nella copertura a compluvio della grande piazza. La scala 1:100 di restituzione del modello fisico, implicava un grado di dettaglio abbastanza contenuto degli elementi costruttivi, definiti mediante l'impiego di materiali disponibili in loco, quali legno e bamboo, e combinati con l'uso di energie rinnovabili: pannelli solari, fotovoltaici e recupero dell'acqua piovana, concentrati sulla copertura. Per questi motivi si è scelto di realizzare il modello mediante file di disegno 2d, utilizzando una macchina laser plotter, destinata al taglio e incisione delle superfici piane dei diversi materiali in fogli di spessore variabile.

Una soluzione diversa è stata, invece, adottata per il progetto del grattacielo ecosostenibile, Concorso di idee bandito dal Comune di Torino e oggetto di una tesi di Laurea molto approfondita². La forma del grattacielo particolarmente complessa (fig. 1), sciancrata nella parte centrale dello sviluppo verticale (per ottimizzare il comportamento all'azione del vento della struttura metallica esterna a "diagred") e organizzata secondo due ellissi eccentriche nella distribuzione interna degli spazi confinati e delle piazze coperte, rendeva impossibile procedere secondo una modellazione bidimensionale. In particolare, con riferimento a:

- la superficie ellissoidale e sciancrata dell'involucro strutturale, non sviluppabile su un piano,
- gli elementi strutturali della diagrid, costituiti da tubolari fra loro complanari nel giunto,
- la scelta della scala 1:200, che comportava spessori sottili di tutti gli elementi costruttivi,



1. Tesi di Laurea "Strategie progettuali per un grattacielo ecosostenibile a Torino Porta Susa", A. Borghi, G. Lobaccaro, G. Zani. A sinistra il modello digitale 3d, qui rappresentato in pianta e prospetti. A destra il modello fisico realizzato con due diverse tecniche di prototipazione rapida: con deposito di abs, materiale plastico resistente agli urti, per l'involucro strutturale; con deposito di polvere di amido, per l'edificio all'interno della struttura e per le piazze coperte.



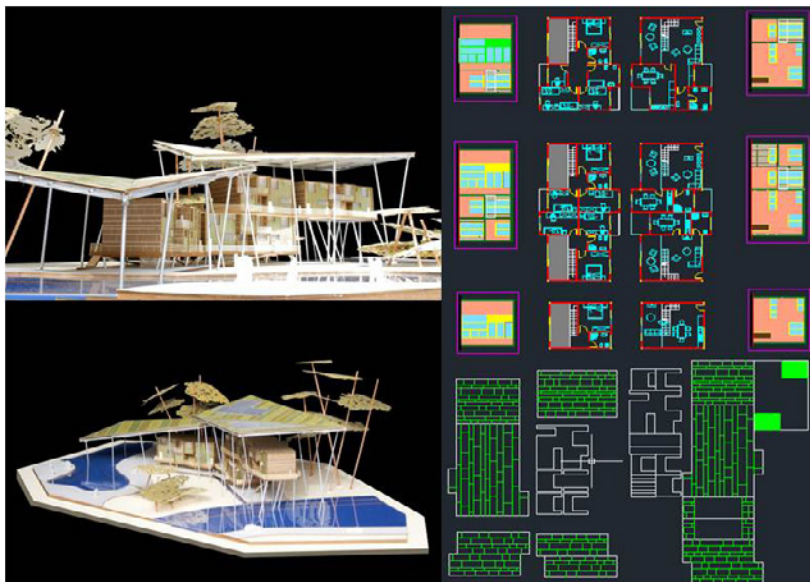
2. Le semplificazioni geometriche utilizzate nel modello del grattacielo per il Concorso di Torino sono state eseguite con software di modellazione 3d, facendo riferimento a superfici non più piane, ma a superfici di curvatura complessa, secondo l'involucro strutturale. A sinistra, il modello digitale, al centro l'interfaccia di stampa della macchina di prototipazione, a destra il modello. Tesi di Laurea "Strategie progettuali per un grattacielo ecosostenibile a Torino Porta Susa", A. Borghi, G. Lobaccaro, G. Zani.

con le relative le difficoltà di assemblaggio derivanti dalla scelta di una modellazione su base bidimensionale.

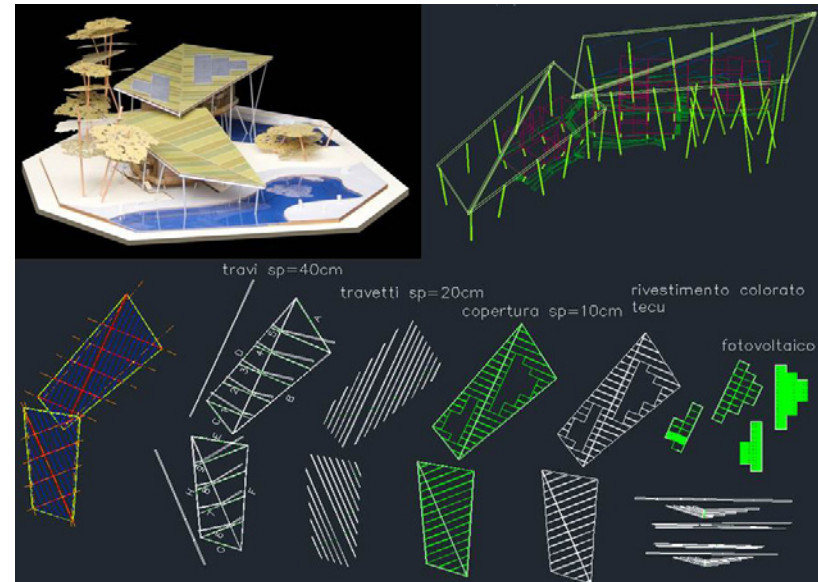
- l'elaborazione digitale del progetto, già sviluppata con software di modellazioni 3d, per poter generare la forma complessa.

Per la forte connotazione tridimensionale del progetto, il modello fisico è stato costruito, sulla base dei file di modellazione solida (fig. 2a), scegliendo di utilizzare due macchine di prototipazione rapida: una con deposito di abs, materiale plastico resistente agli urti, che consente lavorazioni particolarmente sottili, con il quale è stato realizzato l'involucro strutturale dell'intero grattacielo, costituito da tubolari di spessore 2 mm, in scala 1:200; l'altra con deposito di polvere di amido, per l'edificio all'interno della struttura e per le piazze coperte.

Tutti questi tipi di modellazione solida comportano una estrema semplificazione dei disegni di progetto, che si differenziano, però anche notevolmente, nei procedimenti e nelle costruzioni geometriche da realizzare nel caso della modellazione 2d o di quella 3d.



3. Costruzione del modello per l'housing in Malesia con tecniche 2d e laser plotter. Tutti gli edifici sono stati prima semplificati nelle diverse superfici cui appartengono gli elementi costruttivi (in alto piante e prospetti ribaltati). Ognuno di questi è stato poi scomposto secondo i diversi strati di materiale che lo costituiscono: in basso i piani di lavoro della laser plotter per gli strati della parete progettata (rivestimento esterno, elementi portanti, rivestimento interno, ecc.).



4. Scomposizione degli elementi costitutivi della copertura, costruita estrapolando il disegno di ogni singola superficie di appartenenza dei diversi elementi. In alto: a sinistra il modello fisico, a destra una fase del processo di semplificazione dal modello 3d, in basso i diversi piani di lavoro macchina (travi, travetti, impermeabilizzazioni, rivestimenti, fotovoltaico, ecc.).

Semplificazioni geometriche

Nel processo di semplificazione geometrica del progetto, i disegni subiscono trasformazioni così rilevanti da apparire, soprattutto nella modellazione bidimensionale, raffigurazioni astratte. In generale, possiamo notare che nella modellazione bidimensionale si procede, riconoscendo la posizione reciproca dei piani di appartenenza degli elementi tecnici, mentre nella modellazione tridimensionale si procede riconoscendone la loro forma più o meno complessa. Riprendiamo i due esempi esaminati prima per l'analisi morfologica.

Come si vede dalle immagini del modello per l'housing in Malesia, tutti gli edifici (fig. 3), sono stati scomposti nelle diverse superfici cui appartengono gli elementi costruttivi (pareti, coperture, serramenti, ecc.); per ognuno di questi tipi,

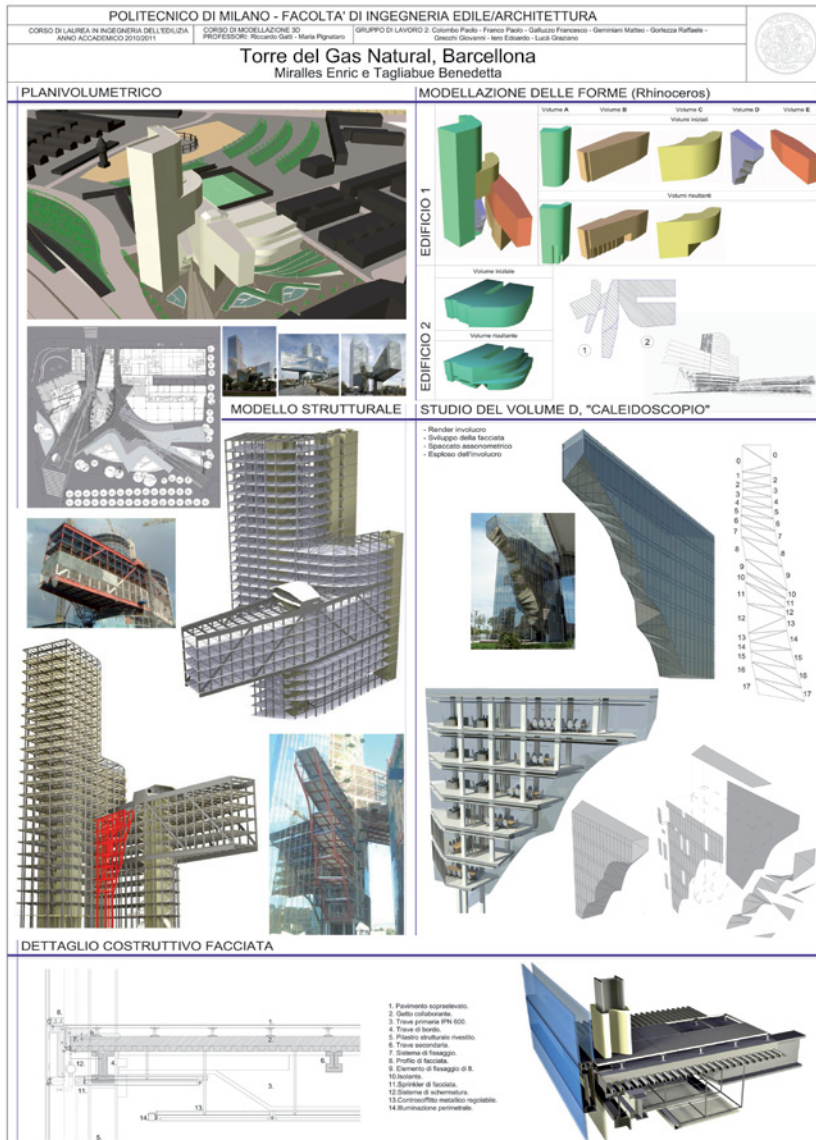
come ad esempio per le pareti, sono stati riconosciuti i piani di appartenenza dei diversi strati di materiali che le costituiscono (pilastrini in legno, lastre di rivestimento interno, isolante, rivestimento esterno, ecc.) ed è stato isolato il disegno della superficie cui appartiene. Allo stesso modo si è proceduto per tutto il resto del progetto, selezionando e scomponendo le superfici di ogni strato di elementi costruttivi, come nell'esempio qui riportato della copertura (fig. 4), e dei livelli del terreno e del fiume. Ognuno dei piani così scomposti è stato tagliato o inciso dalla laser plotter, esattamente come disegnato in dwg, per essere poi ricomposto manualmente con gli altri, nella stessa posizione indicata dal progetto digitale. Proprio per l'elevata precisione delle lavorazioni meccaniche, la sovrapposizione degli strati, in fase di montaggio, risulta molto precisa e di facile

esecuzione.

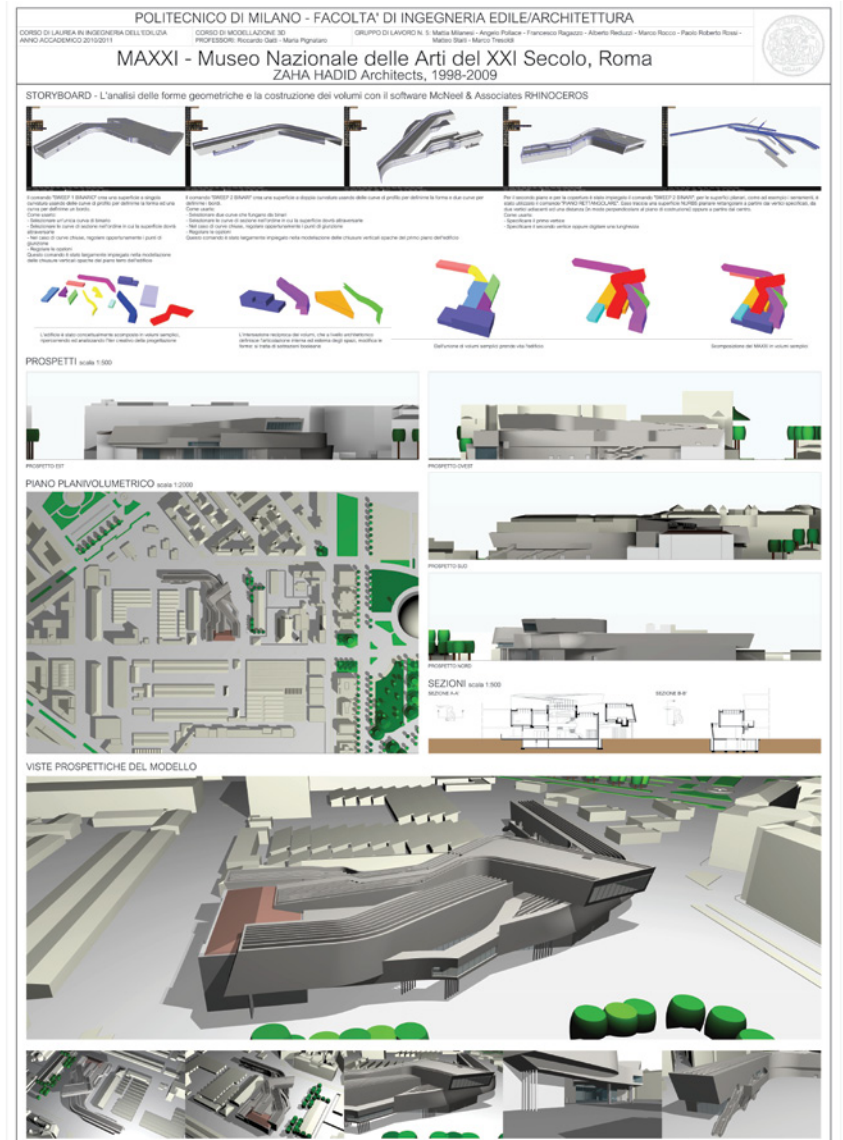
Le semplificazioni geometriche utilizzate, invece, nel modello del grattacielo per il Concorso di Torino sono state eseguite con software di modellazione 3d, facendo riferimento a superfici non più piane, ma a superfici di curvatura complessa, secondo l'involucro strutturale (fig. 2b).

Mentre i procedimenti di modellazione da file 2d comportano una frammentazione del modello e di conseguenza operazioni manuali di assemblaggio di tutte le parti, con l'uso di macchine di prototipazione, l'apporto manuale è quasi irrilevante e gli elementi vengono realizzati direttamente nella loro configurazione 3d.

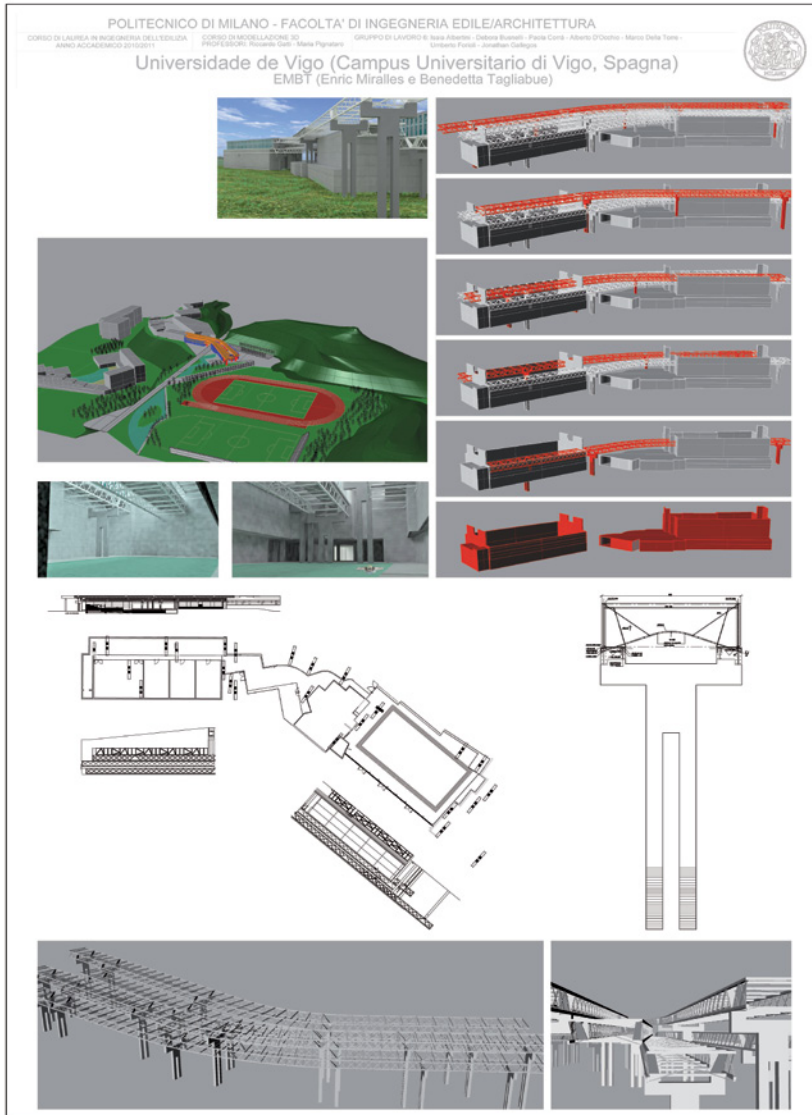
Questo metodo di modellazione fisica comporta un controllo degli errori del disegno digitale ancora più accurato della modellazione 2d. Come nel caso della diagrid strutturale, nella quale il



5. Torre del gas naturale a Barcellona, sviluppata scomponendo le forme in relazione alle funzioni. Parti modellate singolarmente e poi aggregate alle altre per sottrazioni booleane. In basso la modellazione 3d degli elementi strutturali.

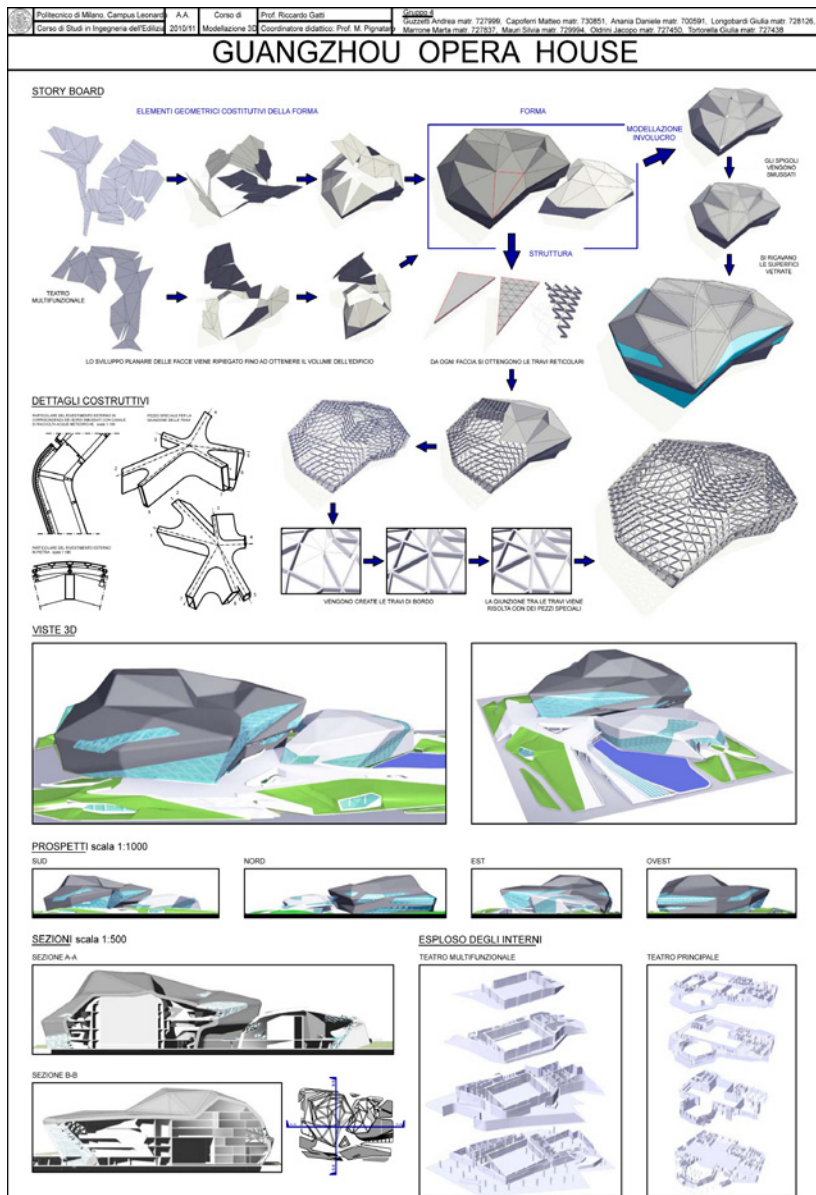


6. Analisi e scomposizione delle forme del progetto, in alto, per il Museo Nazionale delle arti del XXI secolo, Roma (Hadid). Sotto, modellazione digitale 3d, rappresentazioni in prospettiva, sezioni e render.



7. Nel progetto per l'Università di Vigo, Spagna (Tagliabue, Miralles) sono state distinte le diverse parti strutturali, scomponendo la stratificazione a partire dalle pareti portanti di elevazione, sulle quali sono state sovrapposte le strutture reticolari della copertura, di forma particolarmente complessa. Render anche dell'interno.

8. L'aggregazione delle parti è risultata particolarmente impegnativa per il progetto della Town All a Utrecht, trattandosi dell'ampliamento di un'edificio storico esistente. Si è costruito il nuovo a partire dal nodo di innesto con l'esistente. Il render del progetto di ampliamento è stato elaborato per meglio esplicitare la sua forma particolarmente complessa.



9. Procedimento di costruzione della forma seguito per il progetto dell'Opera House a Roma (Hadid), sviluppato fino alla realizzazione del modello fisico. La parte più complessa è data dalla forma dell'intero involucro che avvolge gli spazi funzionali, mediante la giustapposizione di elementi triangolari tra loro liberamente aggregati nello spazio. La sua costruzione digitale è stata realizzata a partire dallo sviluppo dei triangoli dell'involucro, considerando per primi quelli a quota 0,00 e facendoli ruotare, a due a due, sul lato appartenente al piano terra, fino a far coincidere in quota i due lati adiacenti al lato di base.

giunto fra i tubolari di spessore 2mm implicava la corretta costruzione della compenetrazione tra cilindri con assi incidenti fra loro.

ULTIME APPLICAZIONI-SPERIMENTAZIONI DIDATTICHE

Nelle ultime sperimentazioni didattiche è stata sviluppata con maggior intensità la modellazione fisica da file 3D³. Sono state prese, quale esempio, alcune opere recenti, di forma complessa, progettate da architetti internazionali⁴. La finalità del corso erano mirate ad utilizzare la rappresentazione digitale, quale metodo per sviluppare la conoscenza del progetto attraverso l'analisi delle geometrie della forma e la loro costruzione mediante l'uso di software adeguati. Il procedimento si sviluppava secondo diversi passaggi: riconoscimento delle forme del progetto e dell'articolazione delle destinazioni funzionali al loro interno, apprendimento dei metodi di costruzione delle stesse mediante software di modellazione 3d⁵, trasferimento dei file in un modello fisico, quale metodo di verifica della corretta esecuzione delle costruzioni geometriche eseguite con i software.

Il riconoscimento della morfologia del progetto, nel caso della Torre del gas (fig. 5), e del Maxxi (fig. 6), è stato sviluppato cercando di scomporre le forme in relazione alle funzioni, ognuna è stata modellata singolarmente e poi aggregata alle altre per sottrazioni booleane. Nel progetto per l'Università di Vigo (fig. 7), invece, sono state distinte le diverse parti strutturali, scomponendo la stratificazione a partire dalle pareti portanti di elevazione, sulle quali sono state sovrapposte le strutture reticolari della copertura, di forma particolarmente complessa.

L'aggregazione delle parti risultava particolarmente impegnativa per il progetto della Town All a Utrecht (fig. 8), trattandosi dell'ampliamento di un'edificio storico esistente, e si è proceduto, costruendo il nuovo a partire dal nodo di innesto con l'esistente. Il render del progetto di ampliamento è stato elaborato per meglio esplicitare la sua forma particolarmente complessa.

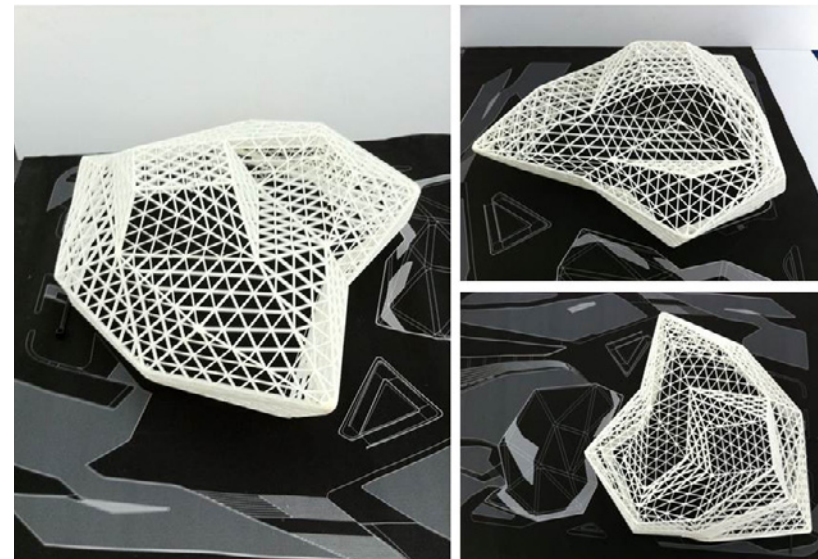
Un procedimento interessante è stato seguito per il progetto dell'Opera House (fig. 9), sviluppato fino alla realizzazione del modello fisico⁶. La parte più complessa da rappresentare era costituita dalla forma dell'intero involucro che avvolge gli spazi funzionali, mediante la giustapposizione di elementi triangolari tra loro liberamente aggregati nello spazio.

La sua costruzione digitale è stata realizzata a partire dallo sviluppo dei triangoli dell'involucro, considerando per primi quelli a quota 0,00 e facendoli ruotare, a due a due, sul lato appartenente al piano terra, fino a far coincidere in quota i due lati adiacenti al lato di base.

Al termine della ricomposizione dei triangoli nello spazio, sono stati arrotondati gli spigoli e posizionate anche le superfici vetrate, rappresentando l'involucro visto dall'esterno, come si può vedere nei render in 3d e nei prospetti.

La struttura è stata disegnata sulla base della forma dell'involucro, suddividendo i lati dei triangoli, in modo da ottenere una superficie reticolare uniformemente distribuita. Particolare attenzione è stata rivolta alla restituzione grafica dei giunti tra le aste, per assicurare la reale continuità delle superfici e, a tale scopo, si è analizzato in maniera approfondita la soluzione costruttiva ef-

10. Il modello fisico dell'Opera House a Roma (Hadid), ha riprodotto esattamente il modello digitale, riportando con esso anche alcuni piccoli errori di disegno. Una dimostrazione evidente della difficoltà di controllare a video il disegno digitale delle forme complesse e un esempio dell'utilità del modello fisico, quale strumento di controllo delle forme e degli elementi costruttivi.



fettivamente adottata e riportata nella modellazione digitale.

L'involucro così modellato è stato successivamente integrato con l'analisi degli spazi interni, di forma abbastanza regolare (l'esploso in basso a destra), analizzati e rappresentati separatamente, per i diversi livelli funzionali. Dall'insieme del progetto, così ricomposto, sono state ricavate le sezioni verticali, riportate in basso a sinistra.

Per il modello fisico si è deciso di utilizzare il file relativo alla struttura reticolare dell'involucro, risultando questa la rappresentazione più complessa dal punto di vista morfologico e caratterizzata dagli spessori molto sottili delle aste strutturali. Si è deciso di adottare il sistema di produzione in abs, che risultava il più idoneo per riprodurre caratteristiche morfologiche e dimensionali così impegnative.

Il modello fisico ha riprodotto esattamente il modello digitale, riportando con esso anche alcuni piccoli errori di disegno, che sono visibili nella fig. 10 in basso a destra. Una dimostrazione evidente

di quanto affermato prima in merito alla difficoltà di controllare a video il disegno digitale delle forme complesse e uno degli esempi relativi all'utilità del modello fisico quale strumento di controllo delle forme e degli elementi costruttivi.

CONCLUSIONI

Abbiamo verificato con queste sperimentazioni l'utilità didattica della modellazione fisica per l'apprendimento di nuovi procedimenti di costruzione delle rappresentazioni digitali. Esse si basano, a mio avviso, su una specie di 'cocktail' di conoscenze di geometria descrittiva, di software di modellazione digitale, di tecniche di prototipazione, da comporre di volta in volta, secondo le caratteristiche intrinseche del progetto.

La precisione del disegno è comunque uno degli aspetti più importanti della rappresentazione del progetto, soprattutto quando essa è finalizzata alla effettiva realizzazione dell'edificio. Obiettivo non facile da perseguire nel caso di architetture di forma complessa, come dimostrano le ricerche

in corso sulla produzione digitale dei componenti. Questo apre nuove frontiere alle discipline del disegno e della rappresentazione, delineando figure professionali specializzate in questo ambito, che già operano nella realizzazione di grandi opere come quelle qui riportate.

La modellazione fisica, dimostrando, come abbiamo visto prima, che viene prodotto ciò che si disegna effettivamente, si definisce in primo luogo come potente strumento di controllo, oltre che di comunicazione immediata del progetto e dei suoi componenti, e di simulazione a scala ridotta i processi di produzione digitale (o cad-cam) degli elementi costruttivi.

E questo è un tema ricco di possibili sviluppi di ricerca.....

NOTE

[] Concorso Internazionale per studenti, "Housing in Malesia" A.A. 2007/08.

[] "Strategie progettuali per un grattacielo ecosostenibile a Torino Porta Susa" (2008), Politecnico di Milano, Tesi di Laurea di Andrea Borghi, Gabriele Lobaccaro, Giulio Zani, Relatore: Prof. Arch. Ettore Zambelli, Correlatori: Prof. Arch. Luigi Carretta, Prof. Ing. Liberato Ferrara, Prof. Ing. Ferruccio Galmozzi, Pro. Ing. Francesco Iorio, Consulenti: Ing. Andrea Colombo, Prof. Arch. Maria Pignataro, Ing. Lorenzo Paolo Rosa, Prof. Ing. Alberto Zasso.

[] Corso di "Modellazione 3D", Prof. Maria Pignataro, Prof. Riccardo Gatti, Laurea in Ingegneria dell'edilizia, Scuola di Ingegneria Edile-Architettura, Politecnico di Milano-Leonardo.

[] Guangzhou, Opera house, Arch. Zaha Hadid; Utrecht, Town Hall, Arch. B. Tagliabue, E. Miralles; Vigo,

Universidade, Arch. B. Tagliabue, E. Miralles; Roma, Museo Nazionale delle arti del XXI secolo, Arch. Zaha Hadid; Barcellona, Torre del gas naturale, Arch. B. Tagliabue, E. Miralles.

[] Sono stati utilizzati i software RhinoCeros, 3Dstudiomax e, in alcuni casi, Grasshopper.

[] Il lavoro è stato sviluppato in particolare da Andrea Guzzetti, nella tesi di laurea: Matteo Capoferri e Andrea Guzzetti "Analisi delle tecnologie costruttive utilizzate nella realizzazione dell'Opera House di Guangzhou attraverso i programmi di modellazione tridimensionale", A.A. 2010/11.

BIBLIOGRAFIA

AA.VV. (2002), Rapid design and manufacture tools in architecture, in Automation in construction, n.11

AA.VV. (2010), Advanced in architectural geometry, Springer-Verlag, Vienna.

Pignataro, Maria (2007), Modello virtuale e modello fisico, un percorso iterativo, in Atti del Convegno Sistemi informativi per l'architettura, EArcom, Dip. ARDUS, Università Politecnica delle Marche, Alinea Editrice.

Pignataro, Maria (2011), Modellando-Modellando, Maggioli Editore, Rimini.

Carpo, Mario (1998), L'architettura dell'età della stampa, Jaca Book, Milano.

Ciammaichella Massimiliano (2002), Architettura in NURBS. Il disegno digitale della deformazione, Testo & Immagine, Torino.

Converso, Stefano (2009) Il progetto digitale per la costruzione. Cronache di un mutamento professionale, Maggioli Editore, Rimini.

Imperiale Alicia (2001), Bidimensionalità, tensioni superficiali nell'architettura digitale, Testo&immagine Ed., Torino