



POLITECNICO DI TORINO

Tesi di Laurea Magistrale in Architettura
per il Restauro e la Valorizzazione del Patrimonio

a.a. 2017/2018

Concezione e ottimizzazione delle strutture a guscio in muratura

Relatore:

Prof.re Paolo NAPOLI

Candidata:

Mariangela ROSSINO



Grazie alla mia famiglia e a tutte le persone che mi sono state vicino lungo questo percorso.





Indice

Introduzione	9
Capitolo 1	
Le strutture a guscio nell'architettura contemporanea	13
1.1 Superfici curve: casi studio	14
1.2 Superfici curve: morfologia	26
1.3 Superfici curve: materiali e strutture	29
Capitolo 2	
Le strutture a guscio nell'articolazione tipologica	37
2.1 Volte	37
2.2 Gusci continui	40
2.3 Gridshells	45
2.4 Gusci in calcestruzzo	48
2.5 Brickshells	50
Capitolo 3	
Progettazione verso l'ottimizzazione	55
3.1 Innovazione di forma e libertà espressiva: le forme libere	57
3.2 NURBS	58
3.3 Impatto dei software CAD e BIM sull'architettura	62
3.4 Collegamento tra la geometria e il materiale	64
3.4.1 Fuller	66
3.4.2 Biomimetica	71
Capitolo 4	
Il ruolo della sperimentazione nella concezione architettonica	77
4.1 La sperimentazione indiretta	77

4.2 La sperimentazione diretta	96
Capitolo 5	
Morfogenesi Computazionale	107
5.1 Programmi	110
Capitolo 6	
Workshop: Morfogenesi Computazionale	121
6.1 Workshop	122
6.1.1 Studio	122
6.1.2 Progettazione	123
6.2 Realizzazione	125
6.3 Considerazioni sul Workshop	127
Capitolo 7	
Brick patterning	133
Conclusioni	137
Bibliografia	141





Introduzione

Il tema sviluppato in questa tesi di laurea magistrale trova riscontro in una attività interdisciplinare tra struttura, architettura, storia contemporanea, calcolo strutturale, "forme", materiali, progettisti, architetti e ingegneri, ... argomenti trattati aventi come obiettivo la comprensione delle strutture a guscio.

In effetti, il presente lavoro di tesi cerca di sondare, attraverso un'ampia e articolata ricerca bibliografica, diverse tipologie edilizie per focalizzarsi poi sulle volte a guscio in muratura.

L'opportunità di questa analisi ha permesso altresì di capire alcune delle metodologie di morfogenesi delle strutture, insistendo poi su quelle più recenti e coadiuvate dall'utilizzo di programmi informatici che sempre più fanno parte della progettazione sia edilizia sia a carattere industriale.

La vastità degli edifici rientranti in queste tipologie edilizie, così come degli architetti/ingegneri che hanno dato forma a queste fabbriche, rendono limitativa e complicata una suddivisione cronologica o tipologica, per cui la soluzione, che è sembrata prestarsi meglio, è stata quella di scegliere alcuni degli edifici non solo significativi che hanno maggiormente attirato l'attenzione di chi ha eseguito questa ricerca.

Anche in questo caso è stata eseguita una non facile cernita tra le proposte scelte ed analizzate.

Lo studio ha avuto una fase preliminare nel corso di un workshop di Ateneo, durante il quale sono stati indagati alcuni aspetti della ricerca della forma collegata alla funzione, all'ambiente nel quale si doveva intervenire. Inoltre le fasi di cantiere, la realizzazione vera e propria dell'edificio, sono stati degli specifici obiettivi.

Va' ricordato che una difficoltà incontrata nel percorso meto-

dologico dello sviluppo della tesi, è stata quella di rendere il più possibile chiaro, semplice ed esplicativo il lavoro, a volte molto complesso, dei procedimenti utilizzati per l'approfondimento dei singoli casi. Inoltre l'argomento della tesi ha richiesto un continuo aggiornamento bibliografico delle più recenti realizzazioni architettoniche e tecniche sviluppate da architetti di fama internazionale. Tuttavia i casi studio, come i grandi esempi, sono stati una guida e un aiuto per le spiegazioni esaurienti dei casi attraverso descrizioni dei procedimenti, dei materiali e delle tecniche.

Con questa premessa, il lavoro di tesi è stato articolato in sette capitoli: dalla lettura delle strutture a guscio nell'architettura contemporanea alle tipologie strutturali e dei materiali, dalla progettazione indirizzata all'ottimizzazione di forma alla morfogenesi computazionale. La fase molto importante ed impegnativa del lavoro condotto è stato il workshop che ha generato l'interesse verso la tesi stessa. A tale workshop è stato dedicato un intero capitolo che ha portato ad una attività esperienziale con la costruzione di un prototipo di volta a guscio in muratura. Tale attività ha trovato riscontro in esperienze didattiche condotte in altri Atenei sia nazionali che internazionali. Con questa esperienza teorico/pratica è aumentato l'interesse nei confronti di questo argomento. Tale lavoro si potrebbe prestare ad un futuro ampliamento e/o approfondimento sulle tematiche descritte.

Capitolo 1

Le strutture a guscio nell'architettura contemporanea

11





Capitolo 1

Le strutture a guscio nell'architettura contemporanea

Architettura e struttura sono sempre state legate tra loro ed hanno caratterizzato il modo di esprimersi della società in cui andavano sviluppandosi. La struttura inoltre, grazie al materiale da costruzione con cui viene realizzata, risulta essere il fattore che consente all'architettura di esprimersi. In tal senso la miglior conoscenza dei materiali e dei loro limiti ha permesso di trasformare ciò che prima veniva visto come un vincolo, limitante la costruzione, in una possibilità espressiva, trovando così architetture che sfidano le regole statiche, fisiche e stilistiche.

La libertà progettuale porta a far aumentare l'interesse verso edifici sempre più spettacolari per forma e dimensioni. Si passa quindi da un'architettura in cui la struttura definisce la forma ad una in cui la struttura asseconda la forma.

Cambia pertanto, nelle architetture contemporanee, il rapporto tra la struttura ed il materiale da costruzione ed è per questo che i progettisti possono pensare ad edifici innovativi e "liberi" per configurazione e forma.

In questo ambito si deve tuttavia tenere conto di una distinzione non trascurabile tra le architetture moderne considerate "libere" per forma, che possono essere realizzate con struttura "tradizionale" o con struttura "non tradizionale". Tra le prime rientrano gli edifici costituiti nella forma

dal cosiddetto “a guscio esterno”: elemento fondamentale della struttura e della forma. Queste presentano ancora un impianto distributivo degli spazi impostato sulla struttura costituita da travi e pilastri. Il guscio è quindi caratterizzato solo dal rivestimento esterno, autoportante, collegato alla struttura interna.

Nella seconda categoria rientrano invece architetture le cui innovazioni riguardano anche l'aspetto strutturale: la struttura non viene più intesa come maglia rigida non necessariamente riconoscibile, come negli edifici costruiti con le regole classiche, bensì diventa una struttura nella quale il sistema travi e pilastri non è sempre facile da riconoscere.

La struttura posta a sostegno dell'involucro esterno, pur essendo necessaria, assume nella gerarchia architettonica un ruolo secondario.

La complessità formale delle strutture si caratterizza per un uso sempre più consapevole e appropriato di materiali strutturali (calcestruzzo armato, acciai, legno, vetro, etc.) consentendo pertanto di rompere gli schemi a maglia rigida.

Struttura ed architettura, tra loro necessariamente legate, raggiungono così l'integrazione tra le numerose innovazioni tecniche e tecnologiche.

Il presente capitolo è stato articolato facendo precedere i casi studio e le grandi realizzazioni architettoniche per definire successivamente la morfologia delle superfici.

1.1 Superfici curve: casi studio

In questo capitolo si è inteso presentare dei casi studio di

grande rilevanza sotto il profilo della storia dell'architettura moderna e contemporanea. Tale attività ha richiesto una ricerca su testi sia a indirizzo strutturale che di tipo architettonico per una migliore comprensione del rapporto tra struttura portante principale dell'edificio e guscio di rivestimento.

La descrizione che si propone riguarda sia gli aspetti tecnici sia tecnologici riguardanti le strutture portanti e le configurazioni architettoniche dei gusci ad esse riferite.

Nel seguito si propongono alcuni casi studio le cui soluzioni sono state condotte per tipologie a "guscio esterno di rivestimento" e a "guscio portante". Vale la pena ricordare che gli esempi riportati sono per alcuni aspetti esemplari del tema cui si riferisce la tesi di laurea, per altri ancora in tema di discussioni per utilità e valore artistico e strutturale. Ma nella scelta è prevalsa la vocazione strutturale del caso studio esaminato.

Rientrano tra le prime tipologie i seguenti edifici:

City Hall, Londra;

Ing House, Amsterdam;

Living Tomorrow, Amsterdam;

Sendai Mediatheque, Aoba-Ku;

nuovo Centro Congressi, Roma;

Forest of Meditation, Kakamigahara;

MAXXI, Roma;

Big Egg, Tokyo;

National gymnasium, Tokyo;

Milwaukee Art Museum, Milwaukee.

1. City Hall: progetto di Foster & partners realizzata tra il 1998 e il 2002 a Londra.

meridionale del Tamigi. Il sito, in cui si colloca l'edificio, è storicamente importante e caratterizzato dai monumenti più famosi della Città.

L'edificio è caratterizzato dalla sua trasparenza e comunicata accessibilità/unione tra interno ed esterno. Progettato utilizzando avanzate tecniche di modellazione digitale, esso rappresenta un radicale ripensamento della forma architettonica, che raggiunge prestazioni energetiche ottimali per la superficie esposta alla luce solare diretta.

La struttura verticale è composta da colonne tubolari in acciaio inclinate (per seguire l'andamento della facciata) che danno forma a due ellissi. Queste si collegano alla struttura centrale in calcestruzzo armato ed alle strutture di orizzontamento, realizzate con una maglia di travi in acciaio connesse a loro volta con le colonne disposte in facciata.

Gli elementi strutturali sono stati pensati seguendo dei moduli standard flessibili così come i nodi di connessione tra le colonne inclinate di facciata e i solai. Per quanto riguarda la rampa elicoidale che percorre tutto l'edificio, è stato utilizzato un supporto strutturale scatolare in acciaio che assume il compito di smorzare le sollecitazioni dinamiche della struttura.

Sulla facciata esposta a nord è stato apposto un rivestimento con relativa struttura di supporto in elementi in acciaio profilato a "T", saldati tra loro, e fissati alla struttura dell'edificio. Il rivestimento in vetro è composto da pannelli con due tipologie prevalenti in base all'esposizione. I pannelli della facciata nord e della rampa hanno forma triangolare e sono fissati all'involucro per mezzo di guide a profilati in acciaio a "T". I pannelli delle zone destinate ad



Figura. 1.1: City Hall



Figura 1.2: Uno dei percorsi della City Hall



Figura. 1.3: ING House.

2. ING House: progetto di MVSA Architects realizzato nel 2002 ad Amsterdam.

3. Secondo le EN AW 5005 (AlMg1-B).

uffici hanno rivestimenti in vetro fissato mediante adesivo al telaio di alluminio sottostante.

All'interno gli uffici sono affiancati da negozi e ristoranti da un percorso a spirale che, collegando i diversi piani, porta in cima all'edificio dove è stato realizzato uno spazio panoramico che ha funzione di belvedere ma che può anche ospitare manifestazioni ed eventi culturali, da un teatro all'aperto e spazi espositivi. Tutti questi servizi favoriscono l'interazione tra edificio e cittadini nello sviluppo delle nuove teorie architettoniche caratterizzanti il XXI secolo.

L'**ING House**² presenta dei supporti triangolari alti da 9 a 12,5 metri. Trasparenza, innovazione, eco-compatibilità e apertura verso l'esterno sono i punti di progetto richiesti dalla committenza.

Caratteristici sono i supporti in acciaio disposti su due file, che sostengono la struttura, con il loro profilo a V. Questi supporti sorreggono il corpo dell'impalcato nascosto all'interno della doppia facciata opaca del primo piano. La *hall*, completamente vetrata, trova posto al disotto di questo volume sospeso. Per quanto riguarda la stabilità trasversale dell'edificio, i progettisti hanno collocato un sistema di travi reticolari all'interno di un involucro costituito da due lastre in calcestruzzo armato.

Il rivestimento scelto per le parti opache dell'edificio è l'alluminio Alcan J57S³, post anodizzato. L'alluminio Alcan è stato scelto perché offre prestazioni estetiche elevate quali leggerezza, lavorabilità, sostenibilità ambientale e richiede bassi costi di manutenzione poiché resistente agli agenti atmosferici. L'involucro è stato studiato per otte-

nere ambienti articolati e suggestivi, alternando vetrate a doppia pelle a camera singola con superfici opache in alluminio, integrando i sistemi di ventilazione. Il materiale scelto per i rivestimenti opachi è di qualità tale da aver consentito l'ottimizzazione dei processi di taglio e piegatura, processi eseguiti mediante tecniche che hanno fatto uso della *computer grafica 3D*. Ogni pannello dell'involucro ha una forma specifica ottenuta dal computer per garantire la massima aderenza alla struttura e resistenza all'aria.

Inoltre, con l'ausilio del *computer*, è stata studiata la migliore sequenza di assemblaggio dei componenti delle diverse parti. I pannelli sono agganciati alla struttura di sostegno, realizzata sempre in alluminio Alcan J57S: l'assemblaggio risulta semplice e tiene conto delle dilatazioni termiche.

Per quanto riguarda il sostegno dei montanti e dei traversi del tamponamento opaco che ricopre la struttura portante e i vani in cui trova alloggiamento l'impiantistica, la soluzione è risultata innovativa. In effetti alla struttura in barre d'acciaio di diverse dimensioni per ottenere le curve che caratterizzano la superficie dell'edificio, e che è fissata alla struttura portante, viene rivettata la struttura in alluminio per l'aggancio dei pannelli.

Le innovazioni tecnologiche riguardano anche i sistemi di climatizzazione dell'edificio e garantiscono risparmio energetico e basso inquinamento.

Il **Living Tomorrow**⁴ è un edificio temporaneo collocato nel quartiere Bijlmer di Amsterdam. Il progetto di riqualificazione rientra tra le innovazioni tecnologiche volte al futuro



Figura 1.4: ING House, effetto ottenuto con l'illuminazione



Figura 1.5: Living Tomorrow.

4. Living Tomorrow: progetto de UN Studio realizzato nel 2003 ad Amsterdam.



Figura 1.6: Edificio Living Tomorrow, visto da strada



Figura 1.7: Sendai Mediatheque.

5. Sendai Mediatheque: progetto di Toyo Ito & Associates Architects realizzata tra il 1994 e il 2008 presso Aoba-Ku, Sendai, Miyagi, Japan.

cambiamento della vita e del lavoro. L'immobile è stato pensato per essere de-costruito dopo 5 anni e i materiali scelti sono riciclabili, ecosostenibili o comunque a basso impatto ambientale.

L'architettura è caratterizzata dall'unione della tipologia a padiglione con la torre che ha dato origine ad un gioco compositivo con un nuovo uso degli spazi. La forma innovativa, ottenuta, ricorda un nastro che si piega a forma di otto racchiudendo spazi chiusi e superfici aperte. Il progetto richiama una forma organica dove le diverse informazioni si completano a vicenda restituendo una trama continua, senza punti di frattura e con discontinuità solo nel "punto di flesso" rappresentato dalla sovrapposizione dei due volumi architettonici.

La struttura portante completamente in acciaio ricalca figure strutturali più o meno tradizionali (pilastri, travi reticolari, travi con curvature). Il rivestimento o il "guscio" ne è strettamente connesso.

I progettisti hanno trovato questa forma con l'ausilio di software di calcolo che hanno facilitato l'integrazione delle tecnologie nell'edificio.

La **mediateca di Sendai**⁵ risulta essere il progetto di punta dell'architetto giapponese Toyo Ito. L'edificio si colloca in una zona centrale che raggruppa al suo interno una serie di edifici pubblici importanti. Il progetto, una scatola di 50x50x37 metri, è articolato su 7 piani di altezza variabile con solai di spessore ridotto grazie alla tecnica utilizzata, il sistema di griglia, che si avvale di un doppio strato in acciaio con travi strutturali interposte.

Tutte le componenti strutturali sono visibili per l'involucro

trasparente, ma la sensazione che emerge è quella di un volume unitario che svolge la funzione di contenitore tecnologico con diverse funzioni. Lo schema richiama forme presenti in natura e viene qui reso da un sistema di tubolari in metallo saldati, che si sviluppano dal piano terra fino alla copertura, forando i diversi piani che attraversano. La struttura nello sviluppo verticale subisce una serie di “torsioni” e “deformazioni”, come per gli elementi naturali.

I pilastri contribuiscono alla suddivisione verticale dei vari ambienti e fungono da contenitori per i vari flussi luminosi, termici e dei collegamenti verticali. All'interno dell'edificio, oltre alla mediateca, trovano posto una biblioteca tradizionale, una biblioteca per bambini, un cinema, postazioni internet e due ampi spazi espositivi.

Il struttura⁶ del **nuovo centro congressi** di Roma è pensata per essere collocata all'interno dello storico quartiere dell'EUR. L'idea progettuale ripartita in tre elementi: la teca, la nuvola, la lama. La teca ha una struttura in acciaio e doppia facciata in vetro e funge da contenitore per la nuvola che risulta quindi essere il fulcro del progetto. Essa mette in risalto il rapporto tra una forma libera ed una definita geometricamente. L'albergo è pensato come elemento indipendente. La nuvola ha una struttura in nervatura d'acciaio rivestita da un telo semitrasparente che costituisce l'elemento caratteristico di questa architettura. Le soluzioni proposte da questo progetto risultano innovative per materiali e tecnologie. Il connubio intende proporre un approccio ecosostenibile ricorrendo ad alcune scelte per ridurre il consumo energetico e la

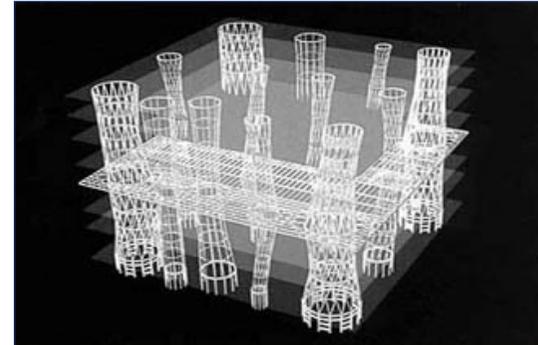


Figura 1.9e1.10: Nuovo centro congressi.

6. Nuovo centro congressi: progetto di Massimiliano Fuksas, 1998-2016, Roma.

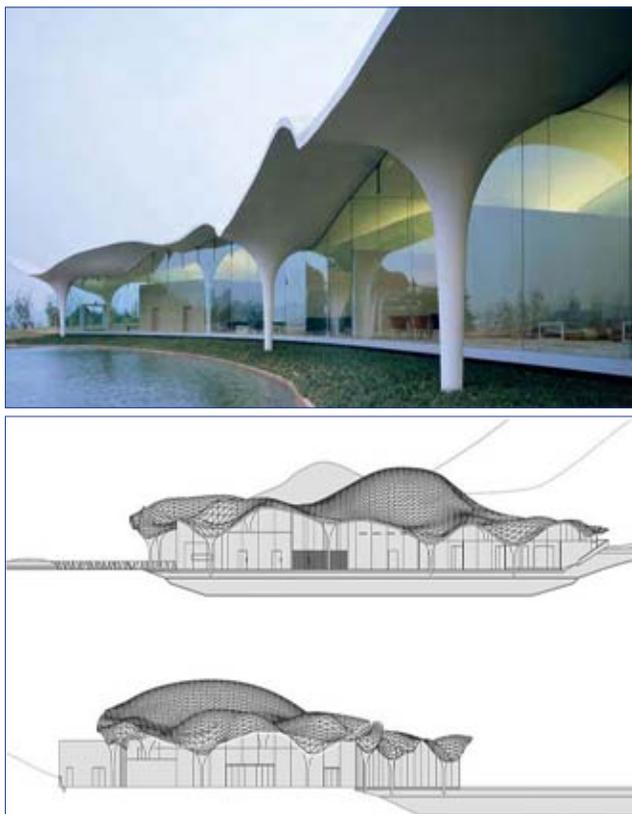


Figura 1.11 e 1.12: Forest of Meditation, crematorium center.

7. Forest of Meditation, crematorium center: progetto di Toyo Ito & Associate, 2006, Kakamigahara, Giappone.

climatizzazione. Punto di forza del progetto è la flessibilità dell'ambiente garantita dalle forme ottenute grazie ai materiali che hanno consentito una libertà progettuale fuori dai soliti schemi; la capienza stimata è infatti di 9.000 posti tra auditorium (la nuvola), sale congressi, ambienti espositivi.

Il **crematorio**⁷ di Toyo Ito, costruito nel bosco ai piedi delle colline che circondano la città di Kakamigahara, è un'opera architettonica elegante caratterizzata da curve che ricordano l'andamento delle colline circostanti. La sensazione trasmessa è di tranquillità e contemplazione in pieno accordo con le funzioni ospitate al suo interno (spazi cerimoniali, aree per la cremazione e per i servizi di supporto, camere per la congregazione, sale di attesa, uffici amministrativi).

L'elemento caratterizzante l'edificio è la copertura. Gli ambienti interni sono parallelepipedi riparati dalla copertura ondulata ottenuta da un getto di calcestruzzo armato.

Il *design* ottenuto è frutto di processi ideativi e tecnologici, sviluppati in collaborazione con i metodi di calcolo, per l'ottenimento di risposte strutturali efficienti. Il getto ondulato, dal quale ha preso forma la struttura, ha uno spessore di soli 20 cm e la curvatura non solo segue direzioni diverse ma tiene conto anche delle curve di livello del sito in cui è collocato l'edificio, integrandosi con il contesto come se fosse un prolungamento delle colline circostanti. Questo edificio di singolare effetto spaziale e formale diventa espressione di un'architettura che mette in relazione tra loro forme/tecnologie che si possono ottenere da

un materiale come il calcestruzzo armato. La copertura, dalla forma libera e leggera, garantisce una stabilità strutturale ottenuta da un'attenta analisi coadiuvata da *software* parametrici.

Il **MAXXI**⁸ di Roma è rappresentato da un'armonia di colori, materiali e forme. Il progetto ha convinto la giuria del concorso grazie alla capacità di integrarsi nel tessuto urbano e per l'innovativa soluzione architettonica, che supera l'idea dell'edificio-museo.

La complessità dei volumi, le pareti curvilinee, il variare e l'intrecciarsi delle quote determinano una trama spaziale e funzionale molto articolata che caratterizza il museo rendendo gli ambienti disponibili ad accogliere ogni tipo di evento: dai convegni alle cene private, oltre alla funzione di spazio espositivo. Questa complessità che caratterizza l'edificio non è percepibile fino al momento in cui il visitatore non si trova al suo interno. In effetti il progetto va ad inserirsi in un contesto urbano consolidato e della preesistenza, alla quale va a sostituirsi. La cortina di facciata è stata mantenuta.

L'impianto a struttura spaziale è dato da una coppia di pareti portanti in calcestruzzo armato collegate tra loro per mezzo di travi trasversali in acciaio, sulle quali poggiano longitudinalmente i travetti prefabbricati che, seguendo il sinuoso andamento delle pareti, scandiscono la copertura vetrata.

Per quanto riguarda l'illuminazione viene privilegiata quella naturale che entra dalle vetrature di copertura del museo. Il meccanismo di schermatura solare è stato nascosto all'interno della struttura portante in acciaio reti-



Figura 1.13e1.14: MAXXI viste dell'esterno

8. MAXXI: progetto di Zaha Adid, 1998-2009, Roma.

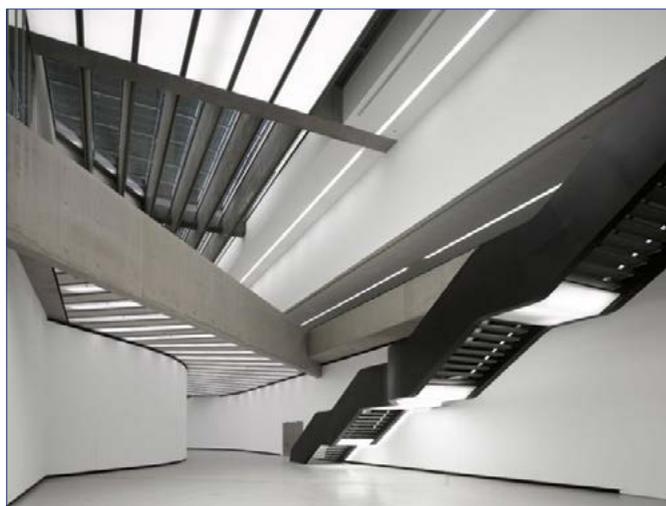


Figura 1.15: MAXXI una vista interna photo © Roland Halbe
Image Courtesy of Zaha Hadid Archite

colare e dal rivestimento in pannelli di fibrocemento, così come l'impianto di illuminazione e i sistemi di ancoraggio per l'esposizione delle opere d'arte. Il progetto risulta molto complesso e ha posto diverse sfide a livello tecnico e tecnologico.

L'adeguamento alle nuove norme antisismiche ha richiesto la ricerca di una soluzione adatta alle dimensioni dell'edificio: il risultato è la scomposizione della struttura in cinque corpi separati ma allo stesso tempo collegati tra loro, tanto che i giunti non sono facilmente visibili in facciata. I giunti di dilatazione pensati per la fabbrica rispondono sia alle esigenze della dilatazione termica dei materiali sia all'assorbimento delle forze sismiche.

La caratteristica strutturale si può individuare in un sistema in calcestruzzo armato assai articolato che, in alcune zone, formano strutture di tipo scatolare ed in altre una serie di gallerie con sezione a "U" e pareti inclinate e curve. Il problema strutturale è reso particolarmente complesso dalla scarsità ed irregolarità dei punti d'appoggio. L'analisi di un'opera tanto complessa ha imposto diversi studi preliminari con programmi in grado di modellare sia porzioni del complesso sia la totalità.

Il processo di verifica della struttura è stato eseguito affiancando ai programmi di calcolo numerosi strumenti: processi semiautomatizzati, *software* specialistici, procedimenti alternativi, controlli manuali su schemi semplificati, modelli parziali delle strutture e dei singoli corpi di fabbrica. Per verificare il corretto funzionamento delle strutture, e l'idoneità dei materiali scelti e dei loro requisiti, sono stati realizzati modelli in scala 1:1 di alcune parti significative. Inoltre il progetto, essendo pensato in calcestruzzo faccia

a vista, ha richiesto lo studio nei minimi dettagli di casseri, giunti, tiranti, etc. In fase di progetto sono state indicate anche le opere di manutenzione da eseguirsi nel tempo.

Il **Tokyo Dome**⁹ conosciuto come “Big Egg”, presenta una cupola a una struttura reticolare, stabilizzata da un carico interno prodotto dalla pressione dell’aria stessa.

La tecnica costruttiva utilizzata richiama quella del ben noto padiglione statunitense dell’Expo di Osaka del 1970. Nel Tokyo Dome trovano connessione le innovazioni tecnologiche e i sistemi informatici. Un sistema tecnologico avanzato monitorizza costantemente i valori della pressione che vengono utilizzati dai dispositivi tecnici del sistema. La copertura è in Teflon ed è sorretta da 14 cavi in acciaio; la pensilina è in vetro ed è sorretta da una struttura reticolare in acciaio vincolata con cerniere agli elementi portanti. La capienza di 50.000 persone, con una disposizione di 13.000 posti a sedere può essere modificata in base alle esigenze legate al tipo di evento ospitato all’interno della struttura.

Il complesso sportivodi Kenzo Tange di Tokyo del **National gymnasium**¹⁰ venne realizzato per le XVIII Olimpiadi. Il centro olimpico è stato pensato per essere costruito lungo il nuovo asse di espansione della città. Il suo aspetto lascia trapelare la funzione tra identità nipponica e linguaggio modernista riguardante gli studi tecnici dei giapponesi relativi agli elementi costruttivi.

Il complesso olimpico si compone di due edifici: due gusci a conchiglia con andamento concentrico.

Le coperture dei due stadi sono sostenute da pilastri di

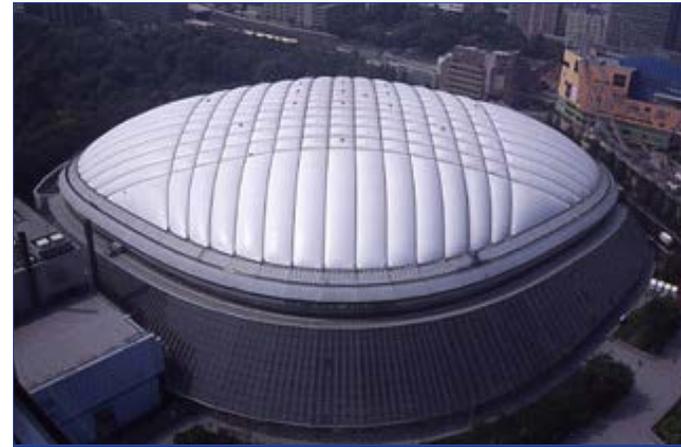


Figura 1.16: Tokyo Dome “Big Egg”.



Figura 1.17: Tokyo Dome “Big Egg”, l’interno.

9. Tokyo Dome “Big Egg”: progetto di Nikken Sekkei, 1988, Tokyo.

10. National gymnasium for Tokyo Olympics: progetto di Kenzo Tange, 1964, Tokyo.



Figura 1.18: National gymnasium for Tokyo Olympics.



Figura 1.19: National gymnasium for Tokyo Olympics, interno.

diverse dimensioni. A metà degli anni '60 queste strutture risultavano le più grandi tra le tensostrutture realizzate fino ad allora.

La pianta dell'edificio è stata ottenuta intersecando geometricamente due rami d'iperbole che vanno inoltre ad intersecarsi tra loro su piani sfalsati. La forma geometrica trasmette un senso di movimento.

Gli elementi strutturali, quali i pilastri in calcestruzzo armato, sostengono la copertura in rete d'acciaio pre-tesa alla quale sono state saldate delle lastre in acciaio. L'andamento della copertura è stato oggetto di studio anche dal punto di vista aerodinamico: per poter sopportare e quindi resistere ai forti venti che caratterizzano la zona. I cavi d'acciaio, a sostegno della struttura, sono molto tesi ed ancorati profondamente a delle basi di calcestruzzo che costituiscono il supporto delle gradinate delle tribune. Il progetto è stato sviluppato intorno al pilastro che viene collocato in posizione centrale rispetto alla pianta: l'edificio pare il risultato di una torsione su se stesso, avendo come asse di rotazione il pilastro, formando così una spirale a sezione iperbolica.

L'edificio esprime un senso di leggerezza, in contrasto con il materiale con cui è realizzato: il calcestruzzo. Ciò è accentuato dalla luce naturale che entra nell'edificio dall'apertura tra copertura e la sua struttura di sostegno.

Il progetto di Calatrava per l'**Art Museum**¹¹ si basa su due principali spazi: la sala esposizioni "schiacciata" verso il terreno per creare un rapporto con il lago Michigan, e la *hall* connessa al ponte pedonale che rappresenta una struttura a sbalzo con tetto mobile. Le due linee oblique

11. Milwaukee Art Museum: progetto di Santiago Calatrava, 2011, Milwaukee.

del molo e del tetto presentano la stessa pendenza per rinforzare la percezione unitaria dell'ingresso e la compenetrazione degli elementi verticali.

Il progetto va ad inserirsi in una preesistenza molto forte, ovvero un edificio progettato nel 1957 da Eero Saarinen¹², come monumento ai caduti, e un'ulteriore spazio espositivo che era stato costruito nel 1975 su progetto di David Kahler¹³. Questo nucleo, che è costituito da una struttura in cemento con geometria rettangolare, collegata alla città da un ponte in cemento, ha un aspetto imponente ma allo stesso tempo non dà all'importante museo identità architettonica e chiarezza funzionale. Con questo intento Calatrava pensa ad un padiglione in contrasto con l'insieme esistente sia nella geometria che nei materiali, una forma bianca di acciaio e calcestruzzo pensato come costruzione indipendente e ampliabile.

La struttura è composta da un'ala lineare, in vetro e acciaio inossidabile, con tetto a lamelle e una struttura cinetica: un *bris-soleil* con feritoie che si aprono e si chiudono come delle ali. Quando questi *bris-soleil* sono aperti la forma assume il ruolo di annunciare l'inaugurazione di nuove mostre.

I materiali utilizzati per realizzare gli elementi strutturali sono ad alta resistenza meccanica e durabilità, quindi ad alta prestazione.

1.2 Superfici curve: morfologia

Il punto di partenza per l'elaborazione di forme complesse sono le *strutture a superficie curva*, che si compongono di una parte strutturalmente resistente con conformazio-



Figura 1.20e1.21: Due viste del Milwaukee Art Museum.

12. Eero Saarinen (Kirkkonummi, 20 agosto 1910 – Ann Arbor, 1° settembre 1961) architetto e designer finlandese naturalizzato statunitense.

13. <https://mam.org/info/pressroom/2014/09/3619/>

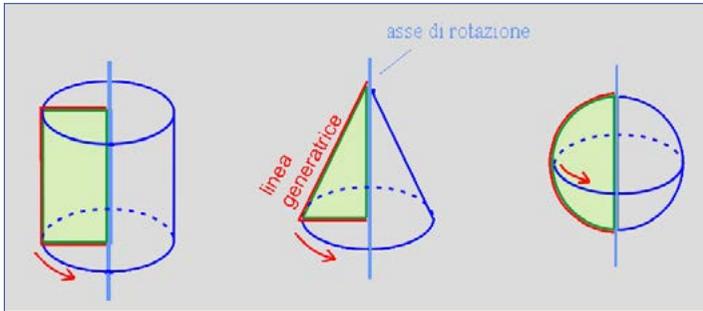


Figura 1.22: Generazione dei solidi per rotazione..

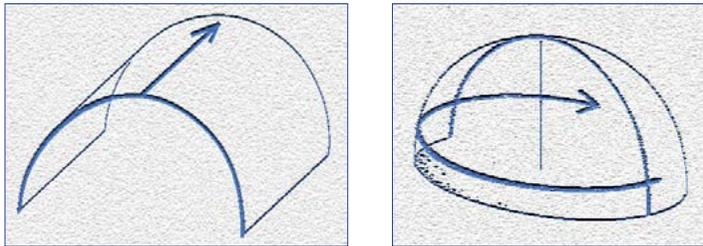


Figura 1.23: a sinistra generazione di una volta a botte per traslazione dell'arco, a destra generazione di una struttura a doppia curvatura (cupola) per rotazione dell'arco sull'asse centrale.

ne tale da garantire la capacità portante, la stabilità e l'efficienza strutturale. Queste superfici sono generate dalla traslazione o dalla rotazione di una curva, che prende il nome di direttrice, rispetto ad un'altra, definita generatrice.

Le generatrici possono anche essere due e, come le direttrici, possono essere delle rette.

Le strutture a superficie curva si possono classificare in strutture a curvatura semplice o a doppia curvatura, a seconda del parametro morfologico che le caratterizzano:

- le strutture a *curvatura semplice* hanno una sezione perpendicolare costituita da una retta e un'altra sezione costituita da una curva; l'esempio principale è costituito dalle **volte a botte**;
- le strutture a *doppia curvatura* hanno le sezioni perpendicolari principali composta da due curve, è questo il caso delle **cupole**. A loro volta si distinguono ancora in *superfici sinclastiche* (ovvero con curvatura dello stesso segno in entrambe le direzioni principali e curvatura gaussiana positiva) e *anticlastiche* (dove in ogni punto la curvatura è positiva in una direzione e negativa nell'altra, con curvatura gaussiana negativa).

Un'altra caratteristica che classifica le strutture a superficie curva è il modo in cui questa viene generata ovvero:

- per traslazione, di una retta o di una curva, secondo una o due direttrici; questo comporta una varietà di soluzioni a seconda delle combinazioni, che possono essere numerose e varie a seconda che si lavori con elementi rettilinei, curvilinei o con entrambi;
- per rivoluzione, generate dalla rotazione della gene-

tratrice (curva o retta) intorno ad un asse rettilineo fisso che può avere andamento sia verticale sia orizzontale.

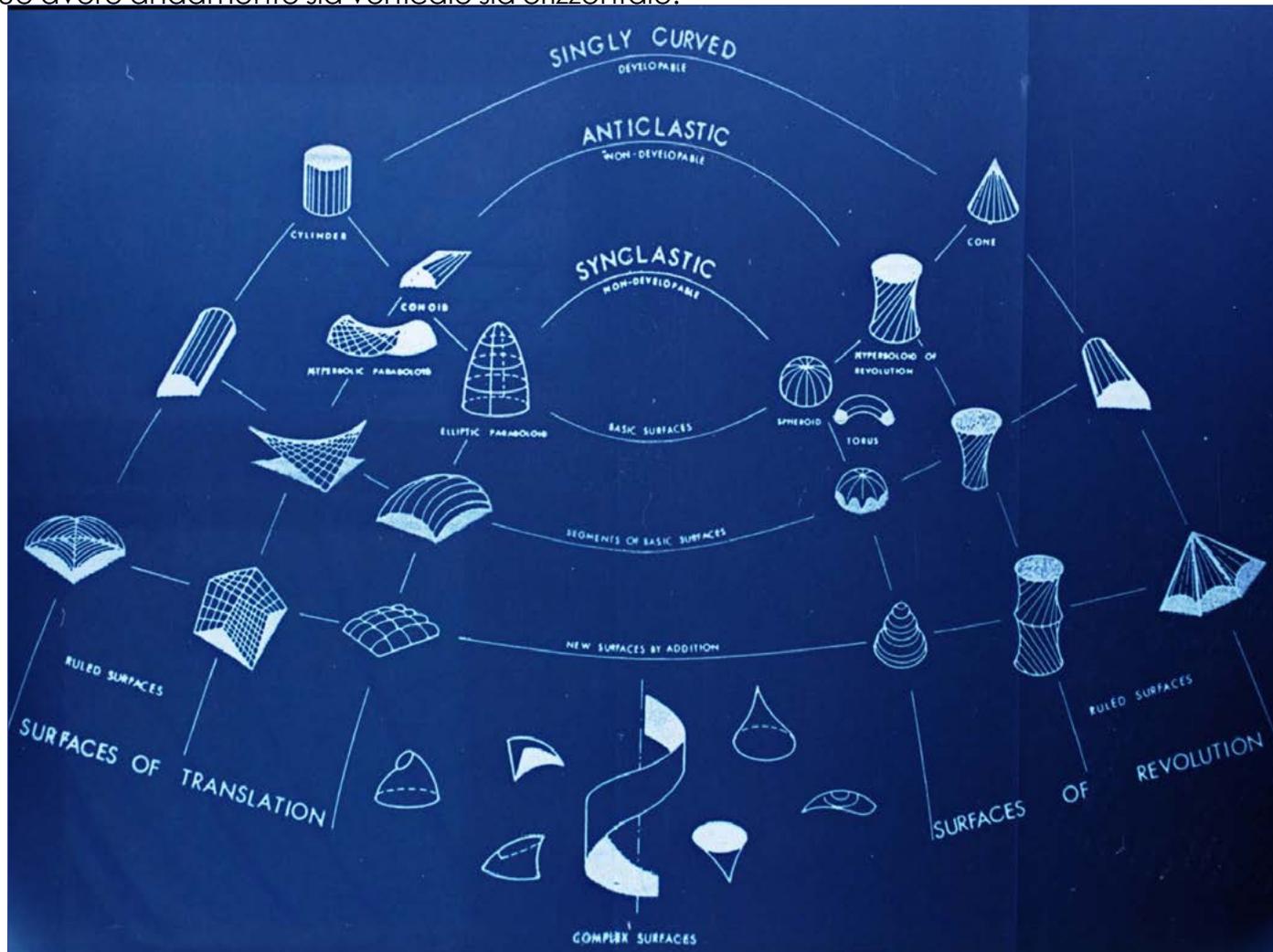


Figura 1.24: Schema riassuntivo delle forme in base alla loro generazione e al tipo di curva (da: Julius Natterer e Thomas Herzog, *Atlante del legno*, Utet, 2004).

1.3 Superfici curve: materiali e strutture

Un'altra classificazione che riguarda le strutture a superficie curva, si basa sulla tecnica costruttiva nel seguito descritta:

- strutture voltate in muratura;
- gusci sottili in calcestruzzo armato;
- gusci autoportanti in acciaio;
- gusci in legno;
- tensostrutture a reti di funi di acciaio;
- tensostrutture a membrane;
- tensostrutture pneumatiche.

Un'ulteriore classificazione è data dalla suddivisione per tipologie strutturali (volte, cupole, etc.) e modelli funzionali (continuità o discontinuità del materiale, caratteristica degli strati resistenti, etc.). Diverse sono le configurazioni all'interno dei modelli funzionali date da strutture che possono essere di dimensioni medio grandi, sottili, reticolari o irrigidite.

Di seguito sono proposti alcuni esempi, i risultati conseguiti da diversi progettisti con i diversi materiali e che descrivono schematicamente queste tipologie di strutture.

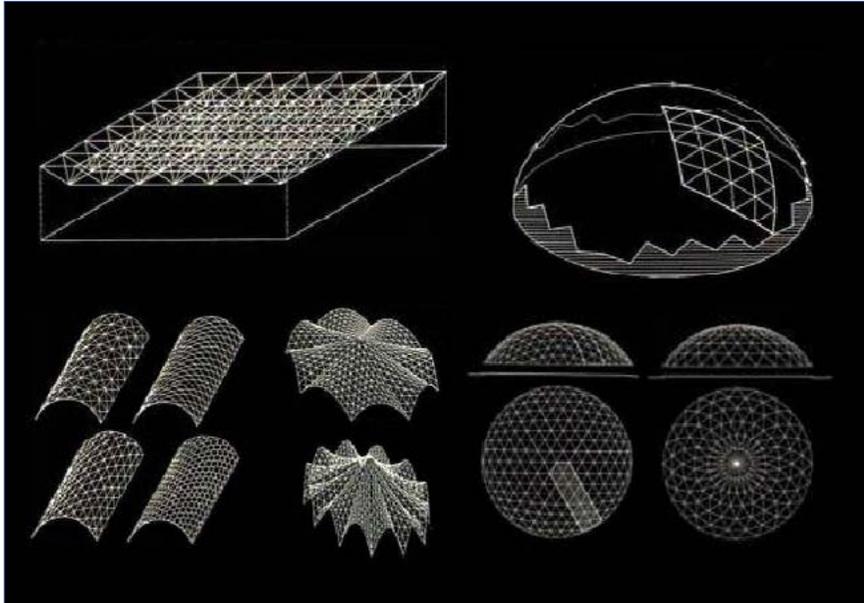


Figura 1.25 Strutture spaziali (rielaborazione) : Reticolari monostrato, Reticolari a doppio e pluristrato, Reticolari spaziali a singola e doppia curvatura



Figura 1.26 Padiglione Fiera Roma (http://www.mbm-vr.it/it/lavori_dett.php?id=3)



Figura 1.27 Palazzo Mauro De andrè, Ravenna. Copertura della sala esposizioni e fiere (www.paladeandre.it/dettstruttura.asp?id=4)



Figura 1.28 (<https://digilander.libero.it/redfisher58821/>)

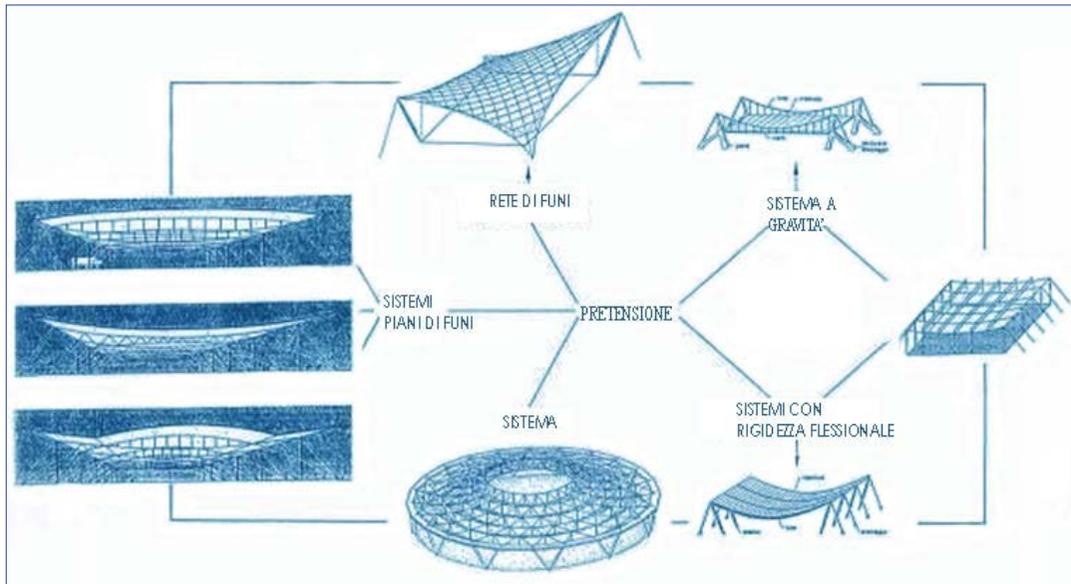


Figura 1.29: Schema metodi di stabilizzazione (rielaborazione): Strutture di cavi per coperture strallate, coperture sospese, travi di funi e reti di funi a singolo e doppio strato



Figura 1.30: Stadio di Braga (Portogallo) da www.corrieredellosport.it/foto/calcio/2017/08/15-4045179/ecco_i_15_stadi_pi_strani_al_mondo/?cookieAccept



Figura 1.31: Mercato di Genova da www.mercatogenova.it/news_leggi.php?id_news=192&gett=s

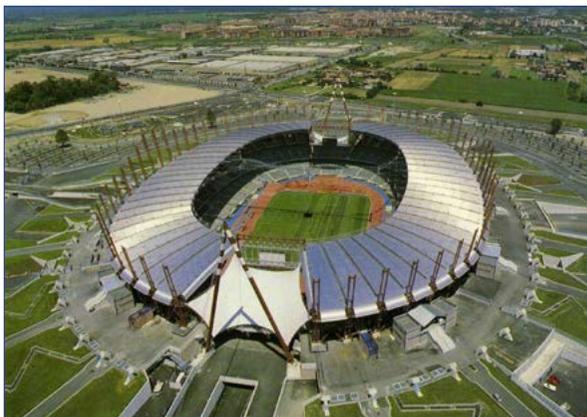


Figura 1.32 Stadio delle Alpi (Torino) da www.gauarena.com/portfolio/stadio-delle-alpi/index.html

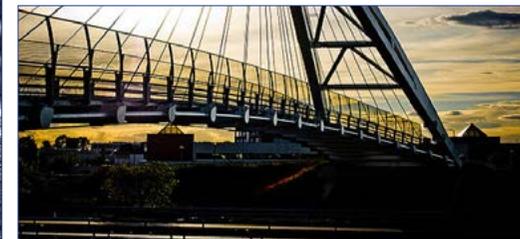


Figura 1.33-1.34 Passerella pedonale a Bologna. Foto di Enrico Celesti da www.flickr.com

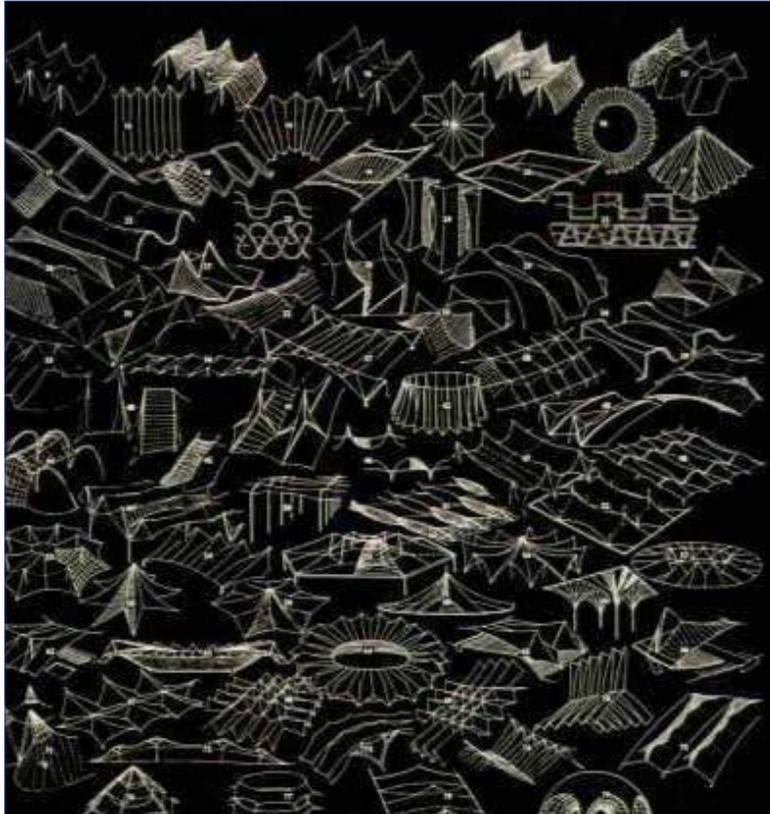


Figura 1.35 Strutture a membrane (rielaborazione): Membrane anticlastiche presollecitate e Membrane pneumatiche



Figura 1.36 Stadio Olympiakos F.C, Atene, da www.patrasevents.gr/article/77038-deite-pos-itan-to-g-karaiskakis-to-1895-pic



Figura 1.37 Stadio delle Alpi, Torino, particolare della parte in con struttura a membrana e dettaglio; foto Studio Ossola

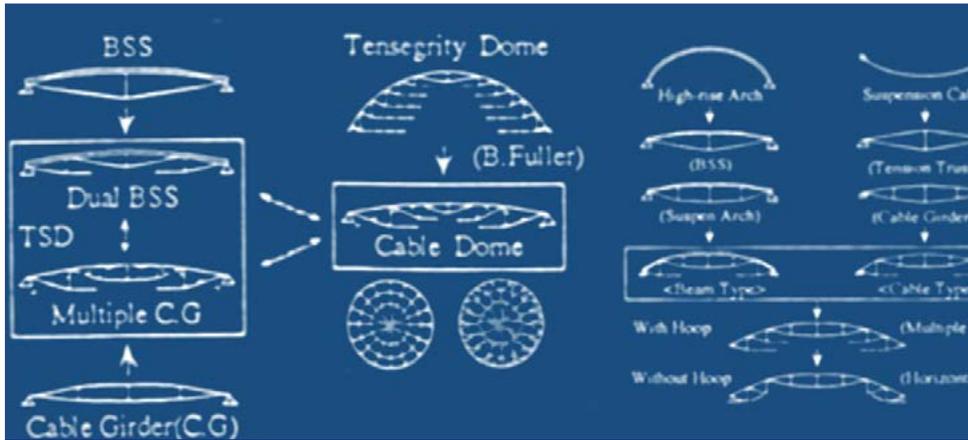


Figura 1.38 Strutture ibride (rielaborazione): Sistema tensegrity, Sistema a trave armata



Figura 1.39: Killesbergturm, Stoccarda



Figura 1.40 Kurilpa Bridge, Australia; da <http://happyPontist.blogspot.com/2012/12/kurilpa-bridge-by-h-beck-j-cooper-part-2.html>



Figura 1.41 e 1.42: Tensegrity Sphäre, fase di costruzione e sfera tensegrale finita, da Markus Heinsdorff





Capitolo 2
Le strutture a guscio nell'articolazione tipologica



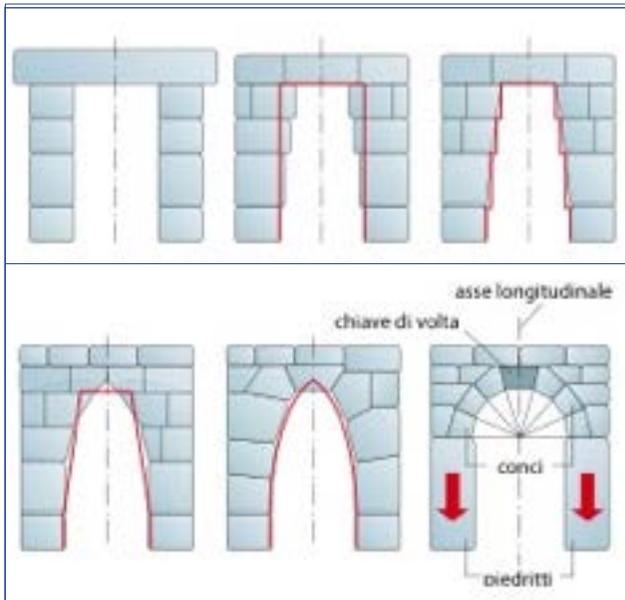


Figura 2.1 Evoluzione dal sistema trilitico all'arco

Capitolo 2

Le strutture a guscio nell'articolazione tipologica

Il presente capitolo parte dalla configurazione delle volte classiche, prendendo spunto dal sistema trilitico all'arco, per arrivare a l'innovazione formale e di materiali in volte sottili - in materiali diversi - con una lettura sulle realizzazioni dei grandi architetti.

2.1 Volte

La costruzione delle volte è un risultato di una conquista che si è protratta nel tempo con successi ed insuccessi; è legata perlopiù ai materiali e ai mezzi di cui potevano disporre i costruttori, ma è soprattutto il frutto di intuizioni e ragionamenti, a volte empirici.

La prima soluzione ideata per coprire un'apertura è stata l'*architrave* ovvero un elemento orizzontale che poteva essere, a secondo del materiale a disposizione: in legno, in pietra o in metallo.

L'*architrave* riceve i carichi verticali li scarica sui due punti di appoggio; questi, a loro volta, si trovano ad una distanza tra loro imposta dalle qualità fisico-meccaniche legate al materiale impiegato.

Per superare il limite dell'*architrave* si passa ad una "nuova" soluzione che prevede la sovrapposizione di una serie di filari di conchi, che vengono sistemati con un lieve aggetto rispetto alla fila sottostante. Con questa tecnica si ottengono delle *volte a pianta circolare* di dimensioni contenute (*tolos*).

Quando gli ambienti da coprire richiesero luci maggiori,

una soluzione fu l'uso dell'arco.

Questa figura strutturale coinvolge le murature di appoggio non solo a scarichi verticali, ma anche a spinte orizzontali. Per sopperire a questo problema occorre aumentare la sezione, con conseguente appesantimento della struttura; per tanto anche questo tipo di costruzione non si collocava tra le migliori per realizzare coperture a pianta circolare.

Le *volte a botte* sono tipologie costruttive che possono essere interpretate in due diverse maniere: la volta ottenuta dalla traslazione dell'arco sulla direttrice, oppure la direttrice che trasla sull'arco. Grande differenza di comportamento, la prima è sicuramente più leggera mentre la seconda più pesante anche in funzione dei metodi costruttivi.

Per sopperire agli inconvenienti richiamati si passò alla realizzazione delle *volte costolonate* dove archi vengono eretti tra i due muri paralleli (dimensionati in modo da sostenere la ripartizione dei carichi). Lo spazio che si forma tra gli archi viene chiuso ottenendo volte che risultano così più leggere. Le *volte a crociera* sono generate dall'intersezione di due volte a botte che si congiungono al centro. La stabilità è aiutata dai costoloni che vengono formati nei punti di intersezione e che poggiano su quattro punti (pilastri o colonne). Largo uso è stato fatto nei secoli di questo tipo di volta la cui variante, la *volta a ogiva*, ha i cui costoloni ottenuti da archi ogivali. Tale tipologia costruttiva ha conosciuto la sua massima diffusione nell'architettura gotica. Anche la *volta a ventaglio* è una variante della crociera ed è costituita da vele conoidali congiunte da nervature. La ricerca delle soluzioni

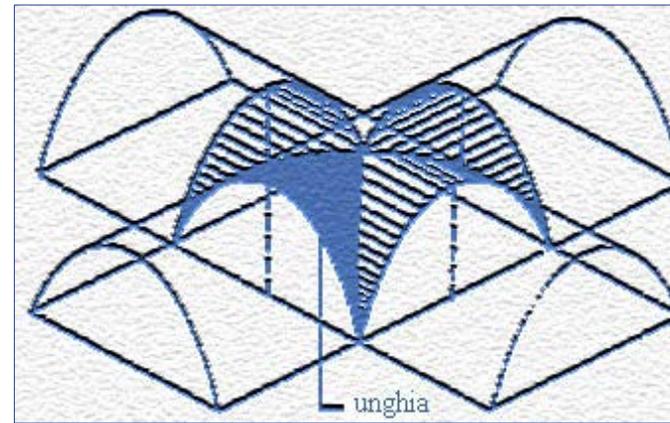


Figura 2.2 Schema costruttivo di volta a crociera

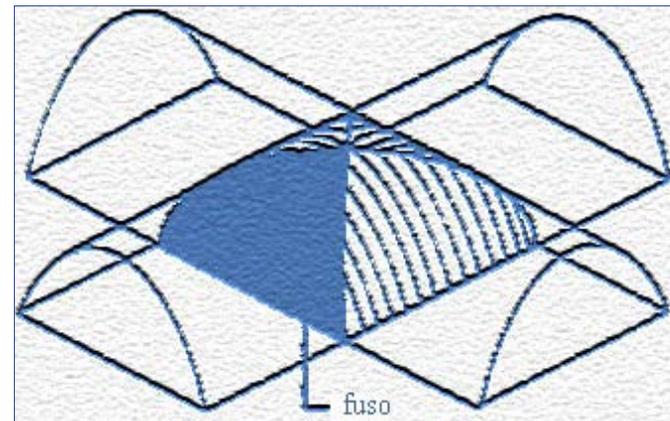


Figura 2.3 Schema costruttivo di volta padiglione

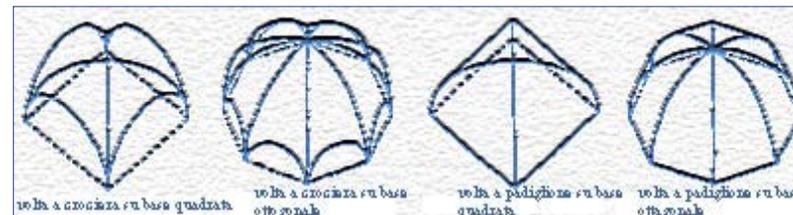


Figura 2.4 Alcuni tipi di volte

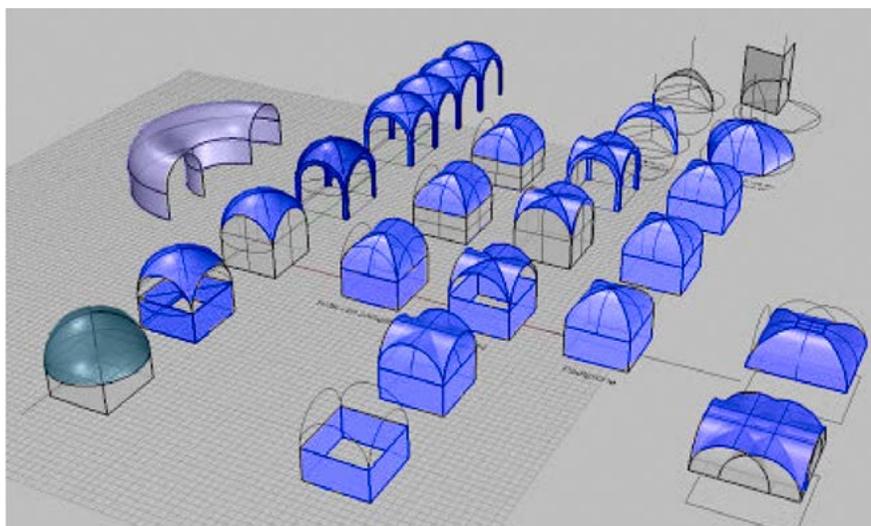


Figura 2.5 Elaborazione delle diverse tipologie di volte con il programma Rhino

per ottenere coperture degli ambienti sempre più adatte alle esigenze spaziali porta alla realizzazione delle *volte a padiglione*, che seguono lo stesso principio, poggianti su di un supporto continuo corrispondente al loro perimetro. Nei paesi dove non è facile reperire il legno necessario per fabbricare le centine¹⁴, prevale la costruzione delle volte a pianta circolare, cioè le cupole, che non necessitano di sostegni durante le fasi costruttive.

La realizzazione delle cupole con conci in aggetto rispetto al filare sottostante, consente di ottenere facilmente cupole con profilo conico. Invece la *cupola ribassata sferica*, richiede le centine. Le *cupole costolonate* possono realizzare coperture di grandi luci: le costolonature sono archi di irrigidimento della volta che alleggerendola permettono di avvicinarsi di più alla forma semisferica. Molto usate le *cupole a doppia calotta*, una interna ed una esterna, collegate tra loro per garantire maggiore rigidità. Il linguaggio geometrico diventa un mezzo di comunicazione per i costruttori legato alle tempistiche dei cantieri che, spesso, avevano una durata di anni con inevitabili cambi di personale che vi lavorava. Le cattedrali gotiche si evolvevano continuamente: per questo motivo la geometria doveva essere facile da visualizzare, memorizzare, trasmettere e riprodurre. Ne consegue la necessità di codificare il linguaggio dell'architettura con la presenza di regole universali dipendenti da un sistema numerico di ispirazione pitagorica. Dai disegni eseguiti dagli architetti nel secolo XVI si può capire come le esperienze venivano osservate, rappresentate e condivise. Si è dovuto aspettare ancora un secolo affinché gli ingegneri fossero in grado di calcolare le strutture delle loro opere prima

14. Strutture in legno necessarie per la realizzazione di archi e volte, poiché sostengono i mattoni durante la costruzione.

della loro costruzione grazie all'introduzione di metodi scientifici ricavati dai trattati e dall'esperienza acquisita, fino ai progressi in campo matematico. Con le scoperte, a partire dal XVII secolo, nei campi della meccanica, della resistenza dei materiali e del comportamento delle strutture si raggiunsero nuovi traguardi che portarono al miglioramento progettuale degli edifici con conseguente ottimizzazione delle caratteristiche di resa strutturale.

Con il lento progredire di innovazioni tecnologiche raggiunte dai moderni materiali impiegati nell'edilizia e con le ricerche effettuate da alcuni ingegneri e architetti, pionieri nel settore, le cupole e le volte hanno raggiunto solo nel corso del XX secolo, dimensioni eccezionali.

I laboratori di ricerca hanno preso in esame nuove morfologie, esplorando percorsi di studio inediti che combinavano ragionamenti matematici, calcoli strutturali e sperimentazioni tecniche anche di tipo industriale.

Dall'osservazione delle forme organiche presenti nel mondo vegetale e animale, gli ingegneri contemporanei hanno raggiunto alti livelli in progetti di strutture voltate nelle quali la morfologia strutturale risulta essere legata alla concezione formale, così come alla natura dei materiali impiegati.

Un ruolo importante è la preparazione del progetto, durante il quale i fattori forme, funzioni, materiali devono essere presi in considerazione in modo armonico perché è da loro che dipende il successo della costruzione.

2.2 Gusci continui

Le *concreteshell* sono strutture realizzate in calcestruzzo,

caratterizzate da sezione molto sottile ed assenza di pilastri all'interno o di contrafforti all'esterno. Questo tipo di costruzioni, che viene anche definito "struttura sottile a guscio in calcestruzzo", viene usato perché può assumere forme con sezioni differenti e coprire luci di notevoli dimensioni con un modesto quantitativo di materiali.

Le *concreteshell* fanno la loro prima comparsa nel panorama architettonico - ingegneristico nel XX secolo, utilizzate per la costruzione di diversi fabbricati come magazzini, edifici industriali, etc...

Le curve utilizzate per la progettazione delle *concreteshell* sono paragonabili ad archi, hanno una resistenza per forma e, proprio per questo motivo, non sono necessari ulteriori rinforzi e sostegni. La doppia curvatura della lastra a garantire la resistenza di questo elemento che diviene, come dichiara Michelis Panayotis A.¹⁵ : «[...] capace di portare non solo secondo la direzione della sua curvatura, come l'arco di pietra, ma anche secondo la sua generatrice. Si passa dal concetto di lastra portante a quello di superficie portante [...] ottenendo così un elemento portante tridimensionale capace di coprire vaste aree con uno spessore minimo: 5-8 cm per 40-50m di portata, lo stesso rapporto tra spessore e larghezza del guscio d'uovo».¹⁶

La più antica costruzione riconducibile ad una realizzazione con questi criteri è il Pantheon di Roma. Assunto da molti architetti come modello per edifici a pianta centrale, in quanto stimolati dal fascino che la cupola emana, e spesso oggetto di domande quali, ad esempio, chi l'ha costruita?, come funziona la struttura?, quali sono i materiali utilizzati?, etc.

15. Panayotis A. Michelis (Patras, Grecia, 20 dicembre 1903 - 11 novembre 1969): architetto, famoso teorico dell'architettura e filosofo dell'arte; focalizzò il suo lavoro sull'estetica dell'architettura.

16. P. A. Michelis, *Estetica del cemento armato*, Vitali e Ghianda, Genova, 1968, pag. 77.

I lavori per la costruzione del Pantheon iniziarono nel 27 a. C. per volere di Agrippa¹⁷ probabilmente seguiti da Valerio Ostiense, e portati a termine nel 25 a. C.. L'edificio presenta tracce di interventi di restauro nel periodo in cui al governo vi era Domiziano¹⁸, in seguito fu necessaria la ricostruzione per via della distruzione del tempio a causa di un incendio (scoppiato nel 110 d. C.) e conclusasi nel 128 a. C. sotto Adriano¹⁹. L'edificio²⁰ si è conservato fino ai giorni nostri grazie ai cambiamenti di destinazione d'uso e soprattutto al fatto che nel 609 d. C. venne adibito a luogo di culto cristiano, senza dimenticare però che l'apparato decorativo non è più quello originale in quanto la rotonda fu soggetta, nel corso dei secoli, a ripetuti saccheggi dei rivestimenti preziosi e alla rimozione di materiali riutilizzati poi in altri edifici.

La *cupola monolitica* (Fig.2.6), del diametro di 43,80 metri che si imposta alla quota dell'attico (30,5 m), è stata realizzata grazie alla messa in opera di una centina emisferica in legno, ancorata al piano del muro cilindrico della rotonda, sulla quale vennero appoggiate le sagome dei cassettoni. Il calcestruzzo, colato a diretto contatto della centina, era costituito da strati alternati di malta e *caementa*²¹ realizzati con mattoni minuti e l'estradosso venne rivestito con un paramento in *semilateres*²². All'esterno l'andamento della cupola segue un andamento a gradoni.²³ I materiali utilizzati per la realizzazione della cupola variarono quando la costruzione arrivò alla quota di 11,75 m sopra il piano d'imposta: vennero sostituiti da strati di tufo e mattoni, materiali più leggeri rispetto a quelli usati fino a quel momento, strati che si alternano fino ad un'altezza di 2,25 m. L'ultima porzione di cupola venne realiz-

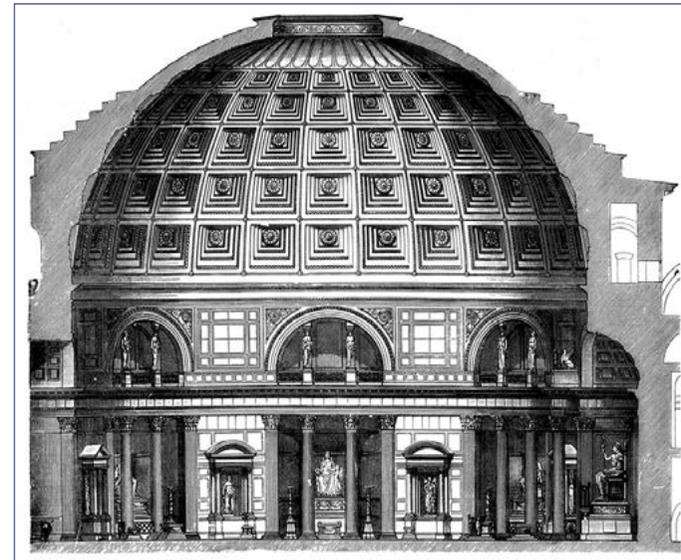


Figura 2.6: Pantheon, Roma.

17. Marco Vipsanio Agrippa [Arpino, 63 a.C. - Campania, 12 a.C.], console romano e genero di Augusto.

18. Tito Flavio Domiziano [Roma, 51 a.C. - Roma, 96 d.C.], imperatore romano.

19. Publio Elio Traiano Adriano [Italica, Spagna, 76 d.C. - Baia, 138 d.C.], imperatore romano.

20. Probabilmente su progetto dell'imperatore stesso con il contributo dell'architetto Apollodoro di Damasco[...] (già architetto imperiale sotto Traiano [...], padre di Adriano), probabilmente i lavori iniziarono già sotto il regno di Traiano e si protrassero fino alla salita al potere di Adriano.

21. *Caementa*: frammenti di pietra o laterizio, costituenti del calcestruzzo e legati tra loro dalla malta.

22. *Semilateres*: mattoni triangolari ottenuti tagliando laterizi quadrati, più grandi, e utilizzati come paramento murario.

23. La cupola venne progettata in modo tale da essere vista all'interno dell'edificio come una emisfera mentre all'esterno l'andamento dell'estradosso è sferico nella parte superiore e a gradoni circolari nella parte inferiore.

zata in tre fasi con materiali ancora più leggeri (prevalentemente con *caementa* di tufo e scorie vulcaniche) e con la progressiva diminuzione dello spessore degli anelli fino a chiudersi intorno all'oculo del diametro di 9 m. L'oculo, resistendo alle spinte di compressione, mostra che la cupola si comporta come una *calotta a doppia curvatura*. Portata a termine la costruzione e rimossa la centina, seguirono le opere di rifinitura in cui l'*estradosso* venne rivestito in *opus signinum*²⁴.

L'edificio alle diverse quote ripropone le caratteristiche dei livelli sottostanti, ovvero archi e volte di scarico con muri radiali come contrafforti. La *muratura a sacco*, costituente il corpo dell'edificio, è stata realizzata per anelli concentrici dell'altezza di 1,20 m e di volta in volta veniva controllata la geometria della muratura prima di procedere alla costruzione dell'anello successivo.

In alcuni punti della fabbrica all'*opus caementicium*²⁵ si affianca l'*opus quadratum*²⁶. L'uso integrato delle diverse tecniche costruttive era molto usato negli edifici, anche in quelli a funzione pubblica, poiché consentiva una realizzazione più veloce ed economica oltre ad una differenziazione delle parti componenti la struttura. Nell'insieme la struttura è stata realizzata dai costruttori in modo da ottenere stabilità per equilibrio delle masse contrapposte, con una sapiente distribuzione dei carichi: concentrati sugli elementi principali di appoggio, e con la collaborazione di tutta la struttura nel sostegno del peso. Quindi la cupola del Pantheon è il risultato di precedenti sperimentazioni che hanno portato all'efficienza tecnologica di questo metodo costruttivo. Tale metodo è legato alla preparazione di malte sempre più resistenti che hanno

24. *Opus signinum* (o *cocciopesto*): si ottiene mescolando della sabbia con della calce forte in rapporto 5:2; l'impasto viene battuto a lungo per renderlo omogeneo e compatto; può contenere anche del pietrame duro. Utilizzato come copertura di edifici o rivestimento di cisterne e piscine per la sua impermeabilità.

25. *Opus caementicium*: muratura realizzata con conglomerato cementizio.

26. *Opus quadratum*: muratura ottenuta sovrapponendo conci regolari

consentito il diffondersi dell'uso dell'*opus caementicium* con la possibilità di realizzare edifici di dimensioni sempre maggiori, man mano che aumentavano le conoscenze. Le sensazioni trasmesse dall'edificio, - uno spazio con nervature che rendono percepibili le geometrie da cui è composto e una struttura dissimulata all'interno degli spessori murari che permette di far apparire la cupola come "sospesa" su appoggi molto esili, - vengono descritte da Riegl nel 1901: «[...] *la sensazione tangibile dell'unità [...] la chiarezza prettamente antica, che non ha bisogno di riflessione; qualità che prese in senso assoluto non possono che portare alla forma materiale solida, senza interruzioni*»²⁷. Anche l'apparato decorativo dell'aula contribuisce ad accentuare questo effetto di leggerezza.

In riferimento alle caratteristiche del calcestruzzo, Sigfrid Giedion²⁸ riferisce della nuova tecnologia costruttiva, con la seguente espressione: « [...] *Quale sarà la copertura del nostro tempo, del futuro grande edificio pubblico? Le lastre in cemento armato, specialmente quelle sottili quanto un guscio d'uovo, che possono essere curvate come un cartone, hanno la vivacità e la durata che apprezziamo [...]*».²⁹

L'applicazione moderna di questa tecnica risale agli anni '20 del Novecento, con l'inserimento di un'armatura di rinforzo all'interno del conglomerato. La costruzione può essere effettuata in loco o prefabbricata negli ambienti di produzione e poi assemblata *in situ*; la realizzazione che offre le migliori prestazioni di resistenza è il guscio monolitico, cioè realizzato in unico getto.

27. Aloise Riegl, *Arte tardoromana*, Einaudi, Torino, 1959, pagg. 38 - 42.

28. Sigfrid Giedion: *Storico dell'architettura* (Praga 1888 - Zurigo 1968).

29. S. Giedion, *Spazio, tempo e architettura*, Hoepli, Milano, 1965, pag. 466.



Figura 2.7: Multihalle di Mannheim, Frei Otto, 1975.

30. Frei Otto: Architetto e strutturista tedesco, nato a Siegmarsdorf (Sassonia) il 31 maggio 1925 - 2015. Dizionario di architettura, Einaudi, Torino, 1992, pag. 477.)

31. Nata come struttura temporanea multifunzionale per una fiera orticola, è una delle più grandi strutture autoportanti in legno, diventato monumento storico-culturale.

32. Citazione di Frei Otto in Juan Maria Songel, *A Conversation with Frei Otto*, Barcellona 2008.

33. Gli studi di questa curva iniziano con Galileo Galilei che però pensa sia una parabola; nel 1691 sono diversi che si interessano a questa curva non algebrica battezzandola appunto "catenaria". Questa curva, detta anche "funicolare", si rifà ad una fune ideale appesa per due punti, ovvero una fune perfettamente flessibile, inestensibile, senza spessore e con densità uniforme. Le strutture realizzate seguendo questo tipo di curve subiscono solo sforzi a trazione, mentre se la catenaria è rovescia allora le forze che agiscono sono di compressione.

2.3 Gridshells

Capostipite di questa tipologia costruttiva è l'architetto Frei Otto³⁰ nella realizzazione della **Multihalle di Mannheim**³¹ realizzata nel 1975, dove l'architetto mise in atto le sue conoscenze, affermando: «Una gridshell è una struttura di barre, curva nello spazio. Le barre formano una griglia piana con maglia rettangolare e distanza costante tra ciascun nodo. La forma della gridshell è ottenuta per inversione di una rete sospesa. Nel modo in cui una griglia sospesa dà la curva ideale di un arco senza flessione, così l'inversione della rete conduce ad una forma funicolare nella quale il gridshell non presenta flessione».³²

Con il termine *gridshell* ci si riferisce a coperture composte da una trama sottile di aste organizzate per superfici semplici o doppie, tramite maglie a trama rettangolare o quadrata. La struttura è autoportante. Una caratteristica molto importante di questo tipo di costruzioni è il comportamento statico: la struttura risulta essere stabile in quanto la griglia ha forma e rigidità di un guscio, ma la superficie non è continua bensì discreta. Gli elementi strutturali sono costituiti dalle aste che risultano collegate tra loro mediante i nodi, ed hanno andamento curvo che segue le superfici del progetto.

La maglia triangolare risulta essere, dal punto di vista strutturale, più idonea in quanto le forze scorrono nel piano e quindi le barre non si flettono; le coperture, che rientrano nelle *Free Form*, sono discretizzate.

Per trovare la forma della struttura *gridshell* il più delle volte si ricorre alle catenarie³³, curve lungo le quali va a di-

sporsi una fune - che si suppone flessibile, non estensibile ed omogenea - appesa agli estremi e lasciata pendere (Fig. 2.3). La fune, soggetta solo al suo peso uniformemente distribuito, assume una forma a catenaria e, una volta capovolta, permette di ottenere una geometria resistente per forma. Uno dei primi ad utilizzare questo metodo in architettura fu Antoni Gaudí³⁴. (Fig. 2.4)

Con questo principio si possono ottenere anche delle strutture complesse: utilizzando una maglia piana deformabile la si sottopone alla forza di gravità dopo averla vincolata, in modo che risulti una geometria corrispondente a un sistema di forze relativo alla combinazione di carico introdotta (funicolare).

Il *form finding*³⁵ può avvenire anche utilizzando il metodo del *Prestress Force*: questo procedimento consiste nel definire la forma della griglia e dei carichi nodali, gli elementi, il modulo elastico, la pretensione dei vari componenti. Attualmente a questa prima fase iniziale segue l'analisi della struttura mediante i software di calcolo strutturale e in base ai risultati ottenuti viene generata la nuova forma rispondente ai requisiti richiesti per la condizione di equilibrio.

La *gridshell* è una struttura che supporta i carichi esterni mediante gli sforzi di compressione; per questo uno dei parametri più importanti di cui bisogna tenere conto durante la progettazione è proprio la verifica della stabilità al carico di punta (compressione). Diverse sono le tipologie di collasso per instabilità che interessano questo tipo di struttura ovvero:

- instabilità dell'elemento singolo,
- instabilità locale,

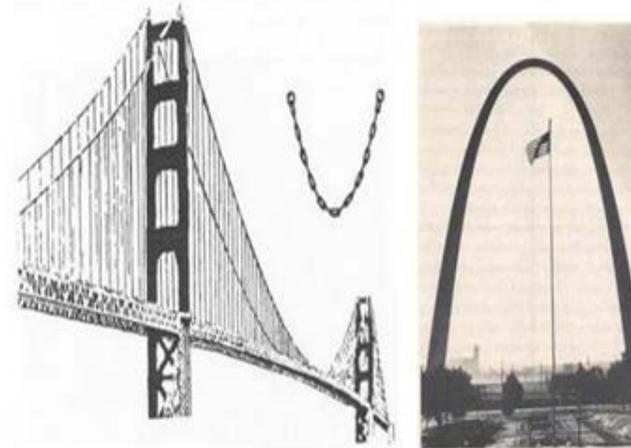


Figura 2.8: Esempi di catenaria da <http://matheusmathica.blogspot.com/2011/04/cuidado-esta-curva-e-uma-catenaria.html>

34. Antoni Gaudí i Cornet: Architetto catalano (Reus 1852 - Barcellona 1926). Le sue opere, stilisticamente lontane dall'architettura ufficiale e quasi ignorate dalla critica a lui contemporanea, che le definì "tardo-barocche, sono caratterizzate da un rigore strutturale sul quale si impostano elementi di fantasia. Lavorò prevalentemente a Barcellona e nel 1883 ebbe l'incarico del completamento del tempio della Sagrada Família, che però rimase incompiuto a causa della sua morte. La sua personalità fu riconosciuta solo dopo il 1928. Studiò molto le tecniche dei nuovi materiali da costruzione, come il cemento, e utilizzando materiali come mattone, pietra, ceramica, vetro e ferro, riuscì ad ottenere elevati risultati espressivi, prestando attenzione anche al tipo di lavorazione, prevalentemente artigianale. Nelle sue realizzazioni Gaudí rifiuta il rigore geometrico della tradizione e per ottenere le forme particolari ricorre agli archi di catenaria, che diventeranno elemento costante del suo linguaggio architettonico. (N. Pevsner, J. Fleming e H. Honour, Renato Pedio (a cura di), Dizionario di architettura, Einaudi, Torino, 1992, pagg. 246-247.). Nella presente tesi: capitolo 4.1, pagg. 77-87.

35. *Form finding*: ricerca della forma

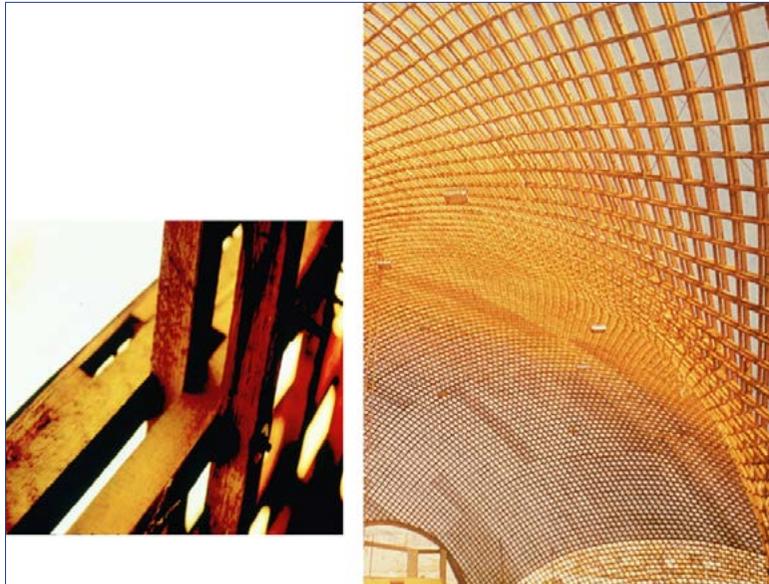


Figura 2.9: Multihalle di Mannheim, Frei Otto, 1975. Vista d'insieme e dettaglio della maglia (Archivio CBC)

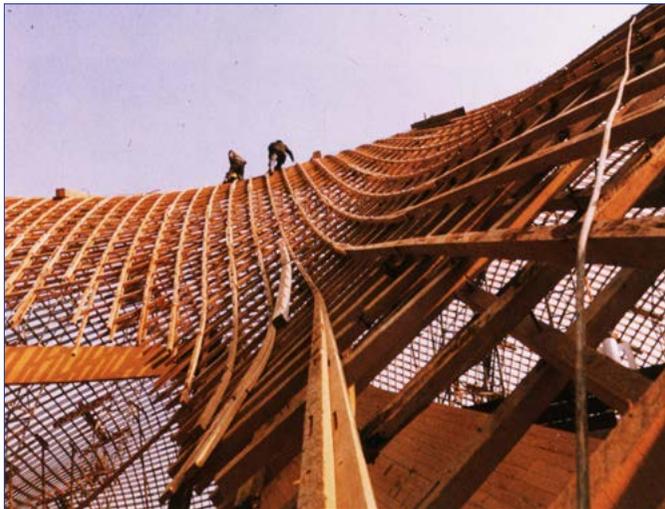


Figura 2.10: Una delle fasi di montaggio della Multihalle (Archivio CBC)

- instabilità globale,
- combinazione di tutte le instabilità precedenti.

In questa tipologia ricoprono un ruolo molto importante anche le cupole geodetiche studiate molto approfonditamente da Richard Buckminster Fuller³⁶.

Le *gridshell* sono strutture architettoniche che possono essere realizzate con diversi materiali, quali ad esempio il legno e l'acciaio.

Per quanto riguarda le strutture in legno si può riprendere come esempio la *Multihalle di Mannheim* progettata da Frei Otto, di cui si è parlato all'inizio di questo capitolo. Il disegno che assume è ottenuto dall'unione dei diversi componenti che sono stati precedentemente predisposti nei punti di incastro. La particolarità della tecnica usata in questo esempio risiede anche nelle fasi di cantiere. Infatti la struttura è stata premontata a terra con i giunti allentati e poi sollevata, per mezzo di gru. Una volta raggiunta la posizione corretta e la forma pensata, i diversi giunti sono stati ripassati per bloccare le aste nella posizione di stabilità.

36. Cfr. capitolo 3.4.1 di questa tesi

2.4 Gusci in calcestruzzo

Le *concreteshell* sono strutture realizzate in calcestruzzo caratterizzate da spessore molto sottile e assenza di pilastri all'interno o di contrafforti all'esterno. Questo tipo di costruzioni, che viene anche definito struttura sottile a guscio in calcestruzzo, vengono usate perché possono assumere forme con sezioni differenti e coprire luci di notevoli dimensioni con un modesto quantitativo di materiali.

Fanno la loro prima comparsa nel panorama architettonico-ingegneristico nel XX secolo, utilizzate per la costruzione di fabbricati come magazzini, edifici commerciali, etc.

Le curve utilizzate per la progettazione delle *concreteshell* sono paragonabili ad archi, hanno una resistenza per forma e, proprio per questo motivo, non sono necessari ulteriori rinforzi e sostegni nonostante le grandi superfici che vanno a coprire: la struttura risulta forte, resistente e sicura.

Molti sono i progettisti che sono stati conquistati da questa tipologia strutturale e si sono cimentati in costruzioni più o meno complesse, sfruttandone al massimo le caratteristiche strutturali.

In questo modo sono state proposte forme edilizie che ben si prestavano ai diversi utilizzi degli ambienti ottenuti e alcuni dei progettisti più "coraggiosi" hanno puntato molto sulle caratteristiche di resistenza strutturale di questo materiale proponendo forme molto complesse come Torroja ma anche sperimentando nuove tecnologie come ad esempio Nervi che ha proposto il "ferrocemento" e la prefabbricazione degli elementi.

L'approccio di Nervi alla progettazione può essere rias-



Figura 2.10 Volta a guscio realizzata in calcestruzzo



Figura 2.11: Pier Luigi Nervi, Palazzetto dello Sport, Roma (1956-1957)



Figura 2.11 Pier Luigi Nervi, padiglione di Torino Esposizioni (1938-1939)

sunto con una delle sue frasi, e precisamente «[...] qualora il tema costruttivo superi certe dimensioni, qualunque ingegnosit  di progettista non riesce a distaccarlo dal binario della pi  rigorosa ubbidienza alle leggi statiche; un arco di ponte di cento o pi  metri di luce avr  oggi, domani e sempre un uguale profilo determinato dalla funicolare dei carichi, n  alcuna volont  umana potr  da esso allontanarlo.»³⁷

Da questo si pu  capire che Nervi applica soluzioni strutturali e formali innovative per migliorare gli schemi gi  consolidati ed adattarli rendendo gli impianti architettonici complessi e funzionali. Il suo lavoro   volto allo studio della tecnica pi  adatta ad ottenere una struttura affidabile, stabile e durevole attraverso l'uso di materiali e tecnologie idonee, cercando inoltre di ridurre gli sprechi. Grande importanza viene data allo studio delle forze che agiscono su di una struttura poich  vanno ad influire sulla forma della struttura stessa, infatti Nervi era solito dire: «[...] Se il complesso dei carichi sar  uniformemente ripartito la «soluzione-tipo», sar  un arco a profilo parabolico n , per variare di tempo, di luoghi o di volont , potr  assumere altra forma[...]».³⁸ Si pu  riscontrare che la maggior parte delle *concreteshell* ha una forma generata da questo tipo curva. Questo perch  la curva parabolica ha una migliore distribuzione delle forze verso terra.

Si evince dall'analisi dei lavori e delle parole di Nervi che le strutture, e le forme che vanno ad assumere, sono il risultato di attenti studi degli equilibri delle forze e delle caratteristiche dei materiali per cui : "[...] i grandi archi di ponti, i ponti sospesi, le coperture di grandissimi locali pubblici, gli altissimi edifici, le grandi strutture portanti si

37. P.L. Nervi, *Scienza o arte del costruire? Caratteristiche e possibilit  del cemento armato*, Edizioni della Bussoni, Roma 1945, p. 71.

38. P.L. Nervi, *Le proporzioni della tecnica*, in "Domus", nn. 264-265, dicembre 1951, p. 46.

avvicineranno sempre più a soluzioni-tipo di ottimo rendimento".³⁹

Riassumendo con le parole trovate nel libro su Pier Luigi Nervi di Argan, la cupola ha avuto per lui un fascino sempre molto forte soprattutto collegata alle innovazioni apportate dalle idee del Brunelleschi e del Guarini che sfidarono la gravità solo con i mezzi architettonici così come Nervi attuò la "razionale" interpretazione della classica forma architettonica attraverso l'uso innovativo del cemento armato.⁴⁰

Tra le realizzazioni più conosciute di Nervi, hanno molta importanza le aviorimesse con impianti planimetrici di grandi dimensioni e altezze non indifferenti, che si presentano con varianti dovute ai miglioramenti nei processi costruttivi e alle enormi potenzialità offerte dal calcestruzzo armato per la costruzione di coperture di grandi luci.

Altro principio importante in Nervi che lo porta ad una progettazione attenta delle sue architetture è il rimando all'insegnamento del "costruttore" gotico, dal quale prende la razionalizzazione dell'opera costruita in un processo il cui intento è la miglior corrispondenza tra forma-funzione e ad un impiego dei materiali in base alla loro natura.

2.5 Brickshells

Questo tipo di costruzione trova il suo più ampio esempio con la tipologia edilizia della volta catalana. Il modo di costruire secondo questa tecnica segue regole ben consolidate nel panorama costruttivo spagnolo, dove le tipiche volte che si ottengono sono il risultato di un sapiente studio del modo in cui vanno disposti i mattoni per otte-



Figura 2.12: Una delle Aviorimesse di pier Luigi Nervi realizzata tra 1935-1942

39. P.L. Nervi, *Struttura e forma in architettura*, in "Domus", n. 374, gennaio 1961, p. 6.

40. G.C. Argan, *Pier Luigi Nervi*, Il Balcone, Milano 1955, pp. 20-23.



Figura 2.11 Struttura a guscio realizzata con la tecnica della volta catalana.



Chicago Fire Cylorama, Scene the First (ichi-63836)

Figura 2.12: Una rappresentazione del rogo di Chicago

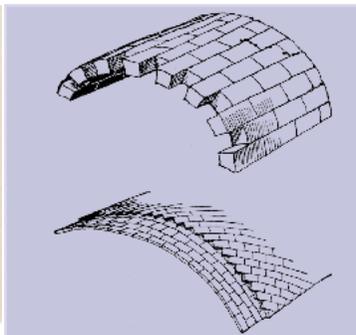


Figura 2.13: Comparazione tra una volta classica e quella catalana

41. Rafael Guastavino i Moreno: Architetto spagnolo (València 1842- Asheville, North Carolina, 1908), laureato presso la Scuola di Architettura del Politecnico di Barcellona nel 1871; costruì diversi edifici in patria dalle abitazioni alle fabbriche. Si trasferì a New York nel 1881 dove continuò a costruire con il metodo catalano e fondò la Guastavino Fireproof Construction Company. Nel 1885 brevettò il Tile Arch System ovvero il metodo di costruzione catalano con archi e volte rivestite da piastrelle in ceramica che proteggevano i mattoni sottostanti in caso di incendio. In territorio americano realizzò circa mille edifici, anche di notevole rilevanza architettonica, e scale alquanto ardite. (www. enciclopedia.cat, Gran Enciclopèdia Catalana)

nere il miglior risultato.

Caratteristica di questo tipo di volta è l'ottenimento per sovrapposizione di due volte nelle quali il corso dei mattoni segue un orientamento diverso nell'uno rispetto all'altro, accorgimento che consente di ottenere volte sottili e resistenti. Questo perché la volta catalana consente di coprire luci di una certa importanza (fino a 30 metri) e può essere costruita anche senza l'uso di centine. Ciò è possibile anche grazie al tipo di mattone utilizzato che risulta essere molto più sottile rispetto ai laterizi tradizionali. L'architetto Rafael Guastavino⁴¹, viene considerato il maggior esponente di questa tecnica costruttiva, e anche quando migrò in America continuò a costruire con questo metodo.

La resistenza al fuoco dei mattoni era già nota e Guastavino la presentò in un panorama ancora sconvolto dal devastante incendio di Chicago del 1871, durante il quale moltissimi edifici andarono distrutti, e mostrando elementi in cotto nel quale lui aveva migliorato la resistenza al fuoco, venne subito incaricato della realizzazione delle opere pubbliche più importanti, e quindi a rischio, di New York, quali stazioni, biblioteche, chiese, etc.

Uno dei principali miglioramenti apportati da Guastavino alla tecnica tradizionale mediterranea delle costruzioni in mattoni, è stato il controllo formale della superficie utilizzando piastrelle smaltate, che realizzavano finiture di qualità oltre ad essere parte strutturale della volta stessa. Dopo il suo arrivo in America nel 1881, fondò la *Rafael Guastavino Fireproof Construction Company*, specializzata nella costruzione di molte sottili in muratura dette anche *timbrel vaults*.



Capitolo 3

Progettazione verso l'ottimizzazione

53



Capitolo 3

Progettazione verso l'ottimizzazione

Il XIX secolo comincia ad interessarsi alla combinazione materiali e superfici minime, tema che continua ad interessare e trovare il suo maggiore sviluppo ancora oggi. L'idea di superficie minima si collega anche alla concezione del risparmio di materiale con conseguente diminuzione dei costi di realizzazione. Nella storia dell'architettura, quindi, riveste un ruolo molto importante l'ottimizzazione della forma strutturale. Questo processo consente il miglioramento della distribuzione nello spazio della materia resistente che ha come conseguenza anche il poter realizzare architetture sempre piú ardite e leggere. Per questo motivo é molto importante l'interesse che gli architetti rivolgono alla progettazione, con un'attento studio di forma e materiali, in modo da ottimizzare le strutture. Inizialmente il processo si basava sull'esperienza e la tradizione, per passare poi al miglioramento della scienza del costruire attraverso il rinato interesse verso la geometria e le proporzioni che da essa si possono ottenere. Si assiste alla nascita degli studi delle catenarie, delle indagini riguardo le proporzioni delle strutture nelle diverse scale, l'uso del modello funicolare per capire l'andamento delle forze all'interno di strutture esistenti (la richiamata curva delle pressioni), lo sviluppo della teoria dell'elasticità, quindi tutta una serie di studi specifici che hanno portato alla modifica della tradizionale scienza delle costruzioni.

L'introduzione della teoria dell'elasticità ha portato allo sviluppo del metodo analitico per il calcolo dei fenomeni statici

cui é soggetta una struttura, che per la sua complessità matematica veniva usata solo nella verifica, non partecipando alla progettazione. Questa limitazione ha portato all'allontanamento tra le figure degli architetti e degli ingegneri poiché i primi sono più portati verso i metodi intuitivi e geometrici della statica grafica rispetto ai secondi, più propensi all'uso degli strumenti matematici. Ancora oggi, si assiste a casi in cui l'interazione multidisciplinare porta alla realizzazione di originali soluzioni strutturali che rientrano nel campo della progettazione strutturale che vengono paragonate a fenomeni naturali, osservati e studiati nel loro modo di funzionare, piuttosto che elementi con progettazione funzionale. Biologia, fisica, matematica, etc. apportano il loro contributo nello studio della distribuzione geometrica nello spazio della materia, intendendo la forma come insieme di rapporti tra le parti. Il naturalista e matematico D'Arcy Thompson (1860-1948) con le sue osservazioni ha innovato le molte strutture. Ad esempio pubblica delle tavole nelle quali studia la distribuzione della materia ossea: questa segue dei canali "statici" dai quali saranno ispirati modelli costruttivi come i solai isostatici. I personaggi che rientrano in questa cerchia mostrano un interesse scientifico che porta alla ricerca applicata per la progettazione strutturale. Si può intendere come risultato di questa collaborazione inetrdisciplinare, le cupole geodetiche, i gusci sottili, le tensostrutture passando dalle forme sferiche della tradizione per arrivare a geometrie innovative definibili libere e sorprendenti per leggerezza e sviluppo formali.

Tra gli esempi più importanti vi sono i lavori eseguiti da Antoni Gaudí, Bukminster Fuller, Eduardo Torroja, Felix Can-

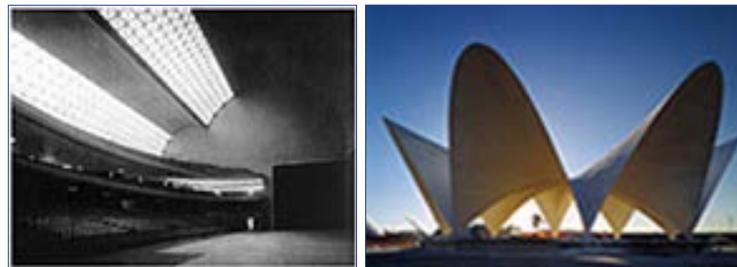


Figura 3.1-3.2: Eduardo Torroja, Fronton Recoletos, Madrid, realizzato nel 1936, demolito nel 1973. Felix Candela, Oceanografico, Valencia. (Foto di Enrique Carrazoni)



Figura 3.3-3.4: Fabbrica di ceramica Solimene, progettata da Paolo Soleri nel 1951, Vietri Sul Mare. Ponte Musmeci realizzato in Basilicata alla fine degli anni '60 (Foto di Roberto Conte).

dela, Paolo Soleri, Sergio Musmeci.

Lo sviluppo delle costruzioni é stato graduale nel tempo e collegato all'evoluzione delle capacità dell'uomo, anche per quel che riguardava l'imitare la natura, nel realizzare il suo rifugio. Tra le diverse tipologie costruttive che vennero realizzate, la volta si andó ad affermare sempre di piú, grazie anche al perfezionarsi della struttura muraria, con l'introduzione di materiali tradizionali quali il legno e le murature. Negli ultimi anni per l'ottimizzazione della progettazione si ricorre a dei programmi - piú o meno elaborati - quali i software di disegno e di calcolo, di cui si specificherá nel capitolo che segue.

3.1 Innovazione di forma e libertà espressiva: le forme libere

57

Da sempre l'uomo, in campo edilizio, é andato alla ricerca di soluzioni sempre piú innovative, se si tiene conto del periodo e dei mezzi a disposizione in quel determinato momento, in cui ha inizio la costruzione. Per quel che riguarda il settore delle costruzioni le "fantasie di architetti ed ingegneri hanno potuto prendere forma grazie alle innovazioni tecnologiche apportate dai materiali da costruzione innovativi, ai quali si sono aggiunti i contributi della matematica e dei sistemi informatici.

L'intreccio che viene a generarsi tra le diverse discipline facilita una nuova poetica strutturale generata dal "legare insieme" diverse parti. La tradizionale concezione fondata sulla rigidità viene affiancata da una nuova realtà organica che si basa su di una forma flessibile ed elastica. Se si passa

alla realtà insustriale, questa ha comportato anche una standardizzazione edilizia, ma sono sempre stati presenti personaggi che hanno cercato di rifarsi alla creatività giunta dalle esperienze d'altri tempi legate all'artigianato, all'architettura "vernacolare" con le grandi costruzioni del passato. Ad esempio Wright trova molto importante imparare dalle «*architetture senza architetti*» realizzate da mestranze che tenevano in grande considerazione la qualità del lavoro. Wright non trascura il rapporto con la natura dal quale prendeva vita la qualità dell'habitat: l'ottimizzazione del rapporto risorsa/ambiente/materiale e tecnologia.

3.2 NURBS

Con queste premesse si intendono presentare le innovazioni nel settore della matematica e precisamente, le NURBS sono la rappresentazione matematica che permette di definire in modo dettagliato geometrie (sia 2D sia 3D) grazie ad una serie di *curve geometriche*. Sono delle superfici che possono essere definite come dei fogli elastici deformabili, e quindi modellabili, assumendo qualunque forma geometrica. Queste vengono definite grazie ai calcoli matematici e possono essere realizzate mediante forme dinamiche, poiché composte da una sequenza di valori relativi e non da punti discreti.

NURBS é l'acronimo di **Non Uniform Rational Basis Splines**, e sono la rappresentazione matematica utilizzata dai software di tipo CAD per ottenere forme semplici ma anche complesse ed accurate.

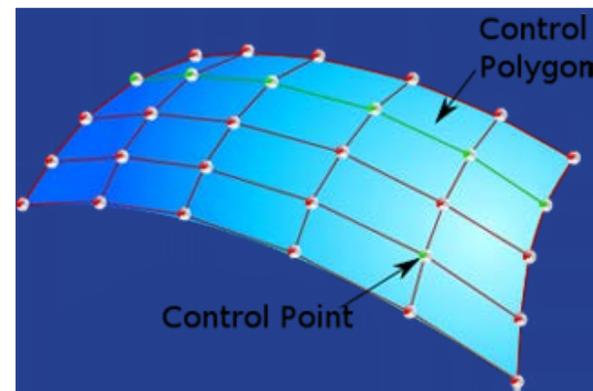


Figura 3.5 Esempio di superficie NURBS

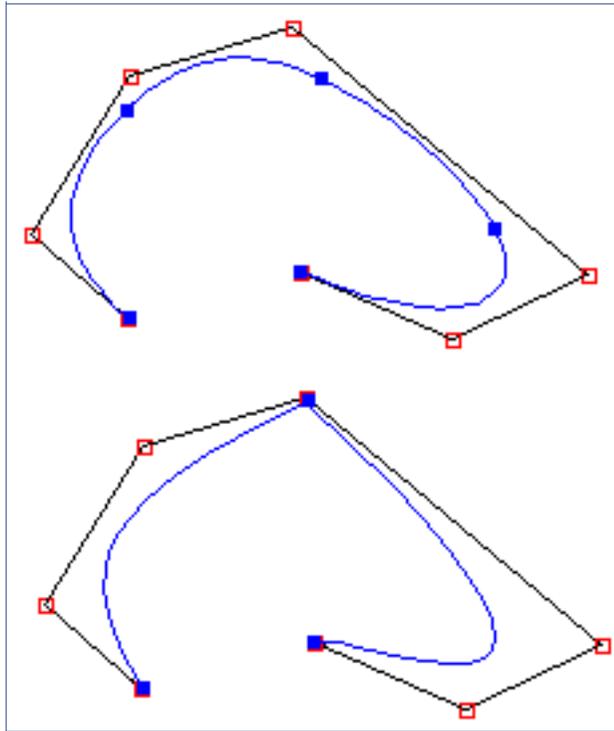


Figura 3.6 Esempio di spline prima e dopo lo spostamento dei punti di controllo

Le superfici ottenute tramite NURBS hanno una serie di punti di controllo che permettono di migliorarne la geometria. Esse sono superfici parametriche dove le coordinate vengono individuate da due parametri indicati come u e v i quali, se mantenuti costanti l'uno rispetto all'altro, permettono di ottenere rispettivamente la direttrice e la generatrice della superficie.

Le superfici sono delimitate da bordi che prendono il nome di *edges*, e sono formate da curve di interpolazione, spline, passanti dai punti di controllo con coordinate x , y , z tra loro uniti dalle linee che costituiscono il poligono di controllo che contiene la curva. Ognuno di questi punti, in funzione della posizione e della forza di attrazione rispetto alla curva, le consente di assumere qualunque forma. Più superfici possono essere unite tra loro ai bordi: se i bordi non vengono modificati prendono il nome di *superfici intere*, o *untrimmed*, in caso contrario si hanno delle *polisuperfici* dette *trimmed surfaces*.

Le caratteristiche che rendono così interessanti le NURBS per la modellazione sono:

- le diverse soluzioni nello scambio delle geometrie anche a livello di programmi di modellazione;
- la definizione è nota e precisa;
- rappresentano sia le figure a geometria semplice, come archi e curve, sia quelle con geometria più complessa, come le *Free Form*;
- una rappresentazione tramite le Non Uniform Rational Basis Splines necessita di un numero minore di informazioni rispetto ad altri tipi di rappresentazione;
- il controllo dei parametri avviene in modo accurato ed efficiente.

Quattro sono i parametri che caratterizzano le curve in ambiente NURBS ovvero il grado, i punti di controllo, i nodi e la regola di stima.

Il grado é un numero intero positivo che può valere 1, 2, 3 o 5 a seconda che stia lavorando con linee e polilinee (grado 1 o lineare), cerchi (grado 2 o cubico) o curve *Free Form* (grado 3 o 5, cioè cubico e quintico). Il grado di una NURBS si può aumentare senza che la forma subisca modifiche, mentre se esso viene diminuito allora essa si modificherá.

I punti di controllo sono dei punti con valore pari ai gradi e consentono di modificare la forma di una NURBS andando a cambiare la loro posizione; questo avviene perché ad ogni punto di controllo é associato un peso che attira la curva, modificandone l'aspetto.

I nodi sono una sequenza di numeri con formula $\text{grado}+N-1^{42}$, la quale dá la definizione parametrica della curva.

La regola di stima é la formula matematica che permette di assegnare un numero ad un punto. Nelle superfici NUBS la formula riguarda il grado, i punti di controllo e i nodi; quindi calcola le funzioni base della *B-Spline*. Il numero dal quale parte la regola di stima prende il nome di parametro ed é il punto di partenza per generare il punto seguendo le indicazioni che vengono fornite dal grado, dai nodi e dai punti di controllo.

All'origine di questo metodo ci sono le *Curve di Bézier*⁴³, oggetti vettoriali che consentono di disegnare linee curve a partire da due vertici e da una serie di punti di controllo, che ne modificano gli angoli di tangenza, definendo una curva continua senza interruzioni. Queste funzioni

42. Il valore di N corrisponde al numero di punti di controllo.

43. Pierre Étienne Bézier (Parigi, 1 settembre 1910 - Parigi, 25 novembre 1999): matematico e ingegnere meccanico; presso lo stabilimento Renault era alle prese con la gestione delle macchine a controllo numerico destinate al taglio delle lamiere per le carrozzerie delle automobili e i problemi, che incontrava nel corso delle lavorazioni, lo spinsero verso la soluzione offerta da questo tipo di curve.

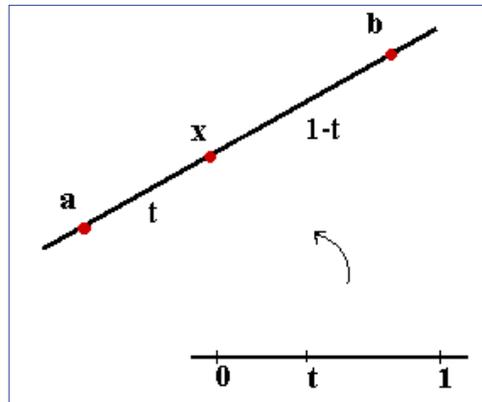


Figura 3.7 Curva di Bézier di primo grado

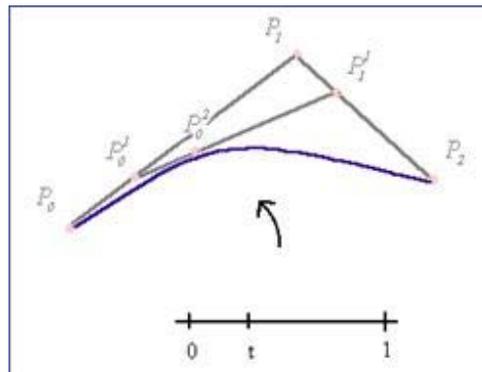


Figura 3.8 Curva di Bézier di secondo grado (arco di parabola)

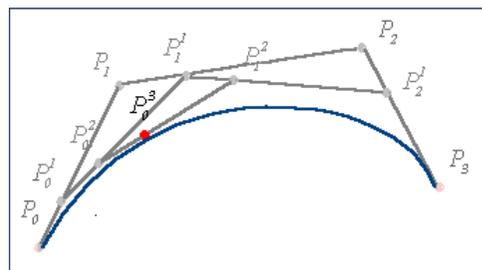


Figura 3.9 Curva di Bézier di terzo grado

parametriche, essendo di tipo analitico, possono variare al variare di un parametro t e il processore che si occupa del rendering calcola l'equazione, disegnando poi la curva corrispondente.

Mentre le *spline* passano per tutti gli n punti di controllo dati e sono composte da $n-1$ segmenti, che risultano essere l'approssimazione di una polinomiale quadratica (o cubica) che passa per due o tre punti di controllo consecutivi, con le derivate prime uguali nei punti di contatto tra i diversi segmenti e, soprattutto, richiedono che le derivate seconde siano 0 in modo da poter risultare linee morbide e continue (con qualche problema legato alla manipolazione poiché piccole variazioni dei punti di controllo possono comportare grandi variazioni alla curva). Le curve di Bézier, al contrario, si compongono di frammenti che iniziano e finiscono rispettivamente in un punto di controllo con ulteriori punti di controllo, detti secondari, che consentono di stabilire che la tangente alla curva passi per i punti di controllo principali e non per quelli secondari. Nel disegno grafico si usano prevalentemente le curve quadratiche (tre punti di controllo) e cubiche (con quattro punti di controllo), ma la curva di Bézier può essere anche lineare (ha due punti di controllo).

A titolo esemplificativo e per rendere maggiormente chiara la diversità dei sistemi descritti si propongono alcuni schemi tratti dalla letteratura tecnica e precisamente...

Queste curve possono essere anche di ordine superiore ma vengono usate di rado poiché comportano alcuni inconvenienti come l'alto costo del calcolo e la difficile manipolazione della curva per via dei troppi punti di controllo, per cui si preferisce ricorrere a più segmenti cubici uniti tra loro.

Le proprietà che hanno facilitato la diffusione di queste curve

sono la continuità e la regolarità che rendono piacevoli alla vista le *Bézier*, ma anche le proprietà matematiche che le caratterizzano hanno contribuito, ovvero il fatto che **la curva è contenuta sempre all'interno** (involuppo convesso) **dei punti di controllo**, non “impazzisce” come le *spline* e vale per qualsiasi ordine.

3.3 Impatto dei software CAD e BIM sull'architettura

Per questo aspetto si è inteso, anche se brevemente, riproporre gli steps dei CAD e BIM, etc. utilizzati in architettura.

In eddetti, le nuove tecnologie informatiche hanno portato allo sviluppo di nuovi programmi per la progettazione e la modellazione 2D e 3D, nonché nelle metodologie di calcolo e di verifica strutturale.

I programmi CAD (*Computer Aided Design*) di tipo vettoriale, da sempre usati per la realizzazione dei disegni geometrici, sono una famiglia di sistemi e programmi *software* per la progettazione assistita dal calcolatore utilizzati per il disegno Architettonico, il rilievo civile, il disegno meccanico e parametrico. L'elaborazione dei progetti con questa metodologia consente di ottenere forme che vanno dalle più semplici alle più complesse ed accurate.

Nel *software* CAD esistono due spazi di lavoro, ovvero lo spazio tridimensionale del modello e quello bidimensionale della carta; le operazioni di modellazione in coordinate globali ed in scala al vero avvengono nello spazio del modello, mentre le impostazioni di stampa sono finalizza-

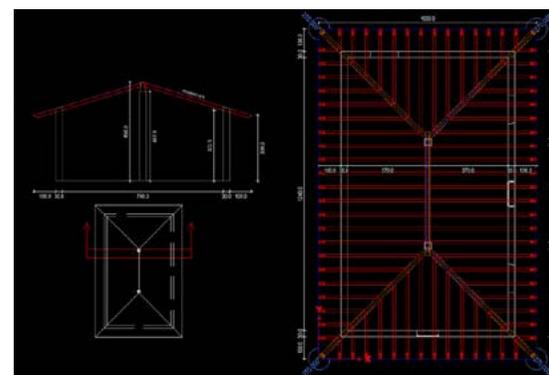


Figura 3.10: esempio di progetto su CAD



Figura 3.11: Esempio di elaborato al BIM

te dal layout nello spazio della carta.

Se da un lato l'introduzione tecnologica nel disegno architettonico sembra aver scisso progetto architettonico e studio strutturale per l'uso di piú programmi informatici, dall'altro l'uso dei piú innovativi strumenti di modellazione sembra riavvicinare i concetti "disegno" e "progetto", ricomponendoli nel duplice significato del latino "designo" che contemplava sia la sfera ideativa della concezione sia quella tecnica del tracciamento grafico.

Mentre i sistemi CAD lavorano mediante primitive geometriche, i sistemi BIM (*Building Information Model*) operano mediante componenti tridimensionali parametriche.

Con questo tipo di software viene quindi realizzato un modello tridimensionale con differenti convenzioni impostate automaticamente, quindi non dall'operatore come avveniva in ambiente CAD.

La maggior parte dei sistemi BIM opera attraverso un'interfaccia utente che permette di visualizzare nello spazio di lavoro qualcosa di molto simile all'elaborato stampato, diviene quindi il file modello l'elemento caratterizzante di una buona progettazione.

L'esportazione dal CAD al BIM si compie attraverso un controllo di unità di misura, sistema di riferimento, layer e colori, avendo poi la possibilità di gestire le informazioni in modo del tutto analogo al controllo di riferimenti esterni.

L'esportazione dal BIM al CAD, consistendo nel passaggio da un modello 3D ad uno 2D, prevede una maggiore attenzione per evitare forti interventi di rieditazione successivi; occorre definire correttamente un ID (numero di colore del *layer*) che definisca separatamente le informazioni in vista e quelle selezionate.

3.4 Collegamento tra la geometria e il materiale

Diversi sono i materiali che consentono di realizzare l'innovazione in architettura. La complessità delle forme di alcuni nuovi edifici non deve condurre fuori seminato. Infatti si potrebbe credere che solo i conglomerati cementizi siano in grado di stare al passo della forma stilistica sempre più complessa, ma ciò non è sempre vero. Non si deve infatti dimenticare che i primi lavori realizzati nell'ottica delle forme libere innovative sono stati incentivati dalle sperimentazioni di materiale sempre più leggero e performante così le volte sottili in calcestruzzo, ma, come insegnano le cattedrali gotiche, anche i materiali tradizionali ben si prestano a queste costruzioni se adeguatamente utilizzati. Quindi mentre le sperimentazioni sul calcestruzzo procedono fino a capirne i limiti, non vengono comunque abbandonati i materiali tradizionali, come legno e mattoni, e neanche gli elementi in metallo che, grazie alla prefabbricazione e il montaggio a secco in cantiere, aprono la strada a nuove costruzioni sempre più ardite. Si può allora vedere procedere quasi di pari passo la diffusione di nuovi brevetti, di nuovi materiali, di materiali antichi rinnovati e di nuove costruzioni, come ad esempio l'Iron Bridge⁴⁴, il Ponte Real Ferdinando⁴⁵, la Biblioteca Sainte-Geneviève⁴⁶, il Crystal Palace⁴⁷, la Galleria Vittorio Emanuele II⁴⁸, l'Home Insurance Building⁴⁹, la Tour Eiffel, il sistema Hennebique⁵⁰ per le costruzioni in cemento armato che potevano quindi venire realizzate sia gettate in cantiere sia costituite da elementi prefabbricati. A partire dalla fine del Settecento molti studiosi, ma anche architetti ed ingegneri, rivolsero la loro attenzione sui materiali

44. Ponte che attraversa il fiume Severn, in Inghilterra, e risulta essere il primo realizzato in materiale metallo. La sua costruzione è iniziata nel 1779 da un progetto dell'architetto Thomas Farnolls Pritchard; è composta da elementi in ghisa realizzati in officina e poi assemblati in situ.

45. Ponte sospeso a catenaria in ferro, il primo realizzato in Italia nel 1832. Costruito per attraversare il fiume Garigliano al confine tra Lazio e Campania, nel Comune di Minturno, su progetto dell'ingegnere Luigi Giura. Demolito nel 1943.

46. Progetto dell'architetto Henri Pierre Françoise Labrouste realizzato a Parigi tra il 1838 ed il 1850. Si caratterizza per una nuova tipologia edilizia che non segue i soliti canoni estetici e strutturali dell'epoca. La parte più significativa dell'edificio è la sala lettura, caratterizzata da ampie aperture con arcate sostenute da colonnine in ghisa.

47. Edificio realizzato a Londra nel 1851 in occasione dell'Esposizione Universale. Installato ad Hyde Park è una grande struttura in ferro e vetro, di stile vittoriano, pensato dal costruttore di serre Joseph Paxton che presentò il progetto più veloce da realizzare in quanto pensato composto da materiali prefabbricati e prodotti in serie. Demolito nel 1936.

48. Passaggio coperto a collegamento tra Piazza del Duomo e Piazza della Scala, a Milano, progettato dall'architetto Giuseppe Mengoni nel 1865. Terminata nel 1877 è una struttura in ferro e vetro di stile eclettico.

49. Realizzato nel 1885 è ritenuto il primo esempio di grattacielo sia per l'altezza (10 piani) sia per la tecnica costruttiva, ovvero il sistema a telaio metallico con pareti in mattoni. Il progetto è di William LeBaron Jenney, ingegnere appartenente alla Scuola di Chicago. Demolito nel 1931.

50. Brevetto registrato nel 1892 da Françoise Hennebique il quale migliorò il metodo di costruzione in cemento armato. Con questo suo brevetto realizzò la sede della sua azienda e, per dimostrare che il metodo era apprezzabile anche dal punto di vista estetico, lo utilizzò per costruire la sua residenza.



ferrosi e sul loro impiego nel settore edile. Successivamente alcuni studi furono rivolti alla considerazione, più o meno critica, delle opere realizzate con questi materiali analizzandone le caratteristiche fisiche e tecniche così come le concezioni strutturali e architettoniche alla base di queste architetture. Obiettivo dello studio era la valutazione del rapporto che si era instaurato tra forma e materia, rapporto alla base delle scelte progettuali a livello architettonico. Il crescente interesse per i materiali metallici, a partire dall'industrializzazione dell'Inghilterra della fine del XVI secolo, portano al miglioramento delle tecniche di produzione e lavorazione del ferro e della ghisa. Innovazioni che concorrono appunto a rivoluzionare le tecnologie nel campo delle costruzioni.

I nuovi processi edilizi sistematici e ricercati dal punto di vista delle soluzioni tecniche e formali, invitano a comparare la razionalità dell'idea strutturale gotica con le nuove soluzioni strutturali, quali ad esempio il telaio o portale in acciaio che si diffonde a partire dal XIX secolo. Questo era possibile perché le diverse applicazioni a cui si prestano i materiali metallici sono stati lo stimolo per la creatività dei progettisti, andando a definire nuove forme a seconda delle funzioni edilizio-architettoniche a cui erano destinate. Un nuovo linguaggio quindi consentì di sviluppare nuove concezioni geometrico-spaziali permettendo il superamento dei vincoli legati ai limiti dimensionali raggiunti dalle costruzioni realizzate con i metodi tradizionali. Il passaggio poi da "ferro e ghisa all'acciaio, permette di assistere ad un ulteriore salto di qualità a livello tecnologico che favorisce una nuova interpretazione architettonica, arricchita dall'abbinamento al cemento con conseguente sviluppo di questa tecnica durante tutto il corso del Novecento.

L'architettura che ripercorre la tradizione, si basa sul sistema trave-pilastro. Essa prende forma dalle ripetute sovrapposizioni di questi elementi, interrotte di volta in volta dall'inserimento delle suddivisioni spaziali, necessarie per definire gli ambienti dell'edificio. Ma tali interruzioni comportano tensioni all'interno del sistema ed è quindi necessario studiare delle soluzioni che consentano di unire gli elementi, legati tra loro, in maniera funzionale. Una soluzione è quella di avere all'interno della struttura una tensione che la sollecita maggiormente. La struttura diventa più elastica e leggera senza tralasciare la possibilità di ottenere luci maggiori, grandi spazi e libere dimensioni. Le possibilità offerte da materiali quali l'acciaio non devono venire limitate ai modelli consolidati nel tempo, ma devono sfruttare le potenzialità che offrono fuori dai soliti schemi. Infatti, l'acciaio con la sua elasticità ha permesso di realizzare sbalzi di notevole aggetto eliminando dall'impianto strutturale ogni soluzione di continuità. Questi cambiamenti modificano la spazialità di un edificio e consentono di abbandonare la forma "scatolare" indirizzando verso una pianta "libera" dalle rigidità strutturali e compositive.

3.4.1 FULLER

Particolarmente interessanti risultano gli studi di Fuller⁵¹ che aveva ideato delle strutture costituite da piani orizzontali sospesi ad un asse verticale centrale. Aveva pensato anche a degli edifici privi del pilone centrale, ma che avevano comunque bisogno di un elemento per la sospensione della struttura al centro; vi era anche la predilezione di un asse di simmetria, quello verticale. In questo modo Ful-

51. Richard Buckminster Fuller (Milton, Massachusetts, 12 luglio 1895 - Los Angeles, California, 1 luglio 1983): inventore, architetto, designer, filosofo, scrittore, conduttore televisivo ma anche professore alla Southern Illinois University. Ha affrontato i problemi della progettazione in modo esauriente e radicale, e con il suo lavoro ha influenzato un'intera generazione di studiosi.

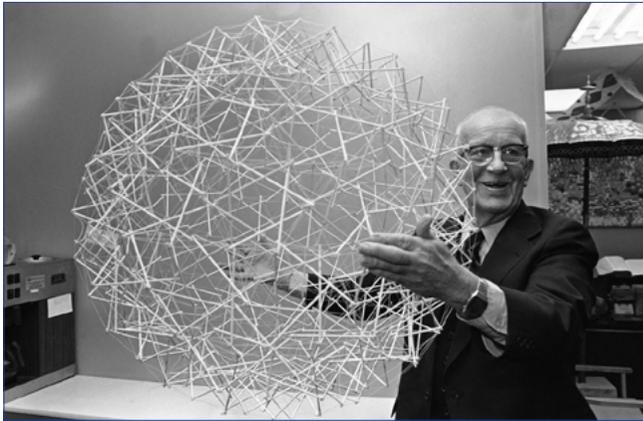


Figura 3.10 Fuller mostra con orgoglio il modello realizzato

ler metteva in discussione il prevalere delle strutture a pianta rettangolare: quindi portó avanti studi di edifici a pianta circolare ed anche esagonale, ma i risultati avevano ancora un richiamo alla perpendicolarità per via dell'impianto organizzativo intorno all'asse verticale. Decise, allora, di approfondire la questione sperimentando strutture dove gli assi di simmetria non sono piú solo ortogonali ma multipli. Si può dire che i suoi studi iniziarono dall'osservazione che, a suo avviso, il sistema bidimensionale di rappresentazione della superficie terrestre fosse insoddisfacente. Decise quindi di trovare una soluzione che consentisse di rappresentare le curve come rette ma senza le distorsioni che si venivano a produrre durante la mappatura. La ricerca lo portó a disegnare su di una superficie piana le circonferenze, ricorrendo all'uso della circonferenza massima dei triangoli sferici e dei quadrati. Prese forma un solido con sei facce quadrate e otto facce a triangolo equilatero, ovvero un poliedro semiregolare detto anche solido cubottaedro (se sviluppato su di una superficie piana prende origine una rete poliedrica). Questa tecnica diede origine alla "griglia regolare" che Fuller utilizzerá sia negli esperimenti strutturali sia nella progettazione delle sue prime cupole geodetiche. Fuller realizzó diversi modellini per studiare le proprietà del solido definito cubottaedro che poteva dare forma ad una struttura di grande stabilità. Gli studi geometrici di Fuller spaziavano dal macroscopico (ad esempio la geometria del globo terrestre) al microscopico (ad esempio la struttura molecolare dei cristalli) ed uscendo dai rigidi confini delle dimostrazioni, matematiche e geometriche. La robustezza della struttura raggiunge il livello piú elevato quando il solido é sospeso dal nodo centrale, che é a sua volta collegato a tutti i vertici del solido, altrimenti la

struttura risulta fragile ed instabile. Questa caratteristica del cubottaedro aveva incuriosito Fuller tanto che questi portó avanti diversi studi su prototipi realizzati con nodi flessibili in gomma: esercitando una pressione sulle facce triangolari il corpo centrale si torceva per poi tornare alla forma di partenza una volta rimossa la forza.

Nel corso di queste sperimentazioni prende forma l'*icosaedro*⁵² che dá origine alla struttura della cupola geodetica, il cui primo esempio venne realizzato per l'expo che si tenne a Montreal nel 1967 (Fig.3.13).

Gli studi sulle cupole geodetiche furono portati avanti anche grazie all'interesse verso la realizzazione di strutture leggere. Le ricerche iniziarono a partire dalle figure simmetriche che si possono ottenere tracciando le circonferenze massime su di una sfera. I primi modelli, realizzati in filo di ferro, hanno evidenziato che maggiori erano le circonferenze massime realizzate, maggiore era la robustezza mostrata dal prototipo. Le cupole geodetiche, basate sull'icosaedro, estese per formare delle sfere, mostrano dodici pentagoni corrispondenti con i vertici dell'icosaedro stesso e questa simmetria é una delle caratteristiche di questo tipo di cupole. Le suddivisioni che prendono il nome di "frequenza" della cupola indicano anche quanti puntoni sono necessari per la realizzazione di ogni parte della cupola. Il primo esperimento di realizzazione di una cupola a grande scala, insieme a degli studenti, partí dal modello a trentuno circonferenze massime e venne costruito con le bacchette metalliche delle tende veneziane in modo che i puntoni seguissero il tracciato delle circonferenze (non essendo di materiale rigido); ma la struttura del diametro di 20 metri



Figura 3.12 Fuller con il gruppo del workshop testa la resistenza della cupola

52. Solido con 20 facce a triangolo equilatero.

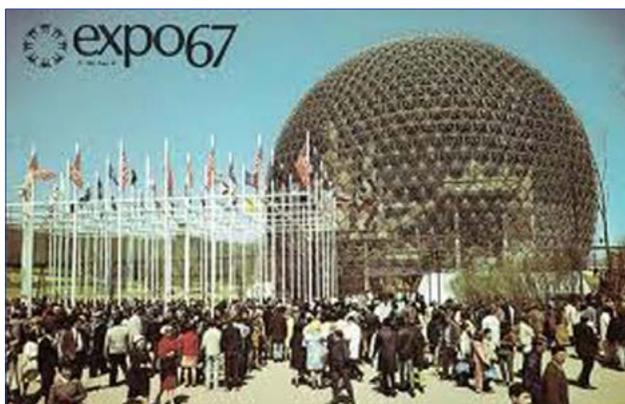


Figura 3.13: Cupola Geodetica realizzata per l'Expo di Montreal 1967 (foto del 1889); da <http://hearthisyoucreators.blogspot.com/2012/10/geometric-structures-at-montreal-expo-67.html>

non fu in grado di reggersi. L'insuccesso portò Fuller a continuare a perfezionare i puntoni costituenti la struttura della cupola e, infatti, mise a punto un sistema di tubi metallici rigidi all'interno dei quali venne fatta passare una corda: questa volta la cupola basata sulle 31 circonferenze massime rimase in piedi e diede inizio al sodalizio con le autorità militari statunitensi che scelsero questo tipo di struttura per alloggiare le strumentazioni durante le missioni. Questo tipo di puntoni causavano ancora delle labilità nei punti in cui solo due andavano ad incrociarsi. Il passaggio successivo, che ha portato alla struttura di Montreal, fu suddividere le facce triangolari dell'icosaedro a formare una griglia. Non venivano più disegnate tutte le circonferenze massime tracciate dai poli di simmetria della rotazione dell'icosaedro con i punti di intersezione individuati come nodi, bensì ogni faccia del triangolo veniva suddivisa in ulteriori triangoli sferici, più piccoli. Per tanto gli archi di circonferenza massima vennero usati per individuare le perpendicolari in modo da tracciare la "griglia regolare". In questo modo i puntoni andavano a coincidere con la corda dell'arco di circonferenza massima di unione tra due nodi adiacenti, e la lunghezza non sarebbe più stata costante bensì diversa a seconda delle caratteristiche elastiche della cupola. Furono due ex studenti⁵³ di Fuller a progettare nel 1950 il prototipo della cupola che venne realizzata a Montreal, usando il metodo della "griglia regolare", la quale risultò allo stesso tempo robusta e leggera per via del materiale utilizzato, cioè tubi di alluminio. Inoltre da ogni nodo partivano dei piccoli pali che, irradiandosi verso l'esterno, tenevano dei fili in tensione la cui funzione era quella di irrigidire la struttura. La cupola venne completata andando a disporre una copertura in tela al di sotto del te-

53. Jeffrey Lindsay e Don Richter.

laio in alluminio. Questo progetto presentava ancora dei difetti, infatti non si riuscì a collegare perfettamente i puntoni nei vertici nonostante si avvalsero di trigonometria e calcolatori. Vennero pertanto elaborate diverse tipologie di griglia per trovare la soluzione al problema tra cui la "griglia alterna" che permetteva di ottenere dei triangoli più piccoli consentendo

di ricavare matematicamente i puntoni con risparmio di tempo, e anche sui costi, poiché le lunghezze non erano troppo diversificate. Ricorrere alla cupola geodetica, una struttura dove le forze di scarico sono ridistribuite su tutte le parti che la costituiscono, ha cambiato la redistribuzione degli spazi interni che ora risultano davvero liberi e non costretti dalla presenza di pilastri o muri di sostegno. Le cupole geodetiche sfidano l'asse verticale, permettendo a Fuller di superare le costrizioni della simmetria. Inoltre queste non prendono spunto da studi volti a risolvere i problemi delle controventature, ma da un'analisi più complicata che tiene conto di diversi fattori portandoli a lavorare insieme: da qui il termine di strutture "sinergiche".

Gli aspetti che vennero considerati per migliorare la progettazione della cupola geodetica furono anche la fabbricazione industriale, la facilità del trasporto (ad esempio trasportare cupole già edificate per via aerea), autosufficienza nel

montaggio (dovevano poter essere costruite anche da personale non qualificato), guscio che poteva contenere al suo interno qualsiasi destinazione d'uso (dall'unità abitativa alla produzione industriale).

Tra tutte le cupole geodetiche realizzate da Fuller e dai suoi collaboratori, quella realizzata per l'esposizione di

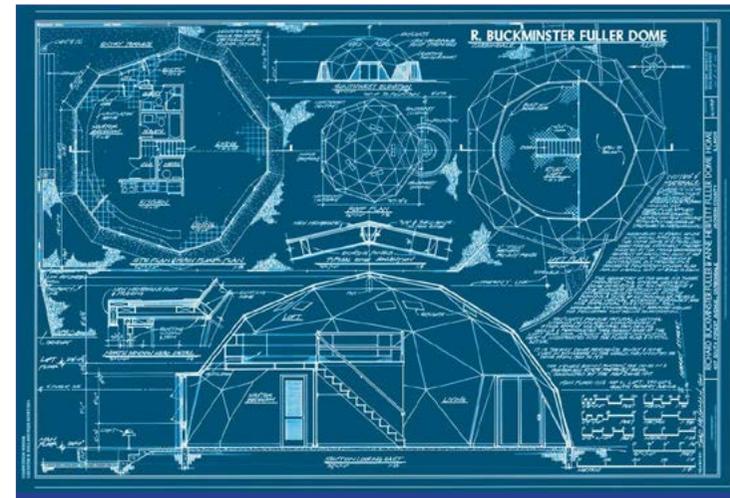


Figura 3.14 Riproduzione del modello di Buckminster Fuller Dome Home disegnata da Thad Heckman; da sometimes-interesting.com/2015/06/18/buckminster-fullers-home-in-a-dome/

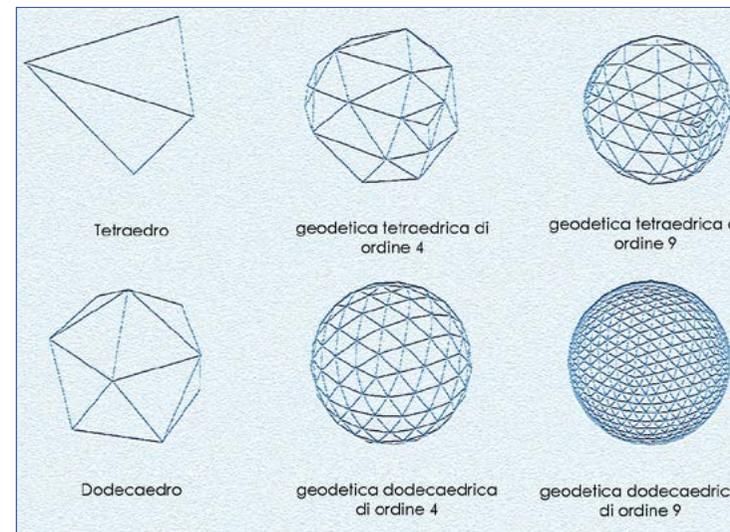


Figura 3.15 Rappresentazione delle sfere geodetiche generate a partire da un tetraedro e da un dodecaedro (rielaborazione)

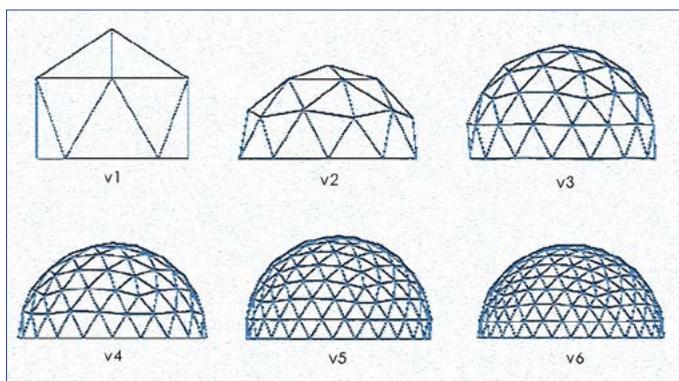


Figura 3.16 Rappresentazione grafica di cupole geodetiche con diversi vincoli

Montreal rimane la più importante: dal diametro di oltre 76 metri, tre quarti di sfera con, al di sotto dell'equatore, delle circonferenze inferiori alla circonferenza massima, e struttura geodetica al di sopra dell'equatore.

Gli studi di Fuller proseguirono con le strutture ultraleggere dalle quali nacquero sistemi strutturali che presero il nome di "tensegrali" ovvero strutture nelle quali si univano tensione e integrità. Ciò dimostrando che le tensostrutture potevano estendersi in tutte le direzioni per creare reticoli di forze in reciproco equilibrio. Fuller aggiunse nelle cupole geodetiche di Montreal alcuni elementi "tensegrali" per assicurare maggiore robustezza.

3.4.2 BIOMIMETICA

A conclusione di queste osservazioni, appare utile e interessante richiamare la "biomimetica" o "imitazione della natura" come ispirazione. In effetti, la Natura è in grado di creare delle forme spettacolari, complesse, ardite, strutturalmente e staticamente perfette che da sempre affascinano l'uomo, tanto da portarlo a compiere una serie di studi volti a capire il meccanismo per poterlo poi ricreare in scala diversa. Questa scienza prende il nome di biomimetica e si può definire, appunto, come lo studio dei processi biologici e biomeccanici della Natura, che vengono poi presi a modello e usati come linee guida della progettazione.

Viene considerato uno tra i primi esempi di biomimetica il velcro, inventato nel 1948 da George de Mestral⁵¹ ispiratosi ai pallini spinosi di nappole, i quali rimangono attaccati agli indumenti.

Il riferimento più usato è quello dei frattali⁵², ovvero figure geometriche la cui caratteristica principale è il fatto che la

54. George de Mestral (Nyon, Svizzera, 19 giugno 1907 - Commugny, Svizzera, 08 febbraio 1990), ingegnere.

55. Figura geometrica derivante dal frazionamento della successiva ripetizione di una forma iniziale; queste possono ripetersi infinite volte e le dimensioni delle singole forme diventano infinitesime mentre il cono della gura complessiva tende ad assumere una dimensione infinita (perimetro infinito, area finita). La teoria dei frattali deriva da concezioni topologiche, ed è stata elaborata da B.B. Mandelbrot nel 1975, comunque è dimostrato che i frattali esistono realmente in natura.

loro struttura si ripete all'infinito, con scala decrescente. Rientrano, quindi, in questa categoria quegli elementi che presentano una caratteristica come l'autosimilarità, ovvero l'unione di copie di se stesso a scale differenti. Le dimensioni di autosimilarità risultano maggiori rispetto alla dimensione topologica: rappresentate in uno spazio a due-tre dimensioni la loro dimensione non è intera, cioè la lunghezza di un frattale piano non si può misurare definitivamente poiché dipende dal numero di iterazioni al quale è sottoposta la gura iniziale.

L'esempio meglio conosciuto e più utilizzato per la spiegazione di questa regola, è dato dalla curva di Von Koch⁵⁶ ovvero una curva continua e limitata con la particolarità di non ammettere tangenti in nessun punto, ed ogni suo tratto ha lunghezza finita (Fig.3.17).

La curva, che per la sua conformazione ricorda un fiocco di neve, si costruisce a partire da un segmento di una lunghezza definita da dividere in tre parti uguali; la parte centrale viene sostituita da due segmenti di uguale lunghezza e questa operazione viene ripetuta per tutti i quattro segmenti ottenuti e via dicendo.

Benoit Mandelbrot⁵⁷ si è dedicato molto allo studio dei frattali e proprio per questo è stato riconosciuto come uno dei massimi studiosi di queste geometrie, tanto da scoprirne di nuove lui stesso. Il più conosciuto è quello che prende il nome di "insieme di Mandelbrot" (nome conferitogli durante i più approfonditi studi a partire dal 1984) che risulta essere uno tra i più conosciuti anche al di fuori della matematica grazie alla diffusione delle immagini di queste figure geometriche che hanno conquistato tutti con i loro intricati disegni e gli accattivanti colori. Le im-

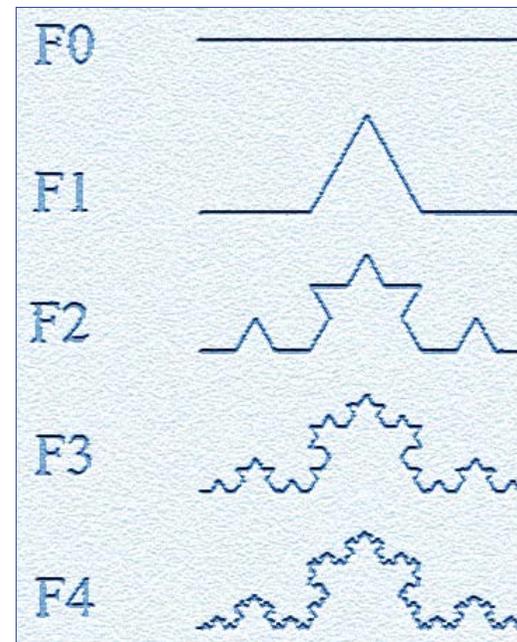


Figura 3.17 Frattali: variazione della curva di Von Koch (rielaborazione)

56. La curva di Von Koch è una delle prime curve frattali di cui si conosce la descrizione. Helge von Koch: *Matematico tedesco (1870-1924)*. (volume 2, pag.299)

57. 54. Benoit Mandelbrot: *Matematico statunitense (1924-2010) di origine polacca; fu teorico della geometria dei frattali, termine da lui stesso coniato.*

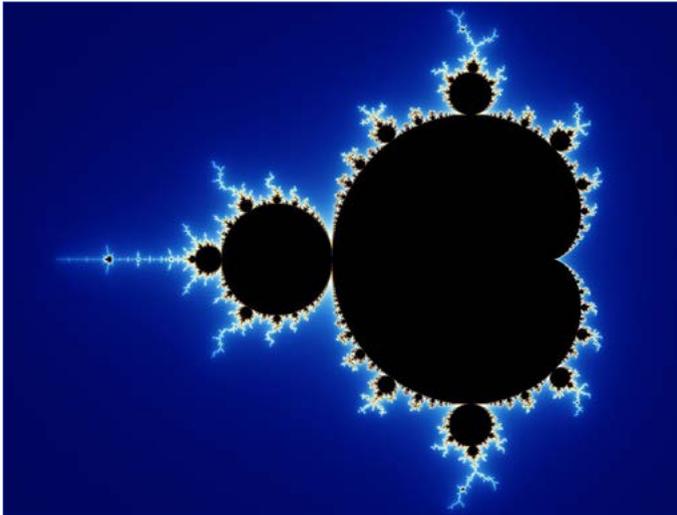


Figura 3.18 Insieme di Mandelbrot, created by Wolfgang Beyer with the program Ultra Fractal 3. - Opera propria

magini multicolori che siamo soliti vedere si ottengono andando a colorare i punti esterni all'insieme seguendo come criterio di quanto la sequenza numerica che lo compone diverge all'infinito.

L'ispirazione offerta dalla natura è molto vasta e parte dalle componenti più semplici per arrivare alle più complesse, dalle piante alle rocce, dagli esseri vertebrati agli invertebrati, dai fiori alle conchiglie, passando attraverso le sostanze prodotte dagli Artropodi. Un esempio che risulta essere esplicativo di quanto sopra descritto è quello riportato dalla figura 3.20 dove vengono paragonate all'intricata ragnatela realizzata tra dei rametti a delle struttura architettoniche complesse.

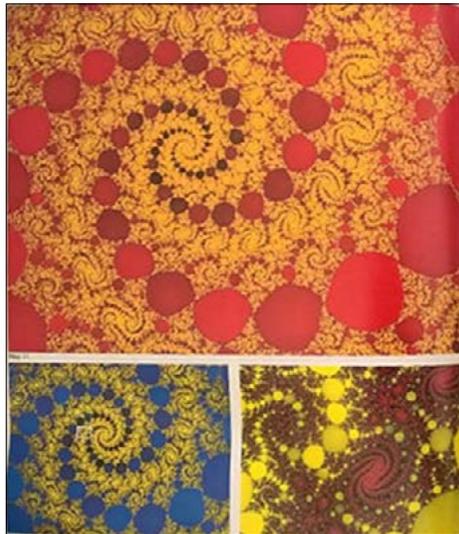


Figura 3.19 Alcuni frattali dai colori accesi, da op. cit. La bellezza dei frattali, pag. 48



Figura 3.20 A sinistra una ragnatela e destra una tensostruttura che si ispira alle ragnatele da <http://procesosbiometricosjonathancastaneda.blogspot.com/2018/01/edificios-vivos-que-respiran-la.html>



Capitolo 4

Il ruolo della sperimentazione nella concezione architettonica

75



Capitolo 4

Il ruolo della sperimentazione nella concezione architettonica

4.1 La sperimentazione indiretta

Con sperimentazione indiretta si può indicare un procedimento che, dall'idea iniziale arriva alla sua realizzazione, passando per uno *step* intermedio, non meno importante, rappresentato dalla realizzazione di un modello in scala nel quale viene applicato il metodo che si sta studiando. Questo passaggio permette una prima verifica che consente di studiare nel dettaglio la forma, avendo già davanti il “come” questa si presenterà una volta portata a termine la costruzione vera e propria; le informazioni che si ricavano riguardano anche il comportamento delle strutture alle forze agenti su di esse.

ANTONY GAUDÍ E LA RICERCA DELLA FORMA

Architetto catalano (Reus, Spagna, 25 giugno 1852 - Barcellona, Spagna, 10 giugno 1926) dallo spiccato senso espressivo e costruttivo, Antoni Gaudí i Cornet ricopre un importante ruolo nel panorama architettonico di fine Ottocento inizio Novecento, ruolo che rimane immutato anche ai giorni nostri. La maggior parte del patrimonio documentale relativo alle sue opere, così come molti dei modellini da lui realizza-

ti, è andato perso a seguito dell'incendio che nel 1936 distrusse il suo Atelier ed il suo archivio, che si trovavano presso la Sagrada Família. Emerge comunque dai lavori realizzati, e da alcuni frammenti di suoi progetti, l'interesse verso forme e spazi che prendono origine dalla congiunzione tra le idee statiche e quelle estetiche con le competenze artigianali e le conoscenze scientifiche. Per ottenere questi risultati Gaudí si avvaleva sia dell'ausilio del disegno ma, data la riduttiva resa dell'idea progettuale legata alla bidimensionalità del foglio, sia delle realizzazioni di plastici in modo da studiare al meglio la *forma*, analizzandola dal punto di vista statico e materico. Questo consentiva di trattare insieme le tecniche costruttive fondendo forme solitamente usate in architettura con forme nuove. Egli non si avvale solo delle forme semplici come quadrati, cerchi e triangoli (nel piano) o cubi, prismi, piramidi, cilindri e sfere (nello spazio), ma ricorre anche alle superfici rigate⁵⁷ (paraboloide, iperboloide, etc.). Questo ampliamento dell'uso delle forme consentì a Gaudí di arricchire le soluzioni formali con elementi completamente inediti. A questo si affianca l'osservazione degli elementi naturali ovvero delle forme organiche (tronchi, ossa, gusci dei crostacei, etc.) alle quali attinge per ampliare il suo bagaglio di proposte architettoniche. Il risultato di questa metodologia è l'organicità complessa che emerge dall'attenta fusione tra invenzione spaziale e logica costruttiva, senza tralasciare l'influenza data dal suo bagaglio culturale.

L'elemento importante che emerge dai lavori di Gaudí è lo stretto legame tra forma architettonica e struttura resistente. Gaudí affermava, per via del suo metodo di la-

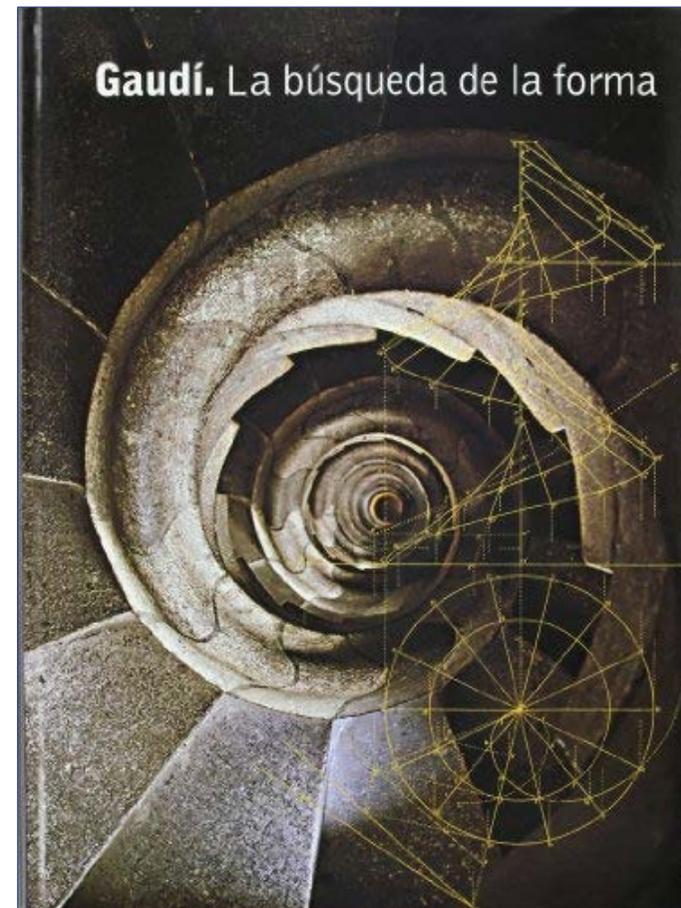


Figura 4.1: Copertina di libro

57. Superfici rigate: costituite da rette che determinano superfici curve nello spazio.



Figura 4.2: Confronto tra lo scheletro e le volte realizzate da Gaudí

vorò che lo portò a scoprire soluzioni innovative e funzionali: «Le mie idee strutturali ed estetiche sono di una logica indiscutibile». Infatti egli non si affidava al classico metodo che partiva dalla teoria e dal calcolo per arrivare al progetto, ma invertiva il procedimento partendo dal modello per giungere al calcolo, a cui seguivano il disegno e la costruzione. Nei lavori di Gaudí forma e funzione si identificano, infatti una volta ideata l'architettura, che aveva ben chiara in mente, passava alla sperimentazione per renderla migliore e funzionale. Negli studi teneva conto di diversi fattori come ad esempio:

- la traslazione, cioè il processo della ripetizione della forma attraverso lo spostamento;
- la simmetria, per configurare degli oggetti speculari;
- la modulazione, alla quale ricorre per proporzionare gli spazi e i reticolati strutturali mediante moduli prefabbricati;
- la generazione elicoidale, ovvero la combinazione di una o due rotazioni intorno ad un asse con eventuali traslazioni lungo lo stesso, per ottenere un movimento verticale;
- l'arrotondamento delle forme, procedimento che gli consente di "smussare" gli angoli mediante profili di iperbole, archi di cerchio e le forme sinusoidali;
- l'intersezione, operazione durante la quale diverse figure geometriche vengono intersecate, o accoppiate, in modo complesso;
- lo svuotamento, che gli consente di ottenere un corpo tridimensionale mediante sottrazione di materiale da parti definite;
- a sezione, principio applicato andando a sezionare le figure tridimensionali, come le superfici, utilizzandone poi

solo una parte di esse;

- i frattali, ai quali si ispira per distribuire e trasmettere, ad esempio, i carichi sovrastanti le colonne;
- la similitudine, usata proponendo la stessa forma in dimensioni e scale differenti.

Per quanto riguarda le geometrie, Gaudí usava le figure poligonali piane (triangoli, quadrati, pentagoni, esagoni, ottagoni, decagoni e dodecagoni) per generare elementi costruttivi e motivi decorativi. Gaudí ricorreva alle forme poligonali tridimensionali come figure generatrici di elementi strutturali e anche come strumenti per studiare la struttura (ad esempio l'andamento strutturale della funicolare).

Per lo studio del disegno di archi e volte, Gaudí ricorreva a modelli in scala realizzati con dei fili; a questi appendeva dei sacchetti riempiti con palline di piombo, in modo da poter visualizzare la distribuzione dei carichi. Egli stesso a riguardo diceva: «Calcolo tutto: dapprima, ipotizzo alcuni pesi per definire la funicolare; poi verifico la funicolare ottenuta con forme e materiali, i cui pesi torno a verificare; a volte vario leggermente le funicolari. In questo modo matura la forma più logica, che nasce dalla necessità. [...]». Partendo dall'applicazione dei carichi Gaudí valutava i sistemi di calcolo e le risorse per poter costruire il suo progetto, risolvendo il problema dei carichi verticali. Per quanto riguarda invece la componente orizzontale, che si riscontra nelle spinte generate dagli archi e dalle volte, egli trovò una soluzione nel ribaltamento dell'immagine del gotico (stile che Gaudí usa come base di partenza strutturale). In effetti le volte in alto sono strette mentre scendendo alla base si allargano con i contrafforti; l'in-



Figura 4.3: Raccordo sulla volta di Casa Batlló

58. Gaudí é stato il primo a capire che usando la catenaria in modo simmetrico si ottiene un uno degli archi migliori ovvero quello che si regge da solo e ne fa largo uso in diversi edifici.

versione da lui proposta consiste nell'avere la base stretta e la sommità che si amplia con diramazioni dei pilastri. Nel seguito si elencano due diverse tipologie, e precisamente le "curve" e le "superfici rigate". Per la prima serie rileviamo che all'interno delle sue opere si riscontrano cinque tipi di curve definibili come "curve piane gaudiniane":

- catenaria: forma assunta da una catena vincolata agli estremi e lasciata libera di pendere⁵⁸;
- spirale: forma molto presente in natura (gusci, conchiglie, etc.) che si può disegnare arrotolando dei fili o facendoli avvolgere intorno a coni o cilindri. Gaudí affida loro un ruolo decorativo davvero importante;
- sinusoidale: forma che ricorda il movimento dei serpenti e l'andamento delle onde marine;
- conica: circonferenze, ellissi, parabole e iperboli dei quali Gaudí studia tracciati e proprietà anche dal punto di vista acustico e di illuminazione;
- curva arrotondata: curve che si ottengono per deformazione continua del cerchio che usa sia a livello decorativo sia a livello planimetrico.

Per le seconde tipologie, Gaudí durante i suoi studi universitari inizia a studiare le superfici rigate e nel corso della sua carriera di architetto ne approfondisce la conoscenza, andando ad inserirle nei suoi progetti. Gaudí fu il primo ad andare oltre il solo ruolo geometrico di queste figure e assegnò loro un compito importante in Architettura. Queste sono:

- il cilindro: generato da una retta che ruota, parallela a se stessa, intorno ad un asse;
- l'elicoide: generato da una retta parallela a un piano ed appoggiata con un'estremità ad una retta perpendicolare al piano dato, lungo la quale ruota e trasla;

- la rampa elicoidale (o elicoide di rivoluzione): dato un cilindro con un'elica fissata alla sua superficie, la rampa elicoidale viene generata dalle rette tangenti all'elica;
- il cono: generato da rette passanti per un punto e poggianti su di una curva nello spazio che non contiene il punto stesso;
- la superficie conoidale retta: dati una retta, un piano perpendicolare ed una curva nello spazio, la superficie si genera da tutte le rette che si appoggiano su quella data e sui punti della curva assegnata, e allo stesso tempo sono anche parallele al piano di riferimento;
- l'iperboloide ad una falda: superficie generata da rette poggianti su due ellissi, uguali e paralleli, che collegano un insieme di punti corrispondenti; si può anche generare per rivoluzione di un'iperbole attorno ad un asse di simmetria esterno alla curva;
- il paraboloide iperbolico: si genera a partire da una retta generatrice che avanza parallela ad un piano su due rette direttrici poste su piani differenti.

Ma Gaudí fece anche largo uso delle “superfici non rigate quali:

- il paraboloide di rivoluzione: si ottiene dalla rotazione di una parabola attorno al suo asse;
- l'ellissoide: tipo di quadrica⁵⁹ che sostituisce l'analogo tridimensionale dell'ellisse nelle due dimensioni;
- la sfera: solido geometrico costituito da tutti i punti che sono a distanza minore o uguale ad una distanza fissa r da un punto O .

Emerge quindi un profondo studio delle forme da cui sono composte le architetture di Gaudí, forme che hanno

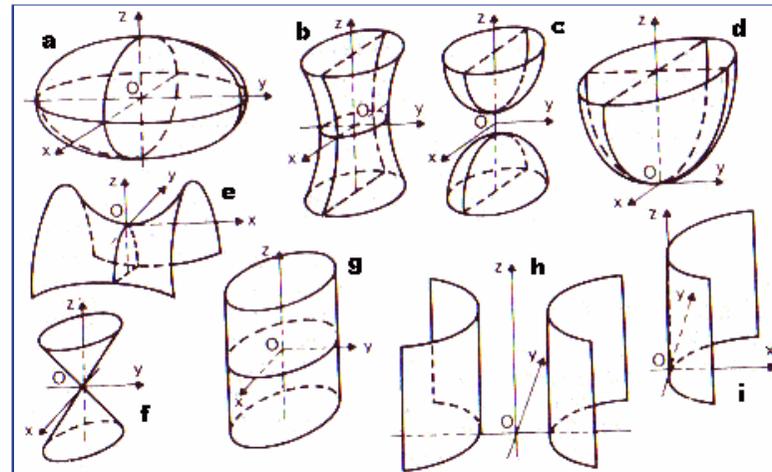


Figura 4.4: Le curve usate da Gaudí

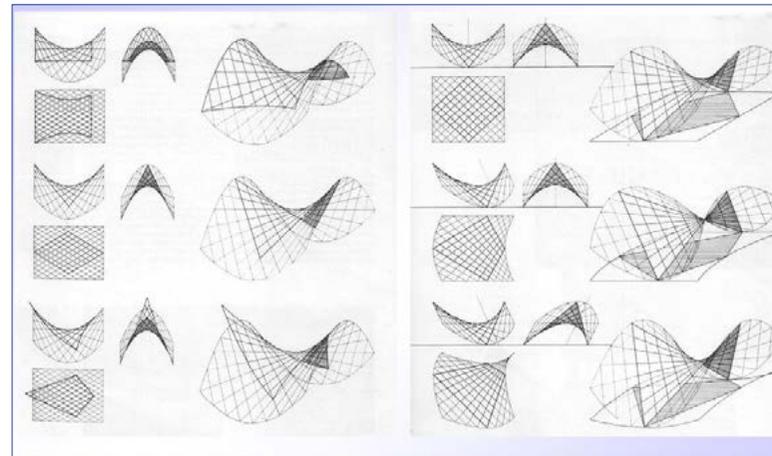


Figura 4.5: Curva di intersezione del paraboloide iperbolico con piani diversi. (da prof. ing. Vincenzo Sapienza)

59. Quadrica: superficie di uno spazio D -dimensionale, rappresentata da un'equazione di secondo ordine nelle variabili spaziali.

alla base un'attenta ricerca sia dal punto di vista funzionale sia dal punto di vista plastico, senza tralasciare significati più complessi come messaggi metaforici. Il tutto, unito al sapiente uso delle tecniche costruttive tradizionali e alle soluzioni strutturali innovative da lui proposte.

Gaudí regala un'importante capitolo nella Storia dell'Architettura Catalana, e non solo, del XX.

Non vi è differenza tra struttura e architettura, bensì sono una cosa sola.

La sua percezione del problema della sicurezza e della stabilità segue un percorso di ricerca che va a dimensionare la struttura senza ricorrere agli attuali calcoli complessi. Le strutture vengono studiate da Gaudí mediante la statica grafica e il metodo funicolare: da questi procedimenti emergono le proporzioni e la sicurezza statica delle strutture.

Dai progetti e dalle costruzioni di Gaudí, non sempre è possibile evincere quale sia il suo punto di vista sull'Architettura, emerge comunque il fatto che, se esiste una posizione di equilibrio all'interno di una struttura allora sarà proprio questa posizione che la struttura userà per resistere. Il tener conto della resistenza e della stabilità di una struttura porta Gaudí a concentrarsi sui materiali da costruzione da utilizzarsi per ottenere i risultati migliori:

- mattoni: muri, pilastri, volte;
- pietra naturale: pilastri;
- ferro: pilastri, travi;
- muri in pietra e calce: fondazioni;
- grossi blocchi: fondazioni;
- cemento armato: elementi verticali elevati (es. pinnacoli).

La capacità concettuale di Gaudí gli consentì di avere una

profonda conoscenza della statica (grafica e applicata) senza pianificare la verifica delle azioni orizzontali. Affrontava al meglio qualunque tipo di problema costruttivo che potesse emergere con l'uso dei materiali dell'edilizia più idonei, regolati dai suoi criteri estetici e dalla sua creatività. Le forme realizzate quindi, non si giustificano da sole ma sono il risultato della risoluzione dei problemi pratici, a partire dalle operazioni connesse al lavoro. Per questo motivo la sua originalità piuttosto che basarsi sui nuovi materiali, va ricercata nelle soluzioni innovative, risolte con un creativo linguaggio.

Come si è analizzato, i materiali che Gaudí usava erano quelli consueti del panorama architettonico fino al XIX secolo, aggiungendo però, quando necessario, i nuovi materiali che si affacciano in edilizia a partire dalla metà del XIX secolo, come per esempio l'acciaio.

Riguardo questo uso dei materiali si può proporre una suddivisione del lavoro in due fasi:

- prima fase: uso di mattoni e pietra con disposizione classica dei materiali caratterizzata da un eclettismo sperimentale;
- seconda fase: uso dei materiali tradizionali adattando la tecnica alla creatività.

Gaudí otteneva quindi forme nuove utilizzando materiali classici e tecniche costruttive consolidate nel panorama edilizio; questo era possibile grazie agli adattamenti e soluzioni che in corso d'opera andava ad applicare per ottenere forme curve e superfici rigate. L'uso dei materiali per forma e caratteristica, portò l'architetto catalano ad utilizzare al meglio gli elementi costruttivi:

- pilastri e/o piedritti: in mattone o in pietra, usati in modo funzionale per ottenere spazi flessibili e modificabili, ma anche libertà formale;
- pareti: muri portanti e tramezzi molto sottili come si usano in Catalogna, anche con andamento curvo;
- facciate: non solo più classiche chiusure degli ambienti verso l'esterno che portano i carichi verticali fino alle fondazioni, ma anche libere da qualsiasi peso poiché le pietre che le compongono sono appese, mediante grappe in ferro, ad elementi portanti interni per ottenere un'ampia libertà nella distribuzione degli spazi interni;
- archi: nuovo uso della forma che rileva uno studio attento delle leggi meccaniche, oltre che una ricerca di innovazione. Viene usato il profilo parabolico con conseguente riduzione dello spessore dell'elemento e della spinta agente sugli elementi contigui (possibile in quanto la forma dell'arco e la linea delle spinte sono coincidenti);
- soffitti: soluzioni non solo strutturali ma anche decorative, con un'attenzione al *comfort* dell'ambiente, come isolamento acustico ed areazione/ventilazione degli ambienti;
- coperture: sia in legno sia in mattoni, nelle coperture vengono utilizzate diverse tipologie costruttive e funzionali collegate sia all'inserimento nel contesto sia a dare un senso di continuità con le facciate, senza tralasciare la funzionalità tecnologica e statica.

Tra le soluzioni voltate messe in opera da Gaudí le volte sono convesse, e le superfici sono ottenute mediante l'uso di una maglia realizzata semplicemente da materiali classici come sabbia e frammenti di ceramica che mascherano la struttura sottostante realizzata mediante le proprietà geometriche

del paraboloido iperbolico.

Per definire gli spazi, Gaudí usava superfici quali il piano, le conoidali, le quadratiche, ma anche insiemi di paraboloidi iperbolici, ellissoidi, cilindri, coni e paraboloidi di rivoluzione. Grazie a queste geometrie, ha sviluppato le curve paraboliche per generare le corrispondenti quadratiche, ovvero il paraboloido iperbolico - che ritroviamo in molte delle sue realizzazioni - gli consentì di sviluppare tutta una serie di tecniche e di originali soluzioni spaziali legate all'uso delle rette. Anche ricorrendo alle superfici conoidali, riusciva ad ottenere risultati originali per quel periodo: queste superfici generate da una retta che si muove lungo una curva. Il risultato è un tipo di superficie che si ritrova in natura nella struttura di alcune foglie e fiori e si presenta come:

- un piano: quando la curva di appoggio è parallela alla curva data;
- un elicoide: se la curva d'appoggio è un'elica cilindrica e la retta iniziale coincide con l'asse del cilindro. Tra le superfici elicoidali per esempio le scale a chiocciola, realizzate mediante la volta catalana, sono uno degli esempi di conoide più conosciuti. Se la retta si muove perpendicolarmente all'asse, traslando e ruotando allo stesso tempo, si ha il movimento elicoidale, modo dinamico con il quale Gaudí pensava al conoide;
- un paraboloido iperbolico: se la curva di appoggio è una retta che va ad intersecare quella di partenza.

Una catena bloccata ai due estremi, soggetta al peso proprio assume una forma che viene definita arco catenario. Quando il carico è uniformemente distribuito si ha una parabola, quando i carichi sono concentrati in punti



Figura 4.6: Studi di Gaudí per la distribuzione dei carichi e la definizione della "forma".

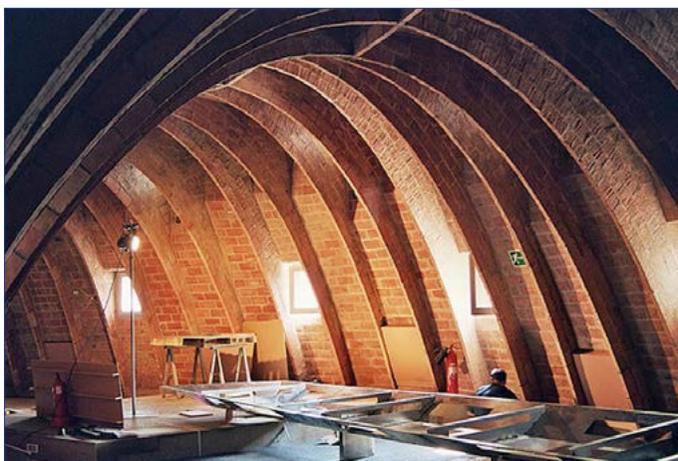


Figura 4.7: Archi di catenaria; Gaudí, attico di Casa Milá, Barcellona, 1905-1910.

diversi si ha un arco funicolare. Invertendo la forma di questi archi catenari si ha il comportamento della forma ai carichi concentrati o distribuiti e Gaudí si avvale spesso dei modelli così ottenuti per realizzare le sue architetture, affidandosi alla capacità di resistenza "per forma di questo tipo di archi, dei quali riuscì a ricavare le prestazioni dal calcolo grafico e dalla sperimentazione (Fig.4.1). Gaudí trovava ispirazione anche nella natura, nei suoi colori e movimenti, da qui la ricerca della sintesi tra struttura e forma e della continuità delle forme. Quando diventava difficile studiare graficamente alcuni elementi, come le intersezioni tra le superfici, si avvaleva di modelli in gesso, non solo della geometria descrittiva. Il processo per arrivare alla forma definitiva era da Gaudí interpretato nel seguente modo: «[...] *Calcolo tutto: dapprima, ipotizzo alcuni pesi per definire la funicolare; poi verifico la funicolare ottenuta con forme e materiali, i cui pesi torno a verificare; a volte vario leggermente le funicolari. In questo modo matura la forma più logica, che nasce dalla necessità. [...]*». Grazie all'eccezionale intuito spaziale, Gaudí riuscì ad ottenere dei complessi corpi tridimensionali intersecando tra loro forme geometriche diverse: raggiunte così soluzioni architettoniche che trasmettono una forza evocativa sia naturale sia simbolico-religiosa.

HEINZ ISLER E LA RICERCA PER FORMA

Ingegnere strutturista (Zollikon, Svizzera, 26 luglio 1926 - Berna, Svizzera, 20 giugno 2009). Dopo essersi laureato presso l'ETH4, discutendo una tesi sulle volte sottili in calcestruzzo rinforzato, lavorò anche come assistente del professor Pierre Lardy presso l'istituto, e questa esperienza gli fece comprendere

l'importanza di ricorrere a modellini in scala per studiare il comportamento delle strutture.

Il suo primo progetto, datato 1954-1955, è stato la costruzione della copertura di una sala concerti per l'Hotel Kreuz di Langenthal, nei pressi di Burgdorf: la forma è simile a quella di un cuscino appoggiato sul letto. Con questo edificio ha inizio la sua carriera come costruttore di volte a guscio.

Nel 1959 durante il primo congresso dell'IASS⁶⁰ mostrò il suo lavoro alla comunità di ingegneri e architetti segnando una svolta nella ricerca della forma e nello studio delle volte a guscio sottili. Fino a quel momento, infatti, le forme per questa tipologia di volta derivavano da superfici più semplici anche per il calcolo con metodi matematici. Il suo intervento durante la conferenza, al quale seguirono accesi dibattiti, stravolse il modo di concepire le forme in architettura: utilizzare modelli in scala nel *form finding* delle *shells*. Isler propose tre metodi di modellazione quali: modellazione di cumuli di terra, membrane gonfiate di gomma e teli di stoffa appesi. Tali metodologie consentivano di ottenere una serie infinita di forme nuove ed eleganti; inoltre gli ultimi due metodi generavano delle forme sottoposte solo a tensione.

Heinz Isler si è specializzato nella realizzazione di sottili *shell* in calcestruzzo. Gli esempi più conosciuti, realizzati in Svizzera, sono:

- la copertura del Wyss Garden Center di Zuchwil, 1962;
- la copertura di un edificio per la società Kilcher, 1965;
- la copertura per l'area di servizio Deitingen Sud, a Solothurn, 1968.

Ma il suo lavoro lo ha portato a progettare anche fuori

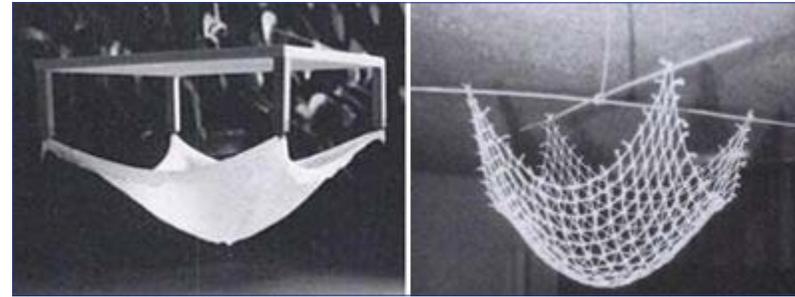


Figura 4.8: Studio della forma per mezzo di teli e reti

60. IASS: International Association for Shell Structures. Organizzazione fondata dal più importante ingegnere strutturista, e costruttore di volte a guscio, lo spagnolo Eduardo Torroja.

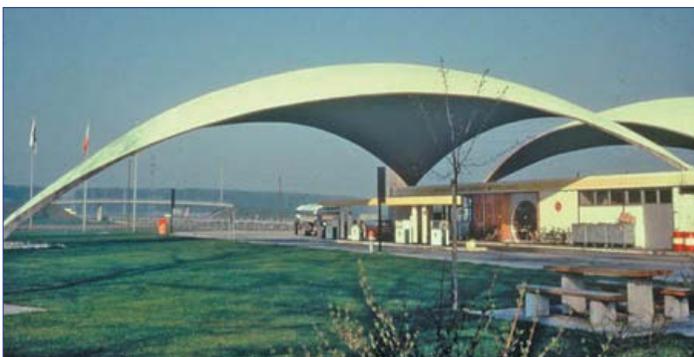


Foto 4.9 Copertura area di servizio

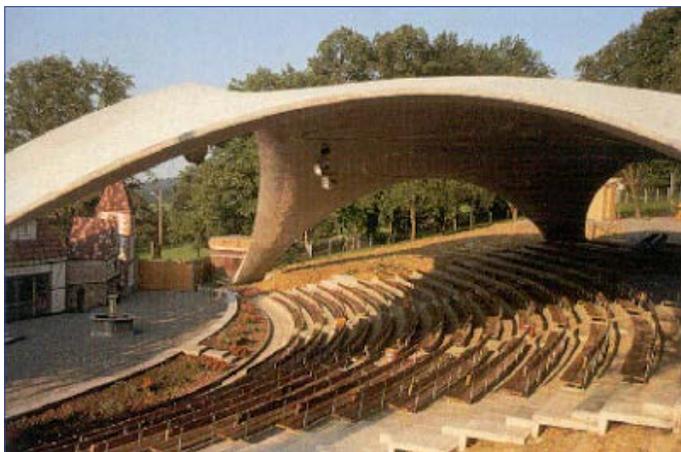


Figura 4.10: Aichtal Outdoor Theater (Naturtheater Aichtal-Grötzingen) in Grötzingen, Aichtal, Esslingen (Landkreis), Baden-Württemberg, Germany--completed in 1977.

61. H. Isler, Twenty-Five Years Attempt for Structural Beauty, in IABSE Congress Report, n.11, 1980, pag.

dal suo paese, come ad esempio in Inghilterra dove, tra il 1987 e il '91, progetta la copertura per un centro sportivo, il Norwich Sports Village.

Da una membrana di gomma, gonfiata e ricoperta da uno strato di malta, prende forma una superficie voltata che rimane imprigionata nel getto. Spesso Isler immergeva i teli in acqua e poi li stendeva su di una superficie o li appendeva, in modo che gelando la stoffa assumesse la forma dell'acqua che cristallizzava. I modelli ottenuti con questa metodologia sono soggetti a forze di trazione, ma una volta capovolti, si trasformano in forze di compressione, con la risposta appropriata del calcestruzzo.

Le strutture realizzate a partire dai modelli ottenuti con membrane gonfiate, conosciute anche con il nome di *bubble shell*, sono state utilizzate in molti progetti soprattutto dove era necessario ottenere coperture con luci superiori ai 50 metri, come ad esempio per edifici industriali o commerciali. Le strutture a guscio erano quindi destinate agli edifici per la produzione nei quali erano necessari ampi spazi per ricoverare merci e posizionare macchinari. Isler trasferì questi modelli in contesti più o meno urbanizzati e destinandoli anche a semplici tettoie. Isler in varie occasioni dichiarò: « *Nella progettazione di un edificio, alcune regole devono essere osservate: ad esempio, proporzioni, semplicità, etc. Le stesse regole valgono quando si progetta un edificio a guscio. [...] Una shell ben sagomata è come una struttura principale, che non necessita dell'aggiunta di altri elementi sovrastanti. [...] La shell è allo stesso tempo struttura portante e muro che racchiude gli spazi.*»⁶¹

Il lavoro di Isler risulta influenzato da un legame con la natura: le forme assunte naturalmente dalle conchiglie, così come

quelle dei gusci e dei petali di alcuni fiori, hanno ispirato i suoi progetti. Nelle forme naturali, infatti, riusciva a vedere superfici a guscio rigidi, a doppia curvatura, di rotazione, perfettamente sagomate in infinite varianti, sottilissime e resistenti allo stesso tempo. Per Isler, quindi la forma a *shell* è quella ottimale: «*È la legge naturale, quindi anche la forma più ecologica dell'universo.*». Le forme delle *shell* ottenute sperimentalmente da Isler sono pertanto il risultato di leggi della natura che, proprio per questo motivo, possono venir realizzate con minimo dispendio di materiale continuando a garantire resistenza e rigidità. L'interpretazione delle forme da parte di Isler è una fusione di due concetti:

- il concetto di Lardy⁶², secondo il quale l'estetica è di supporto alla struttura;
- l'universalità delle leggi naturali.

Isler vede il problema della questione della forma delle strutture a guscio principalmente come un aspetto tecnico associato al concetto di appropriatezza del disegno architettonico e che può essere espresso dal principio organico.

Le *shell* sono una variazione delle strutture voltate che permettono di ottenere diversi tipi di forme spaziali. Quelle pensate da Isler spesso non seguono una differenziazione spaziale ma sono strutture ad aula unica che attraversano e disegnano l'ambiente aperto con una copertura sottile. Le variazioni spaziali sono il risultato di una variazione di altezza nel sistema struttura, che risulta quindi vincolato vicino ai sostegni e aperto verso il centro. Nei progetti Isler vede come punto di rottura il passaggio tra interno ed esterno: l'edificio sembra un'aggiunta piuttosto che

62. Pierre Lardy (-) è stato uno degli insegnanti di Isler durante i suoi studi presso l'ETH di Zurigo, al quale fece anche da assistente in uno dei suoi corsi.

un'integrazione, risultato della sua "concezione della forma come l'espressione della natura. L'ambiente più adatto nel quale inserire una struttura a *shell* è quello il più possibile naturale proprio perché le sue forme naturali ed armoniose trovano le proprie leggi nella natura.

Le sperimentazioni che Isler compie nel processo di studio della forma si inseriscono nel contesto degli studi dell'architettura organica, basata sull'idea dell'importanza delle leggi della natura all'interno delle costruzioni. La qualità formale che si ritrova nell'idea di Isler risulta da un generale processo che soddisfa non solo gli aspetti costruttivi, strutturali ed economici ma risponde altrettanto bene alle esigenze estetiche. La qualità architettonica dipende dalla definizione delle condizioni limite entro lo studio sperimentale della ricerca della forma. Proprio per questa sua convinzione nell'universalità delle leggi naturali Isler non mette in discussione le impostazioni sperimentali.

SERGIO MUSMECI E IL PENSIERO ARCHITETTONICO PER FORMA

Laureatosi in ingegneria civile e, successivamente, in ingegneria aerospaziale presso l'università romana de La Sapienza, Sergio Musmeci (Roma, 2 giugno 1926 - Roma, 5 marzo 1981) inizia a lavorare presso gli studi di Riccardo Morandi (Roma, 1 settembre 1902 - Roma, 25 dicembre 1989) e Pier Luigi Nervi (Sondrio, 21 giugno 1891 - Roma, 9 gennaio 1979). Tali esperienze contribuirono ad arricchire la sua curiosità nel campo delle costruzioni portandolo a proporre forme sempre più complesse e ardite.

La convinzione che la struttura potesse essere progettata in modo tale che fosse la forma stessa a dare le informazioni

sulla sua funzione, è alla base del modo che Musmeci ha di comunicare attraverso le sue architetture, risolvendo il problema legato al rapporto tra espressione architettonica e forma della struttura riferito ad opere in cui prevale l'aspetto strutturale. A tal proposito, riferisce: «*Quando si inizia la progettazione di una struttura, c'è un modo molto semplice di valutare che possibilità si prospettano di ottenere questa potenzialità espressiva della sua forma perché la probabilità di avere successo dipende in modo critico dall'importanza che si attribuisce al ruolo che la forma stessa dovrà assumere sul piano tecnico per contribuire alla soluzione del problema statico. Progettare una struttura significa assolvere un compito statico immaginando nello spazio un sistema di forze che interagiscono in un gioco sapiente, o per lo meno non banale, di equilibri, che il materiale strutturale concretizza e rende reali ed eventualmente percepibili; [...]*»⁶³

Grande importanza ricopre il materiale che, con le sue caratteristiche fisiche e tecniche, va attentamente scelto per la riuscita del progetto: senza tralasciare uno schema statico che distribuisca le forze per avere un impegno statico minore. Riguardo al rapporto tra forma e distribuzione delle spinte, introduce il concetto della forma organica strutturale con il quale spiega la presenza di una categoria concettuale di forme possibili, entro la quale i progettisti possono spaziare nella ricerca della forma di una struttura, senza dover arrivare alla ricerca di una forma limite. La configurazione che il sistema assume, quindi, è il risultato di diversi fattori presi in considerazione tutti insieme; infatti pensare un forma che aumenti il rendimento del materiale utilizzato si propone come “soluzione sia

63. S. Musmeci, Il Ponte sul Basento a Potenza, in L'industria Italiana del Cemento, Anno XLVII, n. 2,

64. febbraio 1977, pag. 77.

tecnica sia architettonica e quindi estetica.

Altro punto su cui Musmeci cerca di far luce è la limitazione data dal sistema bidimensionale in quanto la forma è determinata prevalentemente dai carichi a compressione. In un sistema tridimensionale aumentano le possibilità poiché le superfici a doppia curvatura per esempio possono essere considerate come membrane. La membrana strutturale e il materiale raggiungono il massimo delle loro *performance* in ogni punto e direzione. Inoltre, così come la forma delle superfici influenza la struttura dei bordi, anche la forma dei bordi va ad influenzare quella delle superfici: il tutto porta alla configurazione finale del sistema. A questo punto i calcoli strutturali non sono più semplicemente lo strumento di verifica della struttura finale, ma concorrono allo studio della forma stessa.

Un' altro concetto importante nel lavoro di Musmeci è quello relativo al peso proprio delle superfici che se può essere ridotto allora si può parlare di "superfici minimali" contraddistinte dal fatto che la loro area è quella minima tra le possibili aree che si possono avere con lo stesso contorno. Se l'elemento in questione deve sopportare i carichi senza flettersi, si deve ricorrere alle linee asintotiche ovvero linee delle superfici dove la curvatura è nulla, il reticolo diventa ortogonale e ci si trova in una situazione che risulta essere l'opposto di quello che succede quando ci si trova a lavorare con le geodetiche, in quanto la portanza dipende dalla curvatura che ha nel piano tangente la superficie. Un metodo per studiare le "superfici minimali" è quello di ottenerle mediante una pellicola di soluzione saponata, liquido che presenta un'alta tensione superficiale. Tale superficie è sottoposta a tensioni a trazione anziché a compressione, ma il risultato, visto che le tensioni

sono comunque isotrope ed uniformi, presenta le stesse forme. Se la superficie minimale viene fatta formare dalla soluzione saponosa tra bordi di filo flessibile, allora si hanno superfici con bordi soggetti a sforzi normali. Il sistema spaziale, così ottenuto, risulta quindi essere quello di minimo spaziale.

Un'altra caratteristica del pensiero di Musmeci è quella di considerare l'intervento nel suo insieme, ovvero di non considerare la struttura da realizzare in modo separato dall'ambiente nel quale dovrà essere costruita.

Per i suoi progetti Musmeci si avvale di modelli che gli consentirono di studiarne la forma e, di conseguenza, il comportamento della struttura.

Uno degli esempi più conosciuti ed apprezzati dei suoi lavori è il ponte sul Basento⁶⁵ al quale lavora a partire dal 1967 e che viene realizzato tra il 1971 e il 1976. Il ponte, lungo 560 m e realizzato in calcestruzzo armato, è costituito da una membrana unica dello spessore di 30 centimetri che è stata modellata per formare quattro arcate contigue con interasse di 69,20 m e luce libera tra gli appoggi pari a 58,80 m. La lastra è sia tirata e deformata, in modo da ottenere degli elementi di supporto alla carreggiata, sia ripiegata su se stessa per ricavare i quattro archi di grande luce. Lo studio del progetto si è articolato in più fasi per poter svolgere tutti i calcoli statici necessari ed è stato accompagnato da una serie di modelli per poter indagare al meglio la forma. E precisamente secondo le fasi descritte nel seguito:

- nella prima ricerca per la forma, Musmeci si è servito di una pellicola di soluzione saponata con glicerina (l'aggiunta di quest'ultima serviva per ritardare il naturale fe-



Figura 4.11: Il Ponte sul Busento

65. Viadotto che funge da connessione tra l'uscita Potenza Nord sul raccordo autostradale Sicignano - Potenza e le principali vie di accesso nelle zone a sud di Potenza.

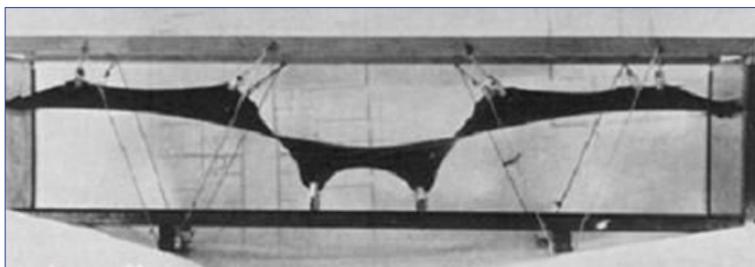


Figura 4.12: modello ponte sul Busento in metacrilato

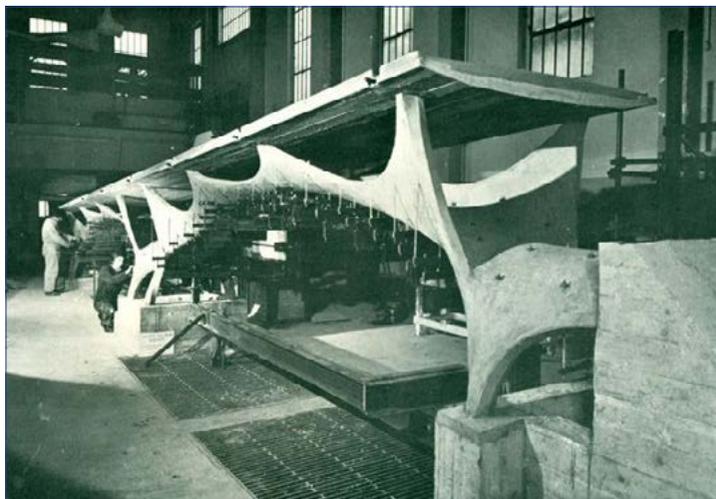


Figura 4.13: modello ponte per prove di laboratorio

nomeno dell'evaporazione), pellicola formatasi tra dei fili di cotone;

- le superfici ottenute con la soluzione saponata sono state riproposte con un modello in neoprene, per poter ricavare più facilmente i disegni della forma e studiarla meglio in quanto il foglio elastico, posto in trazione, va ad assumere una configurazione a tensioni uniformi. Effettuato poi il rilievo del modello si sono confrontati i risultati con quelli ottenuti mediante il calcolo e si è constatato che le due superfici non discostavano molto;

- è stato quindi realizzato, in scala 1:100, un modello in metacrilato per studiarne l'elasticità e perfezionarne la forma;

- sono stati eseguiti nuovamente i calcoli per verificare che tutte le condizioni di equilibrio venissero soddisfatte;

- è stato costruito un modello in scala 1:10 in microcalcestruzzo per sottoporlo alle prove di laboratorio; i laboratori dell'I.S.M.E.S.⁶⁶ di Bergamo si sono occupati di questa operazione. Questo passaggio ha consentito di perfezionare ulteriormente la forma dal punto di vista della continuità. Con le prove di carico sono state verificate le resistenze date dai materiali e dalla forma. Il risultato è un'infrastruttura che si inserisce nel territorio con un impatto che tiene conto del contesto che lo circonda e, quindi, è volta al miglioramento dell'area (che avrebbe dovuto diventare parco fluviale anche in seguito alla realizzazione della passerella pedonale all'interno delle volte che sorreggono il ponte, come da progetto, ma non ancora realizzata).

L'originale soluzione architettonica e spaziale del ponte è il risultato dell'idea progettuale a cui era legato Musmeci, ovvero il rapporto tra forma e struttura che porta alla ricerca del legame tra le due senza fermarsi ad un semplice eserci-

66. Istituto Sperimentale Modelli e Strutture.

zio stilistico.

4.2 La sperimentazione diretta

Con sperimentazione diretta si può indicare un procedimento che partendo dal progetto prova subito a realizzarlo, saltando la fase del modello. In questo modo, a differenza della sperimentazione indiretta, si ottiene un prototipo già utilizzabile (se la prova ha avuto successo) e informazioni per riprovare a costruirlo apportando adeguate modifiche (in caso di insuccesso). Uno dei concetti base che si può estrapolare da questo modo di pensare l'architettura è quello legato all'imparare facendo e del tener conto dell'eventuale fallimento come punto da cui partire per migliorare il progetto.

PAOLO SOLERI E LA COSTRUZIONE DI ARCOSANTI

Paolo Soleri (Torino, 21 giugno 1919 - Cosanti, Arizona, 9 aprile 2013) architetto italiano; si trasferisce negli Stati Uniti l'anno dopo aver conseguito il titolo di laurea in architettura (1946) presso il Politecnico di Torino; qui lavora presso lo studio di Frank Lloyd Wright ma se ne allontana molto presto per divergenze di formazione e concettuale. Dopo una breve parentesi italiana⁶⁷, nel 1956 si trasferisce definitivamente in Arizona, dove costruisce la sua casa fondando *Cosanti*, un prototipo di città basata sui concetti dell'architettura e dell'ecologia, fondamenti da cui prende il nome la sua filosofia architettonica - urbanistica: arcologia. Qui Soleri inizia i suoi esperimenti, in economia,

67. Agli inizi degli anni '50 torna in Italia; nel 1951 si stabilisce a Vietri, dove rimane fino al 1954.

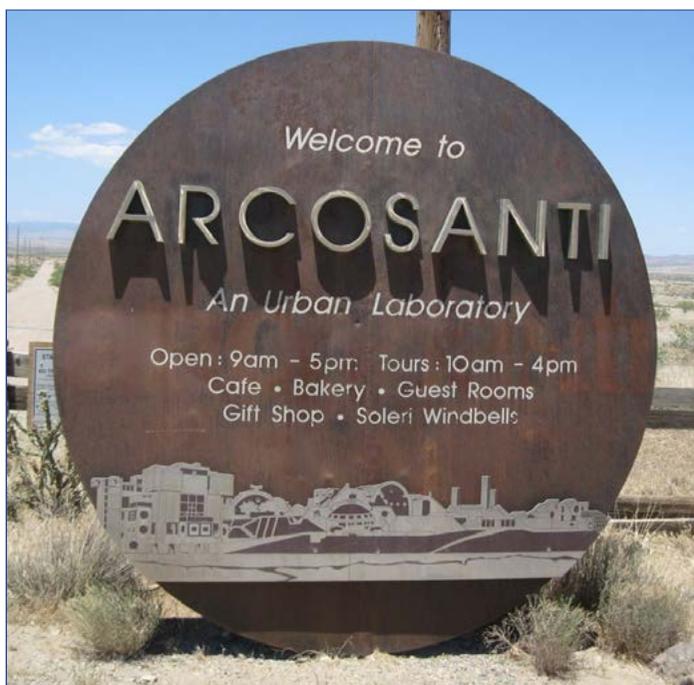


Figura 4.14: Ingresso alla città di Arcosanti

68. In Luigi Spinelli, La fortuna é nell'esperienza, in Federica Doglio, Piergiorgio Tosoni, Paolo Soleri - *Pesaggi Energetici, Arcologie in terre marginali*, Lettera Ventidue Edizioni S.r.l., Siracusa, 2013, pag.8.

sulle volte leggere in calcestruzzo: il getto viene realizzato controterra e gli ambienti ottenuti scavando sotto il getto indurito.

Andare a vivere nel deserto è stata per Soleri la scelta che gli ha permesso di dedicarsi alla sua visione dell'architettura, concentrandosi su progetti liberi dai vincoli imposti dalle città, potendo così dare sfogo alla sua creatività.

Il primo progetto che diede voce a questa sua filosofia fu quello per la Mesa City, un complesso residenziale che si sarebbe sviluppato linearmente su di un altopiano roccioso (la Mesa appunto) e che avrebbe dovuto dare alloggio a circa due milioni di persone. La scelta di un luogo marginale non fu fatta a caso, ma bensì ponderata da Soleri il quale trovava in questi luoghi, distanti da tutto e da tutti, lo scenario ideale per lo sviluppo di habitat adatti alle esigenze degli uomini. Nei suoi studi, Soleri individuava proprio nelle "terre marginali" la possibilità di miglioramento, definendole come «riserve in cui le culture future potrebbero fiorire»⁶⁸. Tramite il disegno, Soleri inizia a dare vita ai suoi pensieri e, per mezzo della matita, continua ad apportare modifiche ai progetti senza però focalizzarsi su di una loro versione definitiva; anzi grazie a questi passaggi prende maggior consapevolezza della bidimensionalità della città, andando così ad incrementare le ricerche da lui svolte sino a quel momento, raggiungendo una più precisa definizione di *arcologia*.

La ricchezza tecnologica, seguendo il pensiero soleriano, non deve essere usata per cose inutili ma deve spendere le sue energie per migliorare l'ambiente urbano e architettonico usufruendo della minor quantità possibile di materiali per rispetto verso il pianeta e le sue risorse, integrandosi al meglio con l'ambiente naturale.

Studiò una serie di paesaggi energetici autosufficienti costituiti da architetture efficienti e realizzabili in qualsiasi condizione climatica, in quanto contestuabilizzabili in qualunque parte del mondo grazie alla loro adattabilità. A tal proposito l'architetto riteneva opportuno allontanare la sua ideologia, legata all'arcologia, da un pensiero che avrebbe potuto esser inteso come utopico e lo fece presentando non più solo dei disegni ma un reale modello di costruzione, ovvero il cantiere di *Arcosanti*. In questo modo propose un qualcosa di concreto che stava prendendo forma nel deserto dell'Arizona e con il quale poté spiegare meglio i cinque elementi alla base della progettazione della città, da lui definiti "effetti", e precisamente:

- "effetto urbano", come legame tra spirito e materia, collegato a tutti gli effetti;
- "effetto agricolo", in riferimento al controllo della terra e dei frutti coltivati dall'uomo;
- "effetto serra", come accumulo del calore necessario in spazi preposti alla conservazione di questo per usi successivi;
- "effetto camino" che distribuisce, mediante un sistema di condutture, il calore accumulato tramite l'effetto serra;
- "effetto abside", che si ottiene mediante una struttura semicircolare orientata verso sud, la quale raccoglie i raggi solari per poter incrementare il calore in inverno mentre funge da protezione, ombreggiando, nei periodi caldi.

L'integrazione fra questi "effetti" consente, quindi, di ottenere uno spazio efficiente e rispettoso dell'ambiente nonostante continui a soddisfare i bisogni degli abitanti.

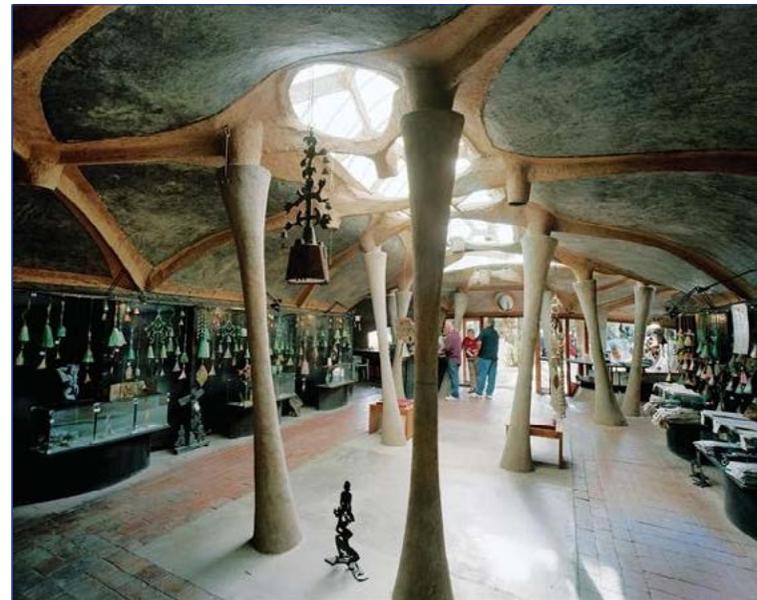


Figura 4.15e4.16: due interni di edifici realizzati ad Arcosanti

Il laboratorio urbano di Arcosanti prende il via nel 1970 e riasume un po' tutte le idee di Soleri, a partire dalla collocazione geografica (le "terre marginali", in questo caso il deserto), passando per il problema legato all'uso delle risorse (spesso, come in questo esempio, la scarsità d'acqua). Sempre connesso al problema delle risorse è il vantaggio di usufruire per le costruzioni dei materiali offerti dal sito stesso, con risparmio sulla spesa per far giungere in loco materiali diversi e sulla necessità di programmare accuratamente tutte le fasi del lavoro. A queste si unisce il concetto del "*more with less*"⁶⁹ che suggerisce il riciclo dei materiali di scarto e l'uso di tecnologie volte al risparmio, con una particolare attenzione all'uso delle risorse naturali.

Per quel che concerne la tecnica costruttiva, Soleri ricorre a quella già sperimentata da lui per Cosanti e che prende il nome di *earth casting* composta dalla fase del *casting in place*⁷⁰ e del *pre-casting*⁷¹. Questa antica tecnica si basa sulla realizzazione degli stampi mediante forme in negativo, o calchi, direttamente nella terra sui quali colare il calcestruzzo. Rispettando le tempistiche di presa del calcestruzzo si scava, successivamente, per rimuovere la terra da sotto il getto indurito liberando così la struttura e si va a consolidare le pareti. Si ottengono in questo modo edifici modellati e decorati sulle superfici sia dell'intradosso sia dell'estradosso. Mediante il *pre-casting* i componenti della struttura possono essere realizzati prima, singolarmente, per essere poi assemblati al momento opportuno.

Il materiale per ottenere gli stampi è il limo ricavato dai depositi sedimentari presenti in loco; composto da particelle che sono più grandi dell'argilla ma più piccole della sabbia. Risulta più facile realizzare con la modellazione del cassero

69. Trad.: il più con il meno. Fare di più con il meno è collegato anche all'idea della distribuzione degli spazi in modo da consentire un'organizzazione costruttiva, regolata dall'autocontenimento, e non solo sul risparmio economico ed energetico.

70. Trad.: Getto in opera.

71. Trad.: Prefabbricato.

naturale si possono aggiungere eventuali pigmenti e/o decori per caratterizzare maggiormente l'edificio. Questo materiale, essendo molto plastico e facilmente lavorabile, consente di ottenere delle forme complesse senza comportare costi eccessivi nella realizzazione delle casseforme, stimolando ancora di più la modellazione fantasiosa e ardita. La libertà espressiva permessa dall'utilizzo del limo, consente di ottenere edifici dalle forme originali che si inseriscono in modo equilibrato ed armonioso all'interno del paesaggio, come a formare una sorta di museo a cielo aperto composto da edifici che sembrano modellati con le mani, come se fossero delle sculture. Il costruire con la terra, e nella terra, soddisfa le richieste dell'idea architettonica di Soleri, quali forma-valore estetico-funzione-luce-natura-bioclimatica.

La caratteristica che distingue il progetto di Arcosanti, rientra tra i punti di vista con cui Soleri affermava che si può migliorare il modo di vivere il mondo, con l'assenza di una manodopera specializzata impiegata nel processo costruttivo degli edifici. L'esperienza pratica, sviluppata direttamente a contatto con il progetto, fornirà le capacità per compiere il lavoro. Il metodo del "laboratorio urbano" comporta non poche difficoltà legate alle capacità dei volontari che si cimentano nella costruzione, ma proprio la sperimentazione e la partecipazione, secondo Soleri, permetteranno di raggiungere i più alti livelli del significato di arcologia, nel quale tutti apportano il loro contributo. A tal proposito Soleri affermava: «[...] *attraverso un lavoro collettivo sperimentale si può realizzare pienamente un'arcologia, una città per ritrovare un equilibrio tra uomo e natura e al tempo stesso una città per lo spirito [...]*».⁷²



Figura 4.17: Paolo Soleri in cantiere

72. Paolo Soleri, *Arcosanti: an urban laboratory*, Cosanti Press, VTI Press, Santa Monica, 1983.

La natura viene percepita maggiormente grazie alla facilità di accesso ad essa e la relazione che si viene a instaurare con gli edifici presenti fa sì che si mettano in risalto a vicenda. La natura, fonte di ispirazione per il disegno dei suoi edifici e dei suoi molti progetti, trova un richiamo alle forme presenti sia nel regno vegetale sia nel regno animale, senza tralasciare riferimenti che rimandano al corpo umano. I progetti di Soleri sono come degli "organismi" (metafora di un processo naturale che può essere realizzato mediante le tecnologie più all'avanguardia in quel momento) quindi non solo concetti astratti e utopici ma concetti costruibili.

Soleri può essere visto come un precursore dei tempi, in quanto fu tra i primi a dedicarsi ai problemi come il rispetto per l'ambiente e la limitatezza delle risorse energetiche. Soleri istituì dei workshop i cui partecipanti mettevano alla prova se stessi collaborando in prima persona alla costruzione della città, proponendo un'azione collettiva per uno spazio in continua trasformazione.

L'architettura organica, alla quale si avvicina nel periodo in cui lavora presso lo studio di Wright a Taliesin, consente a Soleri di progettare e sviluppare spazi senza separazione tipologica o ristrettezze geometriche, ma regolati da un dinamismo plastico che fa pensare alla struttura come ad un organismo vivente. Ciò comportò una serie di esperimenti in campo architettonico atti a produrre un tipo di architettura che fosse in simbiosi con la natura, col fine di raggiungere un equilibrio ecologico limitando l'uso delle tecnologie che sfruttano male le risorse a disposizione.

Arcosanti, racchiude in sé i principi di un patto sociale, risultato di un determinato comportamento frutto della forma progettuale e della regola dell'autogestione-autocostruzio-

ne, con conseguente risparmio anche dell'energia umana. Soleri cercò di proporre una visione più ampia del problema così da poter guidare l'uomo a riavvicinarsi alla natura e, allo stesso tempo, fare in modo che la città assumesse una configurazione a "immagine dell'uomo".

DANTE BINI E IL PROGETTO

Architetto italiano (Castelfranco Emilia, 22 aprile 1932) specializzato in sistemi di costruzione automodellanti, Dante Bini indirizza la sua attività nella progettazione e realizzazione di tecnologie innovative che vanno dagli imballaggi industriali ai metodi di automazione della produzione. Negli anni sessanta mette a punto delle tecniche costruttive brevettate rispettivamente con il nome di sistema *Binishell*, che permette di realizzare cupole in calcestruzzo su casseforme gonfiabili, e di *Binistar* per la costruzione di strutture geodetiche automodellanti. Predilige la struttura a piramide, sperimentando diverse tecniche, ma concentra i suoi studi anche sulla soluzione dei problemi architettonici legati alla costruzione delle cupole.

Sotto la classificazione *Bini-Systems* sono raggruppati i suoi brevetti e innovazioni. Le sue visioni futuristiche, molte delle quali concentrate su come risolvere i problemi a cui le città sono naturalmente portate, ovvero l'aumento di popolazione e la richiesta sempre crescente di superfici da edificare, hanno prodotto soluzioni al limite della fantasia, ma comunque tutte spiegate passo passo anche nei disegni. Rientra tra queste la Piramide di Tokyo, un progetto di struttura multifunzionale destinata ad accogliere 750.000 persone residenti per arrivare ad una capienza



Figura 4.18: Fasi della costruzione di un edificio con il metodo Bini



Figura 4.19: casa realizzata in Sardegna con il medoto Bini

di 800.000 persone quando sono in funzione i servizi (uffici e negozi). La struttura, articolata su 8 piani, è stata pensata a telaio i cui elementi, una volta assemblati anche mediante l'uso di camere d'aria (gonfiabili a seconda delle esigenze di cantiere), saranno posizionati ai diversi piani. I nodi delle connessioni, oltre ad avere la funzione di collegamenti tra i diversi elementi costruttivi, fungeranno anche da snodo veicolare per gli ascensori (che potranno muoversi in diverse direzioni) e per gli altri elementi di trasporto.







Capitolo 5

Morfogenesi Computazionale

La Morfogenesi Computazionale consente di ampliare il panorama architettonico per quel che riguarda la modellazione di un edificio. Questa nasce dall'unione di due termini diversi tra loro ma che insieme permettono di ottenere dei risultati molto complessi.

La Morfogenesi, termine usato in diverse discipline, indica il processo che porta a sviluppare una determinata forma o struttura; deriva dal greco morfè che significa "forma" e da genesi "origine".

Computazionale è invece il termine attribuito alle discipline che utilizzano nell'indagine teorica i computer come strumento sistematico di lavoro; si riferisce anche al procedimento che usa il computer e i risultati da esso ottenuti. Inizia ad affermarsi, in diverse discipline, a partire dagli anni '50 del Novecento come modalità complementare all'indagine teorica ed alla sperimentazione, fungendo anche da supporto al progetto. L'approccio avviene per fasi, ovvero individuazione del problema e sua modellazione, definizione dell'algoritmo per la soluzione del modello, stesura di un codice (programma di calcolo), simulazione del problema (esecuzione del codice), ed infine analisi dei risultati ottenuti. Le fasi elencate sono tra loro interdipendenti in quanto connesse alla necessità di raggiungere un compromesso tra accuratezza dello studio e complessità di quest'ultimo.

Ricorrere a questo modo di elaborare le forme influisce sui risultati che si possono ottenere, tale modo è legato alla

complessità dei passaggi che risultano, allo stesso tempo, facilitati dall'uso dei computer. È quindi possibile passare dalla modellazione alla verifica, con eventuali modifiche per ottimizzare la forma e la struttura, all'analisi del risultato finale con l'inserimento virtuale nel contesto in cui andrà poi a realizzarsi l'opera.

MESH

La *Mesh* è il modo più veloce per rappresentare una superficie andando a scomporre la geometria in facce triangolari. I software consentono di aumentare la risoluzione della maglia mostrando la superficie come liscia. Il grado di approssimazione raggiungibile con questo metodo consente di ottenere delle strutture stabili e complesse. L'esempio più notevole in cui si è fatto uso delle *mesh* triangolari è quello della cupola geodetica realizzata da R. Buckminster Fuller⁷² per l'Esposizione Universale e Internazionale che si tenne in Canada nel 1967, la Biosfera di Montreal.

Se si vuole ridurre la complessità dei nodi, quindi passare da sei a quattro aste convergenti in un solo punto, bisogna allora ricorrere alla *mesh* quadrangolare; queste però hanno lo svantaggio legato alla possibile non planarità delle facce

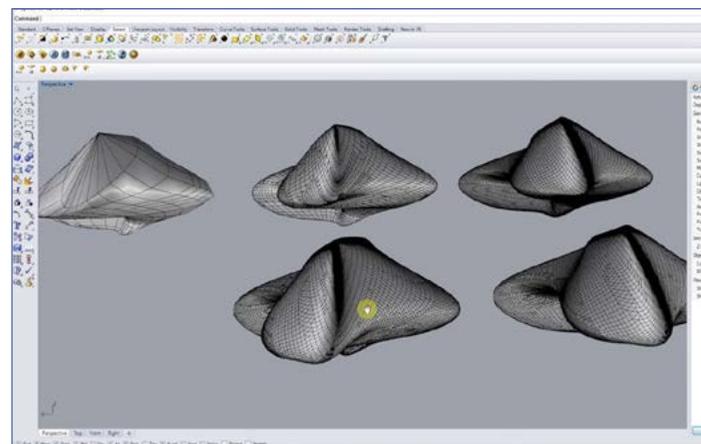


Figura 5.1: alcuni esempi di Mesh elaborati su Rhino

72. Richard Buckminster Fuller: Architetto statunitense (Milton, Massachusetts, 1895 - Los Angeles 1983); ideò e realizzò cupole geodetiche, costituite da elementi prefabbricati di forma geometrica (prevalentemente tetraedri o ottaedri) in metallo o in plastica collegati con giunti nodali. (N. Pevsner, J. Fleming e H. Honour, Renato Pedio (a cura di), Dizionario di architettura, Einaudi, Torino, 1992, pagg. 238-239.)

che risulta invece essere una caratteristica fondamentale per limitare i costi legati alla realizzazione dovuta al fatto che gli elementi hanno una forma più semplice da realizzare. I programmi di modellazione parametrica consentono di aumentare i vincoli legati alla planarità e quindi di modificare la geometria del progetto, affiancando il metodo geometrico che invece cerca di approssimare le superfici libere con altre legate alla traslazione e alla rotazione. A questo tipo di approccio si aggiungono le matrici matematiche (implementazione del processo legato alla razionalizzazione delle superfici libere) che tramite algoritmi consentono di distribuire adeguatamente i vertici della *mesh* sulla superficie in studio. Il primo risultato viene ottenuto tramite l'algoritmo di perturbazione⁷³ dei vertici il quale, in sinergia con altri algoritmi generanti *mesh* quadrilatera, permette di realizzare delle superfici le cui facce risultino piane. Con questo concetto vengono introdotte anche le *mesh* coniche dotate di *offset* dei vertici e delle facce che hanno come risultato l'ottenimento di *mesh* parallele⁷⁴ poste alla stessa distanza lungo tutta la superficie; questa loro caratteristica restituisce una struttura di sostegno regolare dal punto di vista geometrico e con torsione nulla nei nodi. Un ulteriore miglioramento è stato ottenuto con l'introduzione delle reti di curve coniugate le quali permettono di raffinare, e quindi migliorare, le superfici *mesh* del progetto. Il principio di base ricorre all'uso di una rete di curve, con superficie sviluppabile discreta, in modo da ottenere una griglia di polilinee volte alla discretizzazione di tale rete. Il procedimento può anche essere inverso, ovvero una volta ricavata la rete di curve sarà la *mesh* quadrangolare ad essere allineata ad essa, e poi planarizzata tramite il processo di perturbazione dei vertici mediante algoritmi.

73. Si indica con perturbazione ogni modificazione indotta nel movimento di un corpo da cause secondarie rispetto a quelle principali che causano gli spostamenti. (www.treccani.it)

74. Con corrispondenza biunivoca tra i vertici e i lati delle superfici Mesh ottenute.

5.1 Programmi

Le nuove tecnologie informatiche hanno portato allo sviluppo di nuovi programmi per la progettazione e la modellazione 2D e 3D, nonché nelle metodologie di calcolo e di verifica strutturale. I programmi CAD di tipo vettoriale, da sempre usati per la realizzazione dei disegni geometrici, sono stati affiancati dai programmi di modellazione 3D che, grazie ad applicazioni di tipo parametrico, permettono di migliorare il controllo di forme e dimensioni. I moderni progettisti ricorrono a questi *software* per poter modellare nello spazio le superfici complesse che altrimenti non potrebbero essere descritte con la geometria tradizionale. Questi programmi consentono una modellazione complessa perché fanno ricorso al metodo delle NURBS e questo consente di manipolare facilmente le superfici: il computer permette di sperimentare nuove superfici che prendono forma nello spazio e che, una volta definite, consentono di ospitare la funzione designata dal progettista. Il metodo prende il nome di *definizione delle forme dal volume*, quando il volume è pensato sin dall'inizio su computer; se il progetto nasce da una modellazione fisica tridimensionale in scala (realizzazione di un plastico a partire da schizzi progettuali) che viene poi acquisita mediante laser scanner e trasferita a *software* CAD il quale, una volta acquisite le informazioni sotto forma di nuvola di punti, le rielabora in digitale (geometrizzazione), correggendo le irregolarità e apportando eventualmente modifiche volte a migliorare la forma finale in modo che questa corrisponda a quella desiderata, allora il metodo prende il nome di *reverse modeling*.

Parte importante della progettazione mediante *defi-*

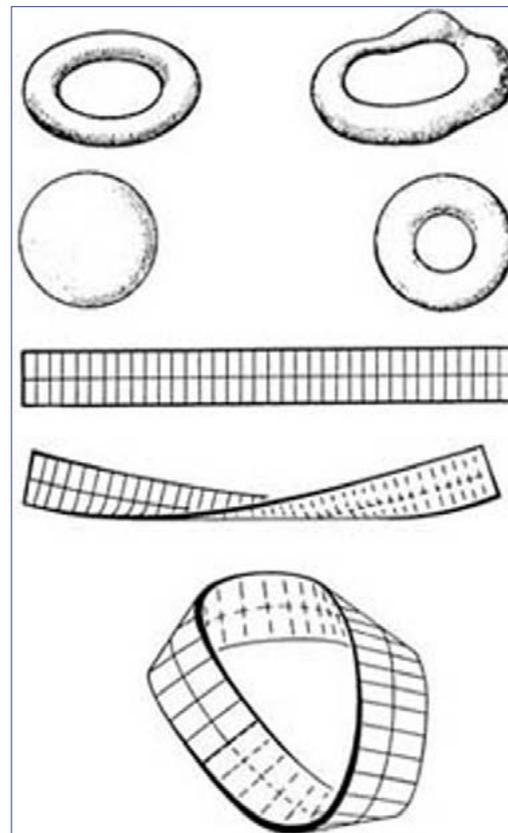


Figura 5.2: Esempio di superci topologiche e nastro di Möbius

75. Il nastro di Mobius è una striscia di carta incollata alle estremità, dopo aver subito un mezzo giro di torsione. L'anello così ottenuto è diventato una delle figure più importanti del panorama matematico perché se si prova a percorrerne la superficie si torna al punto di partenza senza dover staccare il dito da essa; quindi la figura presenta una sola superficie a differenza delle altre figure geometriche, ad esempio il cilindro, che invece ne presentano due ovvero una superiore ed una inferiore. August Ferdinand Mobius: Matematico e Astronomo (Schulpforta, Germania, 1790 - Lipsia 1868), fu professore di astronomia nell'università di Lipsia e anche direttore del locale Osservatorio astronomico; considerato una delle personalità più geniali nel panorama geometrico del XIX secolo il cui contributo fu fondamentale per lo sviluppo della geometria proiettiva; si occupò anche di statica e di ottica. Geometria proiettiva: parte della geometria che definisce e studia gli enti geometrici, come punti e rette, senza utilizzare misure o confronto di lunghezze. Nata nel XVII secolo come alternativa per il disegno in prospettiva, si sviluppa ampiamente nella prima metà del XIX secolo. Viene definita anche come la geometria "vista da un occhio solo".

76. FEA: Analisi agli Elementi Finiti, dall'inglese Finite Element Analysis

77. FEM: Metodo degli Elementi Finiti, dall'inglese Finite Element Method

78. Equazioni differenziali alle derivate parziali: equazioni che esprimono le relazioni intercorrenti tra una o più funzioni incognite e le loro derivate. Quando tra le funzioni intercorre più di una relazione si hanno i sistemi di equazioni differenziali; se le funzioni incognite, con le relative relazioni, dipendono da una sola variabile le equazioni differenziali prendono il nome di ordinarie; quando, invece, le funzioni e le relazioni collegate dipendono da più variabili allora le equazioni differenziali vengono chiamate alle derivate parziali. Questo tipo di equazioni sono alla base di molti modelli presenti nelle diverse discipline scientifiche. I modelli matematici basati su queste diverse tipologie di equazioni, si ottengono a partire da leggi sicche fondamentali ma anche da approssimazioni fenomenologiche con definiti livelli di approssimazione di scala di descrizione spaziale e temporale. L'uso di un determinato modello è legato al grado di precisione che si vuole ottenere, dalla scala a cui si sta lavorando, ecc., e comunque il fatto di basarsi su modelli fenomenologici legati all'esperienza empirica porta ad una semplificazione della complessità del problema. Le equazioni devono garantire almeno una soluzione. (www.treccani.it)

nizione della forma del volume è costituita dalla possibilità di esplorazione dell'oggetto in via di definizione, ovvero non ci si limita ad analizzare un solo modello ma più modelli con conseguente approfondimento nello studio del comportamento delle superfici sottoposte alle diverse deformazioni, analizzando quindi come vanno a modificarsi nel tempo e nello spazio. Questo tipo di studio è utile per introdurre dei piani sia interni sia esterni che vanno a creare intersezioni in continuo mutamento morfologico: l'esempio più conosciuto è quello offerto dal nastro di Mobius⁷⁵. La tecnica usa delle sezioni variabili, poste su piani paralleli, dalle quali si ottengono delle curve modificabili tramite i punti di controllo. Una volta che si ha a disposizione un certo numero di curve vengono interpolate generando così la superficie e anch'essa può essere modificata per mezzo dei punti di controllo a lei connessi. Utile per ottenere uno studio approfondito della forma e del suo comportamento è il metodo del *morphing*, ovvero una trasformazione della geometria seguita passo passo dall'inizio alla fine del processo di modellazione.

Le forme ottenute con questi nuovi programmi sono quindi composte da superfici costituite da curve, ognuna delle quali è impostata su di un algoritmo che permette di controllarne le geometrie (parametri e dimensioni). Durante la simulazione al computer le analisi vengono effettuate agli elementi finiti (FEA)⁷⁶ ovvero la simulazione fa riferimento al metodo degli elementi finiti (FEM)⁷⁷, in modo da cercare di risolvere in forma discreta e approssimata sistemi di equazioni alle derivate parziali.⁷⁸

Alcuni di questi programmi sono stati utilizzati durante il workshop Morfogenesi Computazione per risolvere la forma, le

dimensioni, la *texture* e la struttura di ciò che si andava progettando.

RHINOCEROS

È un *software* per la modellazione 3D che permette di elaborare superfici complesse e sculturate, ovvero forme libere.

Il programma è in grado di disegnare e successivamente di modificare, analizzare, verificare, realizzare render e fare animazioni di curve, superfici, solidi, nuvole di punti e *mesh* poligonali. Le diverse entità geometriche vengono rappresentate attraverso le NURBS e questo comporta che non vi siano limiti dovuti alla complessità del progetto che, quindi, può essere anche di rilevanti dimensioni.

L'interfaccia propone una serie di comandi e strumenti per la modellazione di *Free Form* 3D, con la caratteristica di poter plasmare ogni forma possibile, con unico limite l'immaginazione, e la precisione consente di progettare qualunque tipo di oggetto da un gioiello ad un macchinario e/o struttura complessi. Questo perché Rhino permette di disegnare in modo rapido il modello ed eventualmente di modificarlo, anche dal punto di vista estetico, e di visualizzare subito l'effetto che si otterrà; come accennato un altro dei pregi che lo caratterizzano è la precisione che si può riscontrare durante la realizzazione dei prototipi, nella progettazione, nelle analisi, praticamente nella realizzazione di qualsiasi modello e che nasce proprio dalla combinazione dell'accuratezza che, solitamente, caratterizza i sistemi CAD tradizionali con la flessibilità che emerge dalle tecnologie basate sulla modellazione *spline*, la quale utilizza le superfici NURBS per sagomare in modo accurato

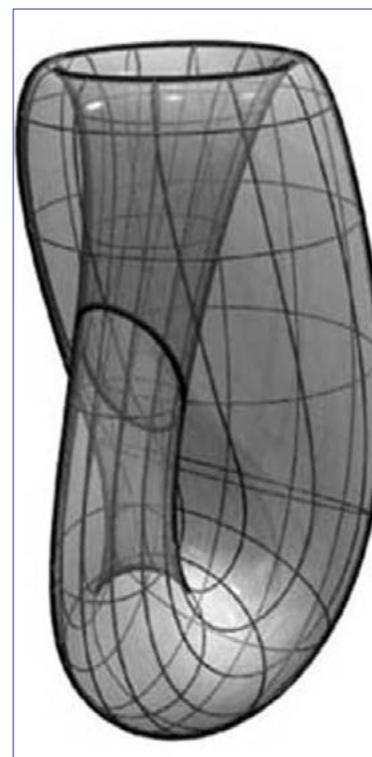


Figura 5.3: Bottiglia di Klein

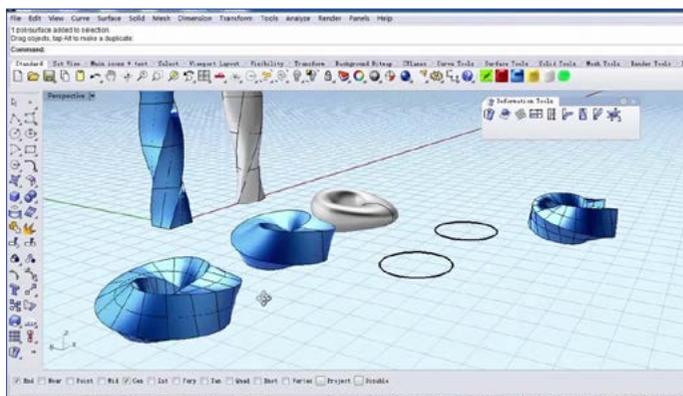


Figura 5.4: elaborazione del nastro di Moebius su Rhino

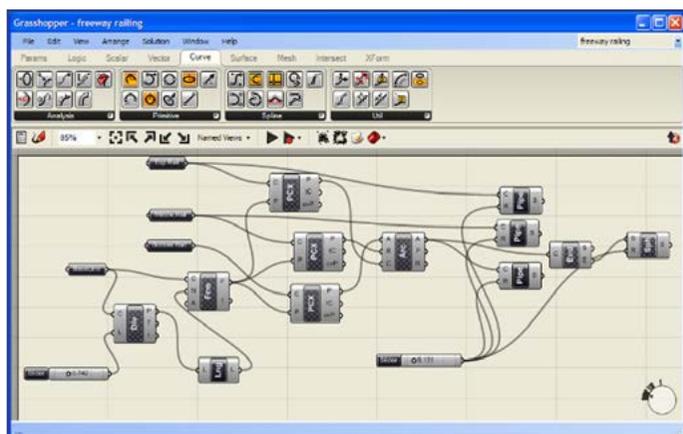


Figura 5.5: esempio di struttura di Grasshopper

79. I plug in permettono di ampliare e modificare un software, personalizzandone le funzioni ed eventualmente aggiornandolo.

80. Linguaggio di programmazione interpretato: usato per compiti di automazione del sistema operativo e delle applicazioni, ma anche per realizzare le pagine web.

81. Linguaggio di programmazione di utilizzo abbastanza facile che permette di apportare modifiche, ma anche di creare nuove funzioni, ai programmi.

le forme e le curve (*trimmed Free Form*).

Il programma in questione è compatibile con la maggior parte dei programmi di disegno, ingegnerizzazione, illustrazione e analisi, quindi i le generati possono essere esportati e letti da questi software; ha anche la possibilità inversa, ovvero di importare, e quindi leggere, molti formati i quali possono pertanto venir rielaborati direttamente su *Rhino*.

Le funzionalità di *Rhino* possono essere ampliate grazie ai *plug-in*⁷⁹ come, ad esempio, *Grasshopper* che permette di progettare in modo parametrico, migliorandone l'uso come programma di progettazione architettonica.

Grazie allo *scripting*⁸⁰ che si basa sul linguaggio *Visual Basic*⁸¹ è possibile leggere e scrivere direttamente i comandi ed, eventualmente, apportare modifiche o integrazioni.

GRASSHOPPER

Questo *plug-in* è uno dei più conosciuti ed utilizzati in quanto consente di potenziare ed estendere le funzioni di *Rhino*. *Grasshopper* rientra nella categoria degli *editor visuali* per lo *scripting*, gratuito e pensato per essere usato anche da chi non ha conoscenze di programmazione. Questa facilità nell'utilizzo del programma è possibile perché è stato usato un metodo grafico intuitivo che si basa su di un'interfaccia a nodi che consente all'utente di definire delle sequenze di istruzioni che vengono poi rielaborate e trasformate in modelli 3D all'interno della finestra di *Rhino*.

Viene a modificarsi, così, la definizione della forma in quanto ottenuta dalla modellazione attraverso gli algoritmi che, a differenza dei soliti programmi di modellazione, ricorre ad un approccio logico-matematico affiancato da una fase di studio più articolata nonostante il metodo grafico usato da

Grasshopper sia molto intuitivo e consenta un' esecuzione semplice anche di operazioni difficili.

GALAPAGOS

Viene utilizzato per cercare di risolvere i problemi posti dal processo di ottimizzazione delle forme e delle superfici. Si cerca di usare quindi algoritmi che permettano di:

- trovare soluzioni con un basso costo computazionale in termini di numero di valutazioni delle funzioni da ottimizzare, con conseguente risparmio di tempo;
- garantire risultati corretti ed adatti alle grandezze in esame;
- modificare il *range* nel quale vengono a trovarsi i valori ottimali.

Facendo riferimento agli algoritmi stocastici⁸², il programma fornisce una piattaforma generica, accessibile anche ai non programmatori, per l' applicazione degli Algoritmi Evoluzionari⁸³, che possono essere usati in una varietà di problemi.

Gli Algoritmi Genetici vengono utilizzati per indagare una popolazione di probabili soluzioni, secondo il principio della sopravvivenza dell'individuo migliore, in modo da trovare una soluzione del problema che sia il più vicino possibile a quella reale. Ogni generazione crea un insieme di soluzioni secondo il processo di selezione basato sul livello di adeguatezza, definito come Fitness, per poter poi selezionare i membri della popolazione più adatti, evolvendoli tramite una serie di operatori genetici: pertanto è un processo volto alla ricerca degli individui che meglio rispondono alle esigenze di soluzione del problema iniziale. In questo settore gli individui componenti la popolazione

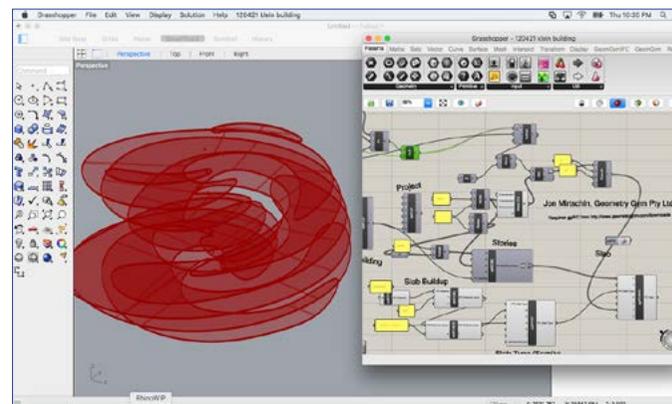


Figura 5.6: modellazione di una forma su Rhino e successive modifiche con Grasshopper

82. Gli algoritmi stocastici sono algoritmi che si rifanno alle regole dei fenomeni naturali, indipendenti dal problema di cui ci si va ad occupare. Fanno parte degli algoritmi di ordine zero per cui non occorre valutare le derivate della funzione (massimi e minimi).

83. Gli algoritmi evolutivi sono incentrati su di uno schema di ottimizzazione iterativa volta ad esplorare lo spazio delle caratteristiche del sistema.

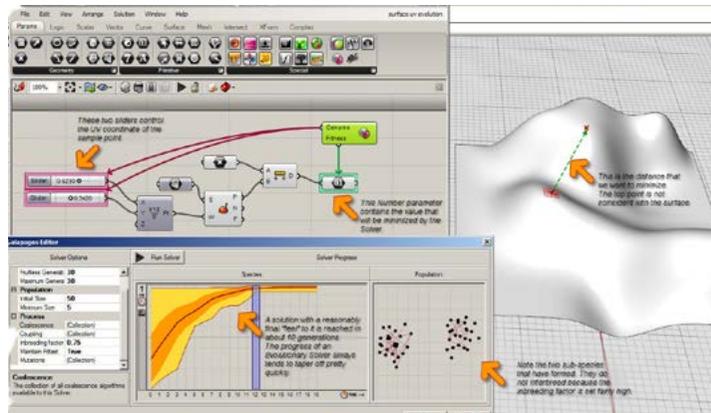


Figura 5.7: interfaccia di Galapagos durante la ricerca di una famiglia

vengono codificati a modo di stringa denominata Cromosoma. Ogni soluzione è collegata ad una Fitness, in quanto è la soluzione che meglio risponde alle esigenze del problema in esame. Gli individui che si adattano meglio all'ambiente sono anche quelli in grado di resistere, ovvero sopravvivere e riprodursi, e questa regola vale non solo in natura ma anche in questo tipo di algoritmi: per cui le soluzioni migliori sono anche quelle con la probabilità più alta di trasferire le loro informazioni (geni) alle future generazioni. Una volta individuata la Fitness media della popolazione saranno gli individui con quella con valore più alto ad essere selezionati come genitori per la generazione futura di soluzioni. Una volta selezionato il numero di individui, l'algoritmo genetico provvede al calcolo di ricombinazione dei dati genetici dei genitori, generando i gli cioè la futura generazione di soluzioni. Quest'ultima va a sostituire la precedente, dalla quale è stata generata per ricombinazione dei dati. Questo processo viene ripetuto x volte, no ad ottenere un'approssimazione accettabile e quindi idonea alla soluzione del problema iniziale.

Agli Algoritmi Genetici si affianca un'altra famiglia: gli Algoritmi Evolutivi, denominati *Particle Swarm Optimization (PSO)*⁸⁴. In questo caso la ricerca della soluzione migliore, all'interno dello spazio delle soluzioni possibili, viene assegnata agli individui della popolazione che ottengono il maggior successo, con conseguente equilibrio tra ricerca locale e globale. Metodo nato come simulatore del comportamento sociale, ben si applica alla risoluzione, rapida ed efficiente, di diversi problemi di ottimizzazione. Quindi la PSO unisce la ricerca sociale dell'ottimo con la ricerca globale, per trovare il giusto equilibrio tra esplorazione⁸⁵ e sfruttamento⁸⁶. Importante è il concetto che permette di individuare quali individui vengo-

- 84. Particle Swarm Optimization: Ottimizzazione a Sciami di Particelle.
- 86. Trarre vantaggio dai successi degli altri.
- 85. Cercare intorno una buona soluzione

no influenzati e quali meno.

OASYS GSA

Oasys GSA, proposto anche in Suite, è uno strumento utile ai progettisti che lavorano a tensostrutture o a *gridshell*, in quanto permette di eseguire le analisi necessarie sulla forma della struttura e sulla *texture*, consentendo quindi una proposta più azzardata del disegno complessivo del progetto. Questo perché il programma consente di analizzare la forma, ed il suo comportamento ai carichi applicati, mediante lo studio dei materiali pensati per l'edificio e la loro disposizione, grazie alla presenza di un formulario e ad un database con le informazioni sui diversi materiali da costruzione, nonché il riferimento alle normative vigenti in ambito di sicurezza e stabilità strutturale. Quindi, in base ai risultati ottenuti, è possibile trovare la forma ottimale della struttura, rispondente a tutti i requisiti di sicurezza e all'idea del progettista per il suo disegno.

Il programma presenta un'interfaccia facile da usare che quindi velocizza le tempistiche della riproduzione su grafica digitale del modello, ma consente anche di importare la forma già disegnata con altri programmi CAD.

Diversi sono i progetti importanti realizzati passati attraverso le analisi compiute da questo tipo di software, come ad esempio il MoMA⁸⁷ ed il Water Cube⁹⁰.

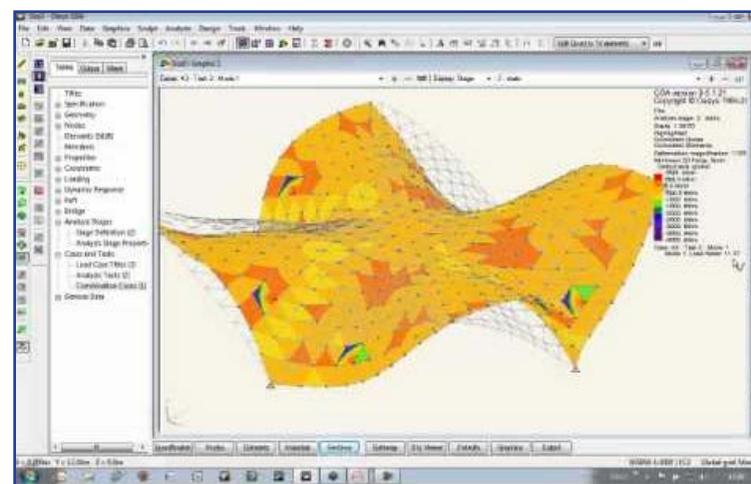


Figura 5.8: verifica di una gridshell con il programma Oasys

87. MoMA: Museum of Modern Art a New York, ampliamento del 2002 su progetto dell'Architetto giapponese Yoshio Taniguchi. Yoshio Taniguchi: Architetto giapponese (Tokyo 1937) laureatosi in Ingegneria meccanica nel 1960 ha poi conseguito, nel 1964, il master in Architettura. Si è specializzato nella progettazione di edifici pubblici e musei, vincendo anche diversi concorsi. www.britannica.com (Encyclopaedia Britannica).

88. The Water Cube: National Aquatics Centre a Beijing, progetto del 2003 dello studio PTW Architects con la collaborazione del CSEEC International Design ed il supporto degli ingegneri strutturali della Arup.

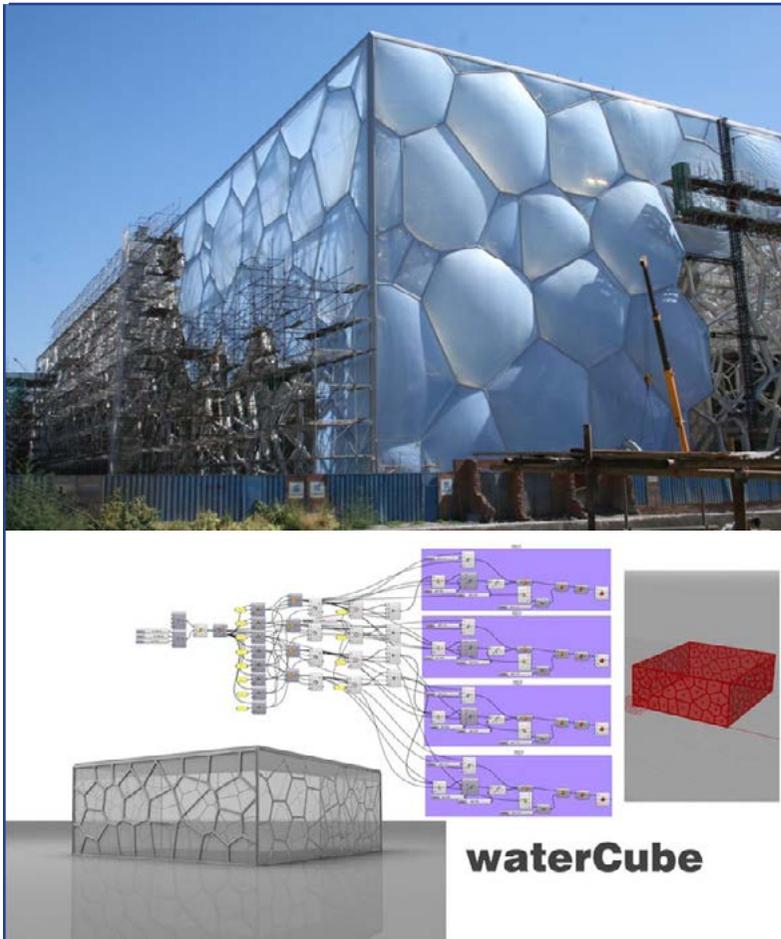


Figura 5.9: The Water Cube di Pechino 2003-2008; in alto fase di realizzazione; in basso studio della forma.



**WORKSHOP
MORFOGENESI
COMPUTAZIONALE**
PRESENTA



coordinamento: Mario Sassone

Evento inaugurale
22 novembre 2013 - ore 17.30
parcheggio via Borsellino
verso il laboratorio LATEC



 **POLITECNICO
DI TORINO**
Dipartimento di
Architettura e Design

 Brickshell

 Open Architecture
Network

Capitolo 6

Workshop: Morfogenesi Computazionale



Capitolo 6

Workshop: Morfogenesi Computazionale

IMPOSTAZIONE GENERALE DEI WORKSHOPS DI MORFOGENESI COMPUTAZIONALE

« Il workshop ha come obiettivo la formazione di una competenza critica nell'uso delle tecnologie computazionali finalizzate alla generazione di forme architettoniche attraverso l'uso di algoritmi generativi (Computational Morphogenesis). Verranno indagate sia le metodologie legate ad applicativi di carattere commerciale (Rhinceros, Grasshopper, Generative Components etc.) sia le possibilità di sviluppo creativo da parte dagli utenti (in ambiente Rhinoscript o VBasic), attraverso l'acquisizione delle abilità di base, l'applicazione ad uno o più caso studio progettuale e la realizzazione finale di un prototipo in scala reale o ridotta. Nella prima fase del workshop l'attenzione è posta sulle modalità di funzionamento di tali strumenti computazionali, non tanto dal punto di vista tecnico-informatico, quanto dal modo in cui permettono di gestire il progetto (parametrizzazione, invarianza topologica, ottimizzazione), al fine di sviluppare una consapevolezza critica sulle reali potenzialità della tecnologia. Nella seconda parte il workshop porterà ad una esperienza di autocostruzione, su un prototipo strutturale, finalizzata ad indagare le implicazioni costruttive della morfogenesi computazionale, la componente reale rispetto a quella virtuale. Il prototipo sarà frutto di una progettazione condotta con metodi morfogenetici, in modo da mettere in evidenza il significato concreto delle scelte progettuali. »⁹¹

91. <https://didattica.polito.it/pls/portal30/sviluppo.guide.visualizza>

6.1 Workshop

Il workshop, che si è svolto nel secondo periodo didattico, proposto dal professore Mario Sassone agli studenti delle Lauree Magistrali di Architettura del Politecnico di Torino, è stato un'occasione per mettere insieme le diverse conoscenze acquisite dagli studenti nel corso degli anni volte ad ottenere un progetto che non rimanesse solo su carta ma che potesse anche essere realizzato. L'intento era organizzare un *brainstorming* tra il gruppo di ragazzi iscritti al corso in modo da formare non piccoli gruppi, come si è di soliti abituati a lavorare, ma un'unica classe impegnata nel trovare le soluzioni più idonee per la progettazione di un edificio. Ciò ragionando a partire dall'idea di cosa realizzare attraverso tutte le fasi della progettazione fino alla costruzione, passando per la verifica strutturale, con la collaborazione tra studenti docente e collaboratori. Si può quindi suddividere il workshop in diverse fasi, ognuna con lo scopo di raggiungere determinati obiettivi: formativi, cognitivi, progettuali e pratici.

6.1.1 Studio

La prima parte del workshop, dedicata alla teoria, è stata suddivisa in parti distinte ma correlate tra loro, ovvero: la spiegazione della *Morfogenesi Computazionale*, gli esempi tratti dalle realizzazioni degli architetti, l'introduzione dei programmi che sarebbero stati utilizzati nel corso dell'esercitazione, l'impostazione del lavoro come risultato del confronto delle idee di tutti i partecipanti. Durante le lezioni teoriche sono intervenuti dei dottorandi del settore disciplinare della scienza delle costruzioni, per

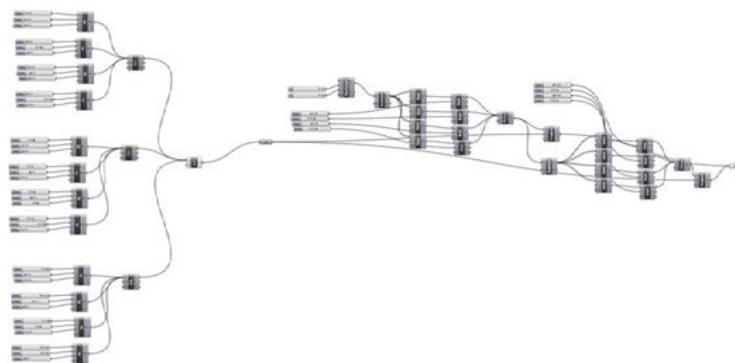


Figura 6.1: schema generato si Grasshopper e poi utilizzato per controllare la forma del nostro progetto

apportare contributi specifici. Questi hanno approfondito alcuni temi come ad esempio le evoluzioni delle *texture* che si possono ottenere con i mattoni in base alle diverse tradizioni costruttive. L'uso delle *open source*⁹² come contributi determinanti per l'evoluzione delle tecnologie informatiche e della comunicazione, è stato legato alla decisione di ottenere volte complesse ed elaborate utilizzando uno dei materiali più antichi della storia dell'edilizia: il mattone.

Parte fondamentale delle lezioni teoriche è stata riservata all'introduzione dei programmi più significativi per lo studio e la progettazione delle forme complesse. Tali programmi danno una restituzione grafica ottimale grazie all'uso di *plug-in* che trasformano da semplice programma vettoriale a programma parametrico, in modo da rendere possibile un controllo più preciso della forma. Il primo ad essere introdotto è stato *Rhino*[®] con il suo *plug-in Grasshopper*[®], seguito da *Galapagos*[®] per la ricerca della genetica delle famiglie di punti più adatti alla risoluzione della forma e *Oasys GSA 8.6* per la verifica statico-strutturale del progetto. [Per questi programmi, cfr. Capitolo 5 in questa tesi.]

6.1.2 Progettazione

La tavola rotonda, che si svolgeva durante la lezione, permetteva a tutti gli studenti di proporre una funzione possibile all'interno del campus universitario, che potesse fornire un servizio aggiuntivo per gli studenti. Ciò corredato dalla presentazione di esempi per rafforzare la proposta e motivarla durante il dibattito.

Una volta decisa la destinazione d'uso, le forze indirizzate alla ricerca di esempi già realizzati in modo da avere diver-

92. Termine utilizzato per indicare un software i cui autori rendono pubblico il "codice sorgente". Questo permette ad altri di poter apportare modifiche ed estensioni, migliorandolo.

si spunti dal punto di vista della forma, dei materiali, dei *pattern*, etc.

La scelta si è orientata su un luogo per la meditazione, quindi ci siamo concentrati su quali esigenze richieda un edificio per questo scopo: quali dimensioni avrebbe dovuto avere, quante persone ne avrebbero usufruito, in quale luogo era meglio collocarlo, l'orientamento, la forma più idonea, le dimensioni ottimali, il materiale con cui realizzarlo.

Il risultato delle idee di tutti gli studenti partecipanti al workshop è stato quindi un edificio impegnativo per forma e destinazione d'uso, che poteva essere realmente costruito come struttura temporanea dalle dimensioni planimetriche di circa 5x3 m per un'altezza massima di 2,10 m.

ELABORAZIONE E MATERIALI

L'edificio è il risultato di diversi passaggi che hanno permesso di ottimizzare la dimensione e la forma; queste ultime infatti, sono state analizzate studiando con *Grasshopper*: tutta una serie di comandi e *slide* di controllo dei parametri fondamentali che permettono di andare a modificare singole parti o porzioni di struttura. Inoltre con il programma *Rhino* il progetto poteva assumere figure armoniose.

Una volta definita la forma si è passato a decidere quale *texture*, e quindi quale disposizione del materiale, risultasse più idonea a ricoprire l'intera superficie, con il minor dispendio di materiale. Inoltre l'individuazione di eventuali punti critici avrebbero quindi richiesto la realizzazione di pezzi speciali, utilizzando unicamente tagli di precisione. Diverse sono state le forme proposte per il disegno di par-

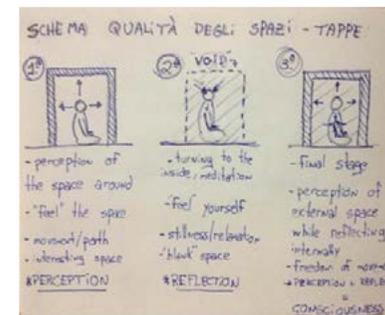


Figura 6.2: Studio dello spazio.

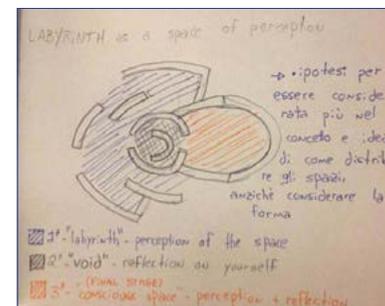


Figura 6.3: Alcune idee di distribuzione degli spazi.

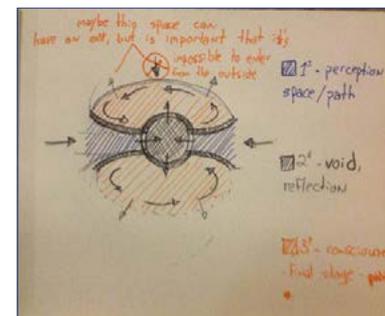


Figura 6.4: Alcune idee di flussi.

tenza della pianta e la scelta si è rivolta alla forma dell'ellisse, che si prestava per ottenere un modello complesso.

Con lo studio della forma, si imponeva la scelta del materiale che sarebbe stato più idoneo per l'eventuale costruzione in scala reale del progetto: legno, laterizio, calcestruzzo, polistirolo... La scelta che è sembrata più interessante, per portare avanti la realizzazione dell'edificio, è stata il mattone: elemento da costruzione classico, economico, abbastanza facile da maneggiare. Si è deciso il tipo di legante da utilizzare, il più adatto sarebbe stato una malta a base cementizia. La limitazione, legata al permesso rilasciato dal Politecnico per la sua edificabilità, consisteva in un edificio temporaneo. Ciò ha portato all'opzione per un legante che sarebbe stato resistente ma che, allo stesso tempo, avrebbe reso semplice la demolizione. Le prestazioni che più si avvicinavano alle esigenze di "cantiere" erano quelle offerte dalla scagliola per cui, una volta definito il legante, occorreva impostare la "ricetta" che avrebbe permesso all'elemento costruito una robustezza e una resistenza. Dopo alcune proposte, seguite da prove (eseguite direttamente in cantiere), l'impasto è stato così formulato:

- 3 parti di scagliola,
- 1 parte di sabbia,
- 1 parte di acqua.

Per quanto riguardava il tipo di mattone da utilizzare, abbiamo scelto una tavella a tre fori delle dimensioni di 35x12x3,5 cm.

6.2 Realizzazione

Il workshop aveva a disposizione i locali e gli attrezzi del LA-TEC (laboratorio del Politecnico con sede nel complesso del-

le aule di via Boggio). È stato possibile usufruire di questi spazi perché l'area destinata alla realizzazione della costruzione era un'area del parcheggio tra via Boggio e corso Einaudi.

Anche il processo di realizzazione può essere suddiviso in fasi principali:

- il disegno delle centine,
- la costruzione delle centine,
- il montaggio delle centine,
- l'allestimento del cantiere,
- la costruzione,
- lo scasseramento.

La prima parte del lavoro, quindi, ha visto tutti gli studenti impegnati nel disegno in scala reale delle centine: dopo aver proiettato l'immagine in scala 1:1 sopra cartoni di recupero (Fig.6.9), si è proceduto a ritagliare le sagome per poi assemblarle; in questo modo sono stati ottenuti diversi elementi che andavano poi a comporre i blocchi nei quali la struttura era stata suddivisa.

Una volta ottenuti i diversi componenti è stata allestita l'area di cantiere (procedendo con la recinzione delle aree di lavoro e la segnalazione del cantiere). È stata ricomposta la struttura ottenuta con i cartoni in modo da avere le centine al posto assegnato dalla suddivisione digitale, ottimizzata dai calcoli effettuati con i programmi di grafica ed analisi digitale.

Per comodità di realizzazione la costruzione è stata suddivisa in spicchi ed ha seguito un ordine che consentisse di poter arrivare comodamente alla sommità della volta in ogni sezione. Questo lavoro si era reso necessario perché non c'era un'attrezzatura quali ponteggi per consentire di



Figura 6.5: Il disegno delle centine. Foto A. L.



Figura 6.6: Il taglio delle centine. Foto M. R.



Figura 6.7: Le centine da assemblare. Foto M. R.



Figura 6.8: Assemblamento centine. Foto M. R..



Figura 6.9: Allestimento cantiere. Foto M. R.



Figura 6.10: Assemblaggio centine. Foto M. R.



Figura 6.11: Posa dei primi mattoni. Foto M. R.

raggiungere agevolmente la sommità della curvatura senza creare situazioni di pericolo per chi si sarebbe occupato della posa dei mattoni nel punto più alto.

INAUGURAZIONE

Il lavoro realizzato durante il workshop è stato presentato a tutti gli studenti e simpatizzanti della Facoltà di Architettura, in concomitanza dell'inizio del nuovo anno accademico. Durante l'evento (Fig.6.17), la spiegazione del workshop e del lavoro svolto è stata accompagnata dalla proiezione dei passaggi più significativi di tutta la fase progettuale e realizzativa della costruzione.

6.3 Considerazioni sul Workshop

Le esperienze condotte hanno dimostrato un crescente interesse da parte degli studenti alle attività congiunte tra teoria e pratica. In sostanza le realizzazioni dei modelli richiamati ha costituito una delle rare esperienze che il modello didattico del Politecnico offre agli studenti. Pertanto si ritiene che queste attività debbano/possano essere riproposte per una migliore comprensione tra studio teorico e quello pratico. Ciò anche in considerazione che le attività alle quali sarà portato un architetto, dovranno riguardare non solo calcoli, studi ma anche lavori di costruzione.



Figura 6.12: Brickshell. Foto M. R.



Foto 6.17 Inaugurazione

L'esperienza didattica del *workshop* Morfogenesi Computazionale è stata riproposta nell'anno successivo con una attiva partecipazione di studenti della Facoltà. Nel seguito si riportano alcune immagini di risultati ottenuti su *Brickshell*, *Fracshell* e *Foldshell*.









Capitolo 7

Brick patterning

Durante la costruzione del *Brickshell* il problema principale incontrato è stato quello che riguardava la disposizione dei mattoni nei punti più critici, legati all'andamento della curvatura della superficie. Il lavoro si interrompeva per poter studiare il modo migliore di disporre il mattone in quel punto e per la realizzazione dell'eventuale taglio necessario per far quadrare l'andamento del corso di mattoni. Per questo motivo si è pensato che se già dal momento della progettazione, oltre a pensare al tipo di orditura da utilizzare, era necessario predisporre del tempo per far funzionare il sistema. In questo modo sarebbe stato possibile studiare a monte il problema delle criticità e, pertanto, pensare ad una soluzione più efficace che consentisse di ottenere dei mattoni studiati appositamente per quei punti, permettendo quindi di prepararli in anticipo in modo di avere a disposizione sin da subito tutto il materiale pronto.

La soluzione migliore è stata trovata disegnando e inserendo i mattoni nel progetto ma, la gestione di un disegno di tale precisione diventava alquanto complicata, lunga e non sempre efficiente. Come ovviare a questa difficoltà? E' stata una delle domande alle quali dovevamo rispondere mentre si cercava di disporre i mattoni nel modo migliore e, la soluzione alla quale si è giunti, è stata quella di realizzare dei comandi appositamente studiati per *Rhino*[®] che consentissero la modellazione dei mattoni e la loro disposizione sulla superficie progettata. La dottoranda Shaghayegh Rajabza-

deh, dell'università di ...con dottorato presso il nostro Politecnico, ha usato come spunto della sua tesi di dottorato. Ha scritto un codice su *Python*⁹³ che, una volta inserito in *Rhino*®, le ha consentito di ottenere una serie di nuovi comandi dedicati al disegno e posizionamento dei mattoni. Ciò al fine di ottenere delle *texture* non solo estetiche ma anche funzionali, per capire se l'andamento e la disposizione dei mattoni risultassero essere quelli ottimali con collocazioni precise di ogni singolo componente. La finalità del lavoro è stata quella di istituire un efficace controllo di ogni elemento nella sua posizione e forma. La parametrizzazione permette infatti di ottenere elementi realizzabili con macchine a controllo numerico e quindi ottenuti esattamente come servono, senza sprechi di materiale, con un migliore uso di tempo e risorse. Questi nuovi comandi consentono di modellare in modo automatico il *pattern* di una struttura in mattoni; un'ottima soluzione per i lavori ripetitivi in quanto consente di ridurre il tempo di lavoro attraverso pochi comandi e passaggi.

Per dimensionare il mattone inizialmente si deve inserire le misure in un'apposita finestra nella quale va anche inserito lo spessore della malta di allettamento in modo da avere la giusta distanza tra un mattone e l'altro. Seguono poi una serie di comandi che consentono di disegnare i mattoni e di controllarne la disposizione. Nel seguito vengono riportati degli schemi che rappresentano le sequenze dei comandi al fine di ottenere il dimensionamento del mattone. Ciò può trovare interesse e riscontro specie per chi deve operare nell'ambito del recupero o restauro di parti murarie appartenenti all'edilizia storica.

E' possibile disporre i mattoni nei seguenti modi:

93. Python: linguaggio di programmazione utilizzato per lo sviluppo di *software*, che consente la scrittura di codici di qualità e manutenibilità di buon livello integrabili con altri linguaggi e programmi; viene distribuito con licenza *open source* e per questo motivo il suo uso \e libero e gratuito.

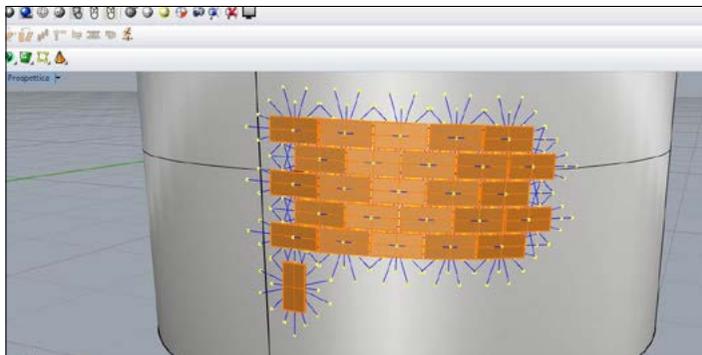


Figura 7.1: generazione dei mattoni su superficie curva
posizionati con orditura classica

- singolarmente, utilizzando l'icona `new brick`: consente di collocare un mattone andando a scegliere il punto in cui inserirlo ed il suo orientamento sulla superficie;
 - in linea con il comando `brick line`: permette di disporre un numero a scelta di mattoni. Una volta collocato il primo mattone sulla superficie e deciso come orientarlo, il comando chiede quanti altri mattoni disporre e in quale direzione;
 - a spina di pesce con l'icona `herringbone bond`: anche in questo caso una volta posizionato il primo mattone il comando chiede quante file e quante colonne occorrono e poi, indicata la direzione, provvede a disporre i mattoni a spina di pesce per ricoprire l'area interessata;
 - mattoni a giunti sfalsati grazie al comando `stretcher bond`: i mattoni si dispongono a file con le fughe verticali alternate, ovvero nel classico modo a cui siamo abituati a vedere nei muri con `mattoni a vista`.
- Sono presenti inoltre dei comandi specifici per poter correggere la posizione, quando necessario, dei mattoni già posizionati. Questi sono:
- `sposta`: selezionando un mattone consente di spostarlo sulla superficie;
 - `ruota`: il mattone selezionato può essere ruotato rispetto ad un angolo definito;
 - `smart line`: durante la disposizione dei mattoni *in linea* permette, dopo aver collocato quello di riferimento, di aggiustare la posizione e/o l'angolo di ogni mattone che viene posizionato successivamente fino a portare a termine la sequenza;
 - `smart stain`: consente durante la disposizione a *spina pesce* di aggiustare angolo e/o posizione dei mattoni che la sequenza andrà a disporre una volta inserito il primo matto-

ne di riferimento.

Nel caso in cui la disposizione necessiti di un mattone speciale tagliato per consentire il proseguimento della sequenza è possibile tagliare il mattone utilizzando il comando `special bricks`. Il comando lavora in questo modo: come prima cosa si va a selezionare il mattone di riferimento e poi quello che deve essere tagliato; si apre così una finestra di lavoro nella quale è possibile selezionare il piano di taglio e la porzione di mattone da mantenere in modo che il comando possa effettuare il taglio disegnando il mattone nella forma più appropriata per quel punto.

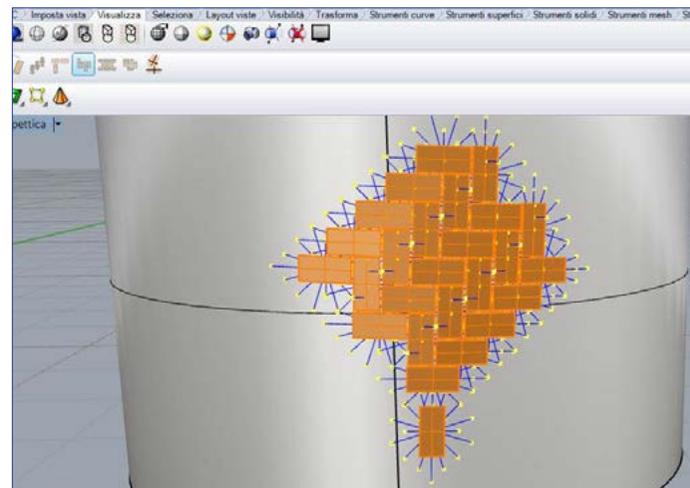


Figura 7.2: disposizione dei mattoni su di una superficie curva secondo l'orditura a "spina di pesce"

Conclusioni

La tesi di laurea ha preso in esame numerose architetture contemporanee, per arrivare a comprendere il sottile legame sia tra progettazione e ricerca della forma sia tra realizzazione e modellazione. Quest'ultimo aspetto ha visto un sostanziale cambiamento nell'ambito progettuale, non solo nell'ambito riguardante la scelta dei materiali, delle tecniche, delle tecnologie ma anche del cantiere.

Dalle analisi condotte durante lo svolgimento di questo lavoro si è potuto rilevare come sempre più progettisti per conferire una forma ottimale, e più o meno originale, alle loro architetture hanno implementato la parte riguardante la modellazione. Si è così sviluppata una progettazione mediante programmi sempre più articolati e complessi, che consentono il controllo parametrico delle forme in ogni punto della geometria proposta.

Un focus del lavoro di tesi, si è concentrato sulle strutture a guscio e sui diversi modi per ottenere una struttura particolarmente resistente e funzionale. Un altro punto che è stato preso in considerazione nella stesura di questa tesi è stato quello relativo all'esperienza del workshop di ateneo che ha progettato e realizzato (costruito) un modello in scala di una volta a guscio in muratura o *brickshell*.

Va tuttavia rilevato, che questa ricerca si è concentrata prevalentemente sugli aspetti concernenti la forma della struttura, aspetti che vanno ad influire sia sul comportamento statico sia sull'estetica. L'esame e la modellazione di tali strutture hanno occupato un intero capitolo.

Presi in considerazione anche altri fattori che solitamente interagiscono nel mondo delle costruzioni, si rileva che i risultati

tra forma, modellazione ed estetica, possono variare anche molto sensibilmente

La morfogenesi computazionale porta spesso a valutazioni, anche enfatiche, delle strutture con un rischio di farsi cogliere dalla prevalenza informatica dei programmi, quindi si è cercato di non uscire dal settore tecnico scientifico che l'area dell'architettura propone nel completamento del proprio corso di studi.

La tesi giunge ad una considerazione finale su possibili ulteriori e future ricerche su questo tema: l'implementazione dello studio con l'analisi di ulteriori elementi, sia della progettazione sia della modellazione, per determinare eventuali differenze che possono essere anche legate alla geografia dei luoghi, alla sensibilità dei progettisti, alle esigenze della committenza - solo per citarne alcuni - concentrandosi nel dettaglio su questi elementi più specifici e sulle diverse scelte progettuali che possono ad esse essere collegate.

A conclusione del lungo percorso di lavoro un'esperienza indubbiamente molto efficace è stata la realizzazione di un prototipo di volta ce ha consentito di toccare con mano ciò che era stato progettato, un'esperienza che si è potuta verificare offerta in molte università anche internazionali.





Bibliografia

P.L. Nervi, *Scienza o arte del costruire? Caratteristiche e possibilità del cemento armato*, Edizioni della Bussola, Roma 1945.

S. Giedion, *Spazio, tempo e architettura: lo sviluppo di una nuova tradizione*, Hoepli, Milano, 1965.

A.P. Michelis, *Estetica del cemento armato*, Vitali e Ghianda, Genova, 1968.

A. Pica, *Pier Luigi Nervi*, Editalia, Roma, 1969.

Philip Drew, *Frei Otto, Form and Structure*, Crosby lockwood Staples, London, 1976.

Roberto Pane, *Antoni Gaudì*, seconda edizione, Edizioni di Comunità, Milano, 1982.

B.B. Mandelbrot, *The fractal geometry of nature*, Freeman, New York, 1983.

Frei Otto, e altri, *L'architettura della natura, Forme e costruzioni della natura e della tecnica e processi della loro formazione*, il Saggiatore, Milano, 1984.

B.B. Mandelbrot, *Gli oggetti frattali: forma, caso e dimensione*, R. Pignoni (a cura di), Einaudi, Torino, 1987.

H.-O. Peitgen, P. H. Richter, *La bellezza dei frattali, Immagini di sistemi dinamici complessi*, Bollati Boringhieri, Torino, 1987.

Mario Cedolini, *Strutture, Morfologia strutturale in architettura*, Arsenale Editrice srl, Venezia, 1991.

N. Pevsner, J. Fleming e H. Honour, Renato Pedio (a cura di), *Dizionario di architettura*, Einaudi, Torino, 1992.

J. J. Lahuerta, *Antoni Gaudì 1852-1926, Architettura, ideologia e politica*, Electa, Milano, 1992.

A. Plumridge, W. Meulenkamp, *Brickwork, Architecture and Design*, Studio Vista, London, 1993.

Sabine Schanz, Frei Otto, *Bodo Rasch: Finding Form. Towards an Architecture of the Minimal*, Edition Axel Menges, Germania, 1995.

W.J.R. Curtis, *Modern architecture since 1900*, Phaidon, London, 1996.

F. Lucchini, *Pantheon*, La Nuova Italia Scientifica, Roma 1996.

L. Permanyer, *Gaudì of Barcelona*, Rizzoli, New York, 1997.

Alan Holgate, *The Art of Structural Engineering, The Work of Jorg Schlaich and his Team*, Edition Axel Menges, Stuttgart/London, 1997.

Eduardo Torroja, *La concezione strutturale. Logica ed intuito nella ideazione delle forme*, Città StudiEdizioni, Torino, 1999.

A. Bressan, *Hyperbolic system of conservation laws: the one-dimensional Cauchy problem*, Oxford-New York 2000.

A. I. Lima, Soleri, *Architettura come ecologia umana*, Jaca Book, Milano, 2000.

G. Frediani, *Paolo Soleri e Vietri*, Officina Edizioni, Roma, 2000.

V.M. Lampugnani (a cura di), *Dizionario Skira dell'architettura del Novecento*, Skira, Ginevra-Milano, 2000.

David Wendland, *Model-based formfinding processes: 'Free forms' in structural and architectural design*, in F. Levi, M. A. Chiorino, C. Bertolini Cestari, *Eduardo Torroja – From the philosophy of structure to the art and science of building*, Angeli, 2003, Milano.

Daniel Giralt-Miracle (a cura di), *Gaudì La ricerca della forma, Spazio, geometria, struttura e costruzione*, Jaca Book, 2003.

A. I. Lima (a cura di), *Ri-pensare Soleri*, Jaca Book, Milano, 2004.

A. I. Lima (a cura di), *Per la sinergia tra uomo e pianeta. Laurea Honoris Causa a Paolo Soleri*, Palermo 31 ottobre 2001, Università degli Studi di Palermo, Facoltà di Architettura, Palermo, 2001.

B.B. Mandelbrot e M.M. Novak, *Thinking in patterns: fractals and related phenomena in nature*, World Scientific Publishing

Co., River Edge N. J., marzo 2004.

C.M. Dafermos, *Hyperbolic conservation laws in continuum physics*, Berlin-New York, 2005.

Sandra Suatoni (a cura di), *Paolo Soleri, etica e invenzione urbana*, Palombi Editori Jaca Book, Milano-Roma, 2005.

F. Escriing, *The great structures in architectures*, WIT Press, UK, 2006.

Fausto Giovannardi (a cura di), *Félix Candela, Costruttore di sogni*, Studio Giovannardi e Rontini, Firenze, dicembre 2006.

Paolo Portoghesi (diretto da), *Dizionario enciclopedico di architettura e urbanistica*, sei volumi, Gangemi Editore, Roma, 2006.

Carmen Andriani (a cura di), *Le forme del cemento*, 4 volumi, volume secondo, *Plasticità*, Gangemi Editore, Roma, 2008.

Rodolfo Maria Strollo (a cura di), *Rappresentazione e formazione tra ricerca e didattica*, Aracne editrice, Roma, luglio 2008.

Claudio Greco, *Pier Luigi Nervi, Dai primi brevetti al palazzo delle Esposizioni di Torino 1917-1948*, Quart Edizioni, Svizzera, 2008.

The Plan magazine, Shape : architecture in detail, Reggio Emilia: Scripta Manent; Bologna: The Plan, c2008.

M. Heinzelmann, *Il Pantheon*, in H. von Hesberg e P. Zanker (a cura di), *Storia dell'architettura italiana, architettura romana, i grandi monumenti di Roma*, Mondadori Electa, Milano, 2009, pp. 142 - 151.

Gijs van Hensbergen, *Gaudi*, Lindau, Torino, 2009.

Tullia Iori, *Pier Luigi Nervi*, Motta Architettura, Milano, 2009.

C. Chiorino, C. Olmo (a cura di), *Pier Luigi Nervi. Architettura come sfida*, Silvana Editoriale, Cinisello Balsamo 2010.

Arturo Tedeschi, *Architettura parametrica. Introduzione a Grasshopper, il plug-in per la modellazione generativa in Rhino*, seconda edizione, Edizione Le Penseur, Potenza, ottobre 2010.

145

J. Ochsendorf, *Guastavino Vaulting: The Art of Structural Tile*, Princeton Architectural Press, 2010.

W.E. Lorenz, *Fractal Geometry of Architecture*, in *Biomimetics-Materials, Structures and Processes*, Springer, Berlino, 2011.

Rudolf Finsterwalder, *Form Follows Nature*, SpringerWien-NewYork, Vienna, Austria, 2011.

Rainer Zerbst, *Gaudi. Architettura - Opera completa*, Taschen, Colonia, 2012.

F. Doglio, P. Tosoni, *Paolo Soleri, paesaggi energetici. Arco-
cologie in terre marginali*, LetteraVentidue Edizioni, Sira-
cusa, 2013.

Pier Luigi Nervi, *Costruire correttamente*, Hoepli, Milano,
2014.

P. Solomita, Pier Luigi Nervi vaulted architecture, Towards
new structures, Bonomia University Press, Bologna, 2015.

Atti Convegni

*Rassegna di Architettura e Urbanistica, Ingegneria Italia-
na*, anno XLI, n.121/122, , agosto 2007.

*Shell and Spatial Structures: Structural Architecture -
Towards the future looking to the past*, in IASS 3 - 6 Dicem-
bre 2007 - Venezia - Italia.

Ramage, M., Lau, W. and Ochsendorf, J. “*Compound
curves in thin-shell masonry: analysis and construction of
new vaults in the UK*”, *Proceedings of IASS 2007, Venice*,
Eds. E. Siviero, et al., International Association of Shell and
Spatial Structures, Dec. 2007.

H. Pottman, A. Kilian e M. Hofer, *First Symposium on Archi-
tectural Geometry*, Vienna, 13 - 16 settembre 2008.

M. Ramage, J.A. Ochsendorf e P. Rich, *Sustainable shells:
New African vaults built with soil-cement tiles*, in *Internatio-
nal Association for Shell and Spatial Structures Symposium*,
Università Politecnica di Valencia, Spagna, 2009.

A. Pugnale, D. Parigi, P.H. Kirkegaard e M. Sassone, *The Principle of Structural Reciprocity: history, properties and design issues*, in *Full Papers: Taller, Longer, Lighter, meeting growing demand with limited resources*, IABSE-IASS Symposium 2011, Hemming Group Ltd., London, 2011.

S. Rajabzadeh e M. Sassone, *Reviving the design of contemporary masonry vaults*, in *Third Annual International Conference on Architecture*, Athens Institute for education and research, Atene, 2013.

Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints, in IASS 15 - 19 Settembre 2014 - Brasilia - Brasile, 2014.

S. Rajabzadeh e M. Sassone, *The brickshell meditation centre: a collaborative masonry project*, in *International Association for Shell and Spatial Structures Symposium*, Brasile, 2014.

S. Rajabzadeh e M. Sassone, *On the design of brick patterns on free form masonry vaults*, in *International Association for Shell and Spatial Structures Symposium*, Brasile, 2014.

Articoli in Riviste

Nervi P.L., *Struttura e forma in architettura*, in "Domus", n. 374, gennaio 1961, pp. 1-6.

C.R. Fantone, *Alfonso Ramirez Ponce - Modernità della tradizione*, in *Costruire in laterizio*, n. 82 "Architetture voltate",

Gruppo Editoriale Faenza Editrice S.p.A., Faenza, luglio/ agosto 2001.

Andrea Campioli, *Architettura e acciaio: gli scenari del progetto*, in *Costruzioni Metalliche*, n.4, UNICMI, Milano, 2006.

David Wendland, *Traditional Vault Construction Without Formwork: Masonry Pattern and Vault Shape in the Historical Technical Literature and in Experimental Studies*, in *International Journal of Architectural Heritage*, 1(4), pp. 311-365, November 2007.

David Wendland, *Model-based formfinding processes: Free forms in structural and architectural design*, December 2008

Massimo Majowiecki, *Alcune esperienze di grandi coperture in acciaio: dal Form Finding al Free Form Design (FFD)*, argomenti del Focus "Progettare e costruire in acciaio", in *Il giornale dell'ingegnere*, n° 16 - ottobre 2010.

N. Baldassini, A. Carlucci e M. Froli, *Gridshells: ricerca morfologica ed ottimizzazione geometrica*, in *Costruzioni Metalliche*, n.4, UNICMI, Milano, 2011.

E. Cicalò, A. Causin, M. Solci, E. Turco, *L'epoca delle splines: geometrie e linee del progetto contemporaneo*, in *DISEGNARECON*, Vol. 5, n. 9 (2012) *Geometria Costruzione Architettura*, a cura di Riccardo Migliari [S.I.], pp. 325 - 334, june 2012. ISSN 1828-5961

John Ochsendorf (Ph.D.), *Guastavino Masonry Shells*, in *STRUCTURE magazine*, review category: *Feature*, May, 2014.

Tesi di laurea

Matteo DINI, *Ricerca morfologica di buckling ottimizzato per strutture di tipo gridshell*; rel. Prof. Ing. Maurizio FROLI, Prof. Ing. Mauro SASSU, Arch. Ing. Niccola Baldassini, Dr. Giovanni GOMEZ ESTRADA; Università di Pisa, 2012.

Federica Fogliato, *Free Form - Santiago Calatrava*, rel. Annalisa Dameri, correl. Clara Bertolini Cestari e Tanja Marzi, Politecnico di Torino, settembre 2014.

S. Rajabzadeh, *On the computational disign of free form masonry vault*, rel. Mario Sassone, Politecnico di Torino, marzo 2015.

SITOGRAFIA

www.ptw.com.au

www.arup.com

www.treccani.it

www.polito.it

www.oasys-software.com

www.rhino3d.com

www.grasshopper3d.com

www.python.org

www.python.it

www.costruirecorrettamente.org
www.food4rhino.com
www.smdarq.net
www.greatchicagofire.org
www.alessandrорizzo.it
www.giovannardierontini.it
www.calatrava.com
www.binisystems.com
www.fuksas.it
www.rafaelguastavino.com
www.cabovolo.com/2010/12/rafael-guastavino-el-arquitecto.html
www.majowiecki.com/it/s/index.jsp#1
www.structuremag.org
www.shigerubanarchitects.com
www.toyo-ito.co.jp
www.zaha-hadid.com
www.hellenicaesthetics.gr/en.pbio.htm Pagina web aggiornata al 26/11/2012 18:41 (consultato il 03/12/2015 alle 12:14)
www.antichefornaci.it
www.designing-america.com/contenido/the-r-guastavino-fireproof-construction-company/?lang=en
<https://disegnarecon.unibo.it/article/view/3182>
http://meroitaliana.it/it_IT/2/costruzioni/1/strutture-reticolari-spaziali
<https://mam.org/>
<http://heinsdorff.ebizontech.biz/de>
