

Università degli Studi di Napoli "Federico II"  
Dipartimento di Configurazione e Attuazione dell'Architettura  
Dipartimento di Progettazione Urbana e di Urbanistica

Dottorato di ricerca in Tecnologia dell'Architettura

XXIII ciclo

dottoranda: Pia D'Angelo

Tutor: Prof. Sergio Pone

Co-tutor: Prof. Raffaele Landolfo

anno accademico 2010/2011

## **La tecnologia delle *gridshell*.**

### **Sperimentazione di un sistema di copertura "automontante".**

Il coordinatore

Prof. Mario Losasso

## **Indice**

### *Introduzione*

## **I Capitolo**

### **La tipologia costruttiva dei gusci a graticcio (*gridshell*)**

#### 1.1 Tecnologie della leggerezza

#### 1.2 Gusci continui e "discretizzati": differenze e similitudini

##### 1.2.1 La tipologia costruttiva dei gusci

##### 1.2.2 La tipologia costruttiva dei gusci a graticcio: soluzioni *pre-configurate* e *post-configurate*

#### 1.3. Caratteristiche delle *gridshell post-configurate*

#### 1.4 La questione del materiale

##### 1.4.1. Materiali per la costruzione di *gridshell post-configurate*

##### 1.4.2. La scelta del legno. Verso un uso sostenibile del legno basato sul ricorso a semilavorati di piccole dimensioni

#### 1.5. Potenzialità e criticità delle *gridshell post-configurate* in legno

## **II Capitolo**

### ***Gridshell post-configurate* in legno**

#### 2.1 Linee evolutive delle *gridshell post-configurate* in legno

#### 2.2 *Gridshell* e forma funicolare

#### 2.3 Analisi del processo costruttivo

#### 2.4 Casi studio

##### 2.4.1 *Mannheim Lattice Shell Federal Garden Exhibition* (metodo di montaggio dal basso verso l'alto)

##### 2.4.2 *Weald & Downland Open Air Museum* (metodo di montaggio dall'alto verso il basso)

#### 2.5 Limiti delle strategie esecutive analizzate e ipotesi di innovazione del processo costruttivo

### **III Capitolo**

## **Sperimentazione di un sistema di copertura prefabbricato, dispiegabile, "automontante"**

### *Premessa*

3.1 Ipotesi di industrializzazione attraverso prefabbricazione, dispiegabilità e "auto montaggio"

3.2 Prima sperimentazione: progetto e costruzione di un sistema di copertura prefabbricato e dispiegabile

3.2.1 Form finding

3.2.2 Progetto della sperimentazione

- Ipotesi progettuale
- Processo produttivo fuori opera;
- Sistemi di connessione e produzione in opera della griglia strutturale;
- Montaggio attraverso la messa in coazione degli elementi strutturali;
- Sistema di irrigidimento diagonale;

3.2.3 Story-board della sperimentazione

3.3 Premialità e criticità emerse dalla prima sperimentazione

3.4 Nuova ipotesi per la ricerca della forma attraverso la simulazione del processo costruttivo

3.4.1 Form finding attraverso il ricorso a software

3.4.2 Definizione di un protocollo informatizzato di ricerca della forma e di simulazione del processo costruttivo

3.5 Seconda sperimentazione: nuova ipotesi per la costruzione di un sistema di copertura "automontante"

3.6 Costruzione di un sistema di copertura "automontante"

3.6.1 Story-board della sperimentazione

3.6.2 Scheda tecnica del sistema di copertura

### 3.6.3 Premialità e criticità emerse dalla seconda sperimentazione

#### *Conclusioni*

## *Introduzione*

Questa tesi assume come punto di partenza il dato, ormai largamente condiviso, che esista un legame diretto e profondo tra l'architettura del legno e quella che più profondamente è in armonia con l'ambiente; questo legame antico, che ha accompagnato la storia dell'evoluzione delle tecniche costruttive in legno, si sta oggi sempre più riscoprendo, anche grazie alle caratteristiche dei suoi semilavorati che sono diventati materiali fondamentali nella progettazione sostenibile.

Questa tesi parte dall'analisi di un particolare sistema costruttivo, *gridshell* in legno *post configurata*, appartenente a quella più vasta dei gusci "discretizzati", che rientrano a loro volta nel novero delle strutture resistenti per forma e, quindi, dell'architettura leggera che, per definizione, può considerarsi una delle forme possibili di "rivoluzione ecologica" del costruire, e prova a interpretare i motivi della loro scarsa diffusione e a definire nuove strategie esecutive per superarne le criticità. Questo punto di partenza, tutto interno alla tecnologia e alla tecnica delle costruzioni, riporta all'architettura e ai suoi metodi espressivi perché, come affermava Mies Van der Rohe: *«L'edificio, dove è diventato grande, è stato quasi sempre debitore della costruzione, e la costruzione quasi sempre il veicolo della sua forma spaziale. Il romanico e il gotico lo dimostrano con evidente chiarezza. In entrambi i casi la struttura costituisce il veicolo dei significati, il veicolo stesso degli estremi contenuti spirituali. Se le cose stanno così, allora il rinnovamento dell'architettura può avvenire soltanto sulla base della costruzione e non attraverso motivi introdotti arbitrariamente. (...) L'edificio e il suo significato sono tutt'uno. (...) La costruzione è la forma stessa»*<sup>1</sup>

Le *gridshell*, capaci di coprire grandi luci e garantire grande flessibilità spaziale, spingono la sperimentazione dei componenti lignei di piccola

---

<sup>1</sup> F. Neumeyer, *Mies van der Rohe. Le architetture e gli scritti*, Skira, Milano 1997, p. 309.

dimensione nella direzione della sostenibilità poiché l'utilizzo di questi semilavorati, provenienti da colture a rapido accrescimento, contribuisce a non incrementare il depauperamento del patrimonio forestale (per costruire grandi sale non è necessario utilizzare grandi tronchi provenienti da foreste storiche) e l'assemblaggio a secco tra le singole aste consente il semplice smaltimento del prodotto di un'eventuale demolizione, cosa che non può accadere nel caso del legno lamellare a causa delle colle utilizzate che lo rendono smaltibile solo con le procedure del materiale composito non separabile. Nonostante i forti contenuti di sostenibilità ambientale ed ecologica dal 1971 (anno in cui Frei Otto progetta la copertura di grande luce del *Mannheim Lattice Shell* per la *Federal Garden Exhibition*) a oggi, tali costruzioni risultano ancora poco diffuse.

La tesi si pone il duplice obiettivo di superare le difficoltà rilevate in fase di analisi dei casi studio, attraverso la definizione di uno strumento metodologico per la ricerca della forma, e di risolvere le principali criticità riscontrate nell'ambito delle strategie esecutive messe a punto nei casi noti, mediante l'individuazione di un metodo costruttivo innovativo, da verificare con la sperimentazione di un sistema di copertura prefabbricato, dispiegabile e "automontante", condotta con il supporto dell'azienda produttrice di strutture in legno *Holzbau sud*.

Nel **I capitolo** si individua l'argomento della ricerca. Nell'ambito tematico della tecnologia dei sistemi strutturali leggeri, la tesi si concentra sulle costruzioni a guscio "discretizzate", effettuandone una classificazione in funzione del processo costruttivo adottato; ciò consente di distinguere in maniera precisa le *gridshell* "post-configure", oggetto della ricerca, da altre "pre-configure", ovvero assemblate già nella forma finale a doppia curvatura. Una sintetica analisi di applicazioni progettuali, realizzate a partire da differenti materiali, consente di mettere in evidenza le proprietà fisiche e meccaniche che essi devono presentare affinché il particolare processo costruttivo possa avere luogo. Attraverso un graduale

restringimento del campo di ricerca si giunge, così, alla definizione dell'argomento specifico della tesi, ovvero le gridshell post configurate in legno, delle quali si definiscono potenzialità e criticità.

Il **II capitolo** offre un quadro completo dello stato dell'arte relativo alle gridshell post configurate in legno. Particolare attenzione è rivolta al tema della ricerca della forma tridimensionale e, soprattutto, alle criticità riscontrate nei metodi di montaggio fino a oggi utilizzati. Si propone, dunque, un'ipotesi alternativa al processo costruttivo utilizzato nei casi studio.

Nell'ambito del **III capitolo** sono riportate le due esperienze costruttive condotte al fine di valutare l'efficacia delle innovazioni introdotte.

## I Capitolo

### **La tipologia costruttiva dei gusci a graticcio (*gridshell*)**

#### *1.1 Tecnologie della leggerezza*

L'ambito tematico della ricerca si riferisce alla tecnologia dei sistemi strutturali leggeri, ovvero agli aspetti costruttivi di quegli organismi architettonici in cui la "massima scarnificazione della forma"<sup>2</sup> è raggiunta attraverso un equilibrio sapiente tra conoscenze fisico-meccaniche, tecniche esecutive e potenzialità dei materiali.

Eduardo Vittoria guarda alla **leggerezza** come un nuovo modo di concepire le opere di architettura: "La compresenza di entità spaziali e temporali qualificanti l'architettura non può ridursi ad una sfilata di colonne, di stanze, di oggetti, ma invece deve estrinsecarsi nei rapporti che mettono in relazione il visibile con l'invisibile, l'invaso con l'involucro, la luminosità con la trasparenza, la società con la funzionalità ... Rapporti che a furia di dettagli di fabbricazione artigianale o seriale, diventano espressione poetica di una immaginaria leggerezza, ispiratrice dei modi di pensare e realizzare il cambiamento di luoghi e oggetti dell'abitare"<sup>3</sup>. Di qui la *visione leggera della tecnologia*, fondata su diverse discipline che mettono in relazione la conoscenza teorica della realtà e della natura costitutiva dei materiali con il loro uso all'interno dell'organizzazione sociale e politica, in cui si esprime la eterogeneità e discontinuità del mondo contemporaneo. Ancora Vittoria sottolinea come "è necessario mettere a punto un disegno di riscrittura della cultura materiale del design fondato sull'uso degli elementi immateriali e impalpabili della natura (il vento, la luce, l'aria e tutti gli altri di cui possiamo disporre per assicurare l'equilibrio dei cicli naturali e delle risorse), nella prospettiva di una

<sup>2</sup> Guazzo Giovanni, *Leggero/trasparente: appunti per una ricerca di cultura progettuale* in Perriccioli Massimo (a cura di), *Trasparenti leggerezze*, Rinascita, Ascoli Piceno, 1998, pag. 23

<sup>3</sup> Vittoria Eduardo, *La natura maestra, la natura spettacolo, nella visione leggera della tecnologia*, in *Architettura delle vele*, in corso di stampa.

*visione leggera della tecnologia, una cerebralità sensibile, liberata dalla dogmatica pesantezza intellettuale”<sup>4</sup>.*

Ma *“desiderio di leggerezza e bisogno di radicamento convivono da sempre nell'uomo e trovano espressione anche nelle sue costruzioni in cui prevale ora l'una, ora l'altro. Hanno ispirato modi di edificare diversi e ad essi si fanno corrispondere anche miti e archetipi diversi: la tenda e la capanna per la prima, la caverna e la costruzione in pietra per il secondo”<sup>5</sup>*. Il famoso diagramma tracciato da R. Sarger illustra la riduzione del peso degli edifici nel corso dei millenni, a partire dalle costruzioni degli Assiri, attraverso quelle greche, romane, gotiche fino alle attuali coperture a vela pretese. Pur avendo il grosso limite di voler ridurre la complessità della storia ad una linea di evoluzione progressiva, esprime la reale tendenza alla leggerezza, intesa da Guazzo, come un *“giocare al limite della corporeità”<sup>6</sup>*.

Tale aspirazione alla leggerezza ben si colloca nel contesto urbano attuale, connotato dalla molteplicità e complessità delle società contemporanee, rivolte sempre più al cambiamento e al dinamismo. Scrive Aldo Capasso: *“La leggerezza in architettura va intesa come approccio progettuale volto a trasformare le risorse materiali e immateriali, finalizzato alla ricerca e alla costruzione di spazi e di modalità dell'abitare innovativi e sostenibili ... s'intende riferirsi ad una attenzione progettuale verso la compatibilità ambientale, la costruzione programmata, l'adattabilità ai luoghi, la reversibilità e la riduzione del materiale, cioè verso i tre aforismi dell'architettura moderna e contemporanea: Less is more/ Biology and building/ More with less”<sup>7</sup>*.

<sup>4</sup> Vittoria Eduardo, *La natura maestra, la natura spettacolo, nella visione leggera della tecnologia*, in *Architettura delle vele*, in corso di stampa.

<sup>5</sup> Fumagalli Giovanni, *La matita tra le nuvole* in Massimo Periccioli (a cura di), *Trasparenti leggerezze*, Rinascita, Ascoli Piceno, 1998, pag. 45.

<sup>6</sup> Guazzo Giovanni, *Leggero/ trasparente: appunti per una ricerca di cultura progettuale* in Periccioli Massimo (a cura di), *Trasparenti leggerezze*, Rinascita, Ascoli Piceno, 1998, pag. 23.

<sup>7</sup> Capasso, Aldo, *Da less is more a more with less. Dalla leggerezza alla sostenibilità in architettura*, in Losasso, Mario (a cura di), *Progetto e innovazione*, CLEAN, Napoli, 2005, p. 67.

Nel pensiero di Rosalba La Creta la leggerezza è ... *“un modo “soffice”, leggero, di stabilire un rapporto positivo con il mondo della natura, in una logica che tende ad operare al suo interno, piuttosto che mirare a prevaricarla usando in maniera “dura”, pesante, le acquisizioni dello sviluppo tecnologico”*<sup>8</sup>, e come osserva Frei Otto, questo implica un diverso atteggiamento culturale volto a superare il dominio dell'inorganico per imparare a conoscere e verificare l'organico.<sup>9</sup>

Se la smaterializzazione della forma architettonica è una linea presente in tutta la storia dell'architettura, è con l'affermazione dell'industria che subisce un forte impulso, portando al graduale alleggerimento fisico e percettivo della costruzione e alla progressiva specializzazione tecnica, funzionale ed espressiva delle parti che compongono l'edificio.

Una nuova architettura, fondata sui paradigmi progettuali della precarietà, dinamicità e reversibilità, si concretizza attraverso l'assemblaggio a secco di materiali e componenti costruttivi discreti, dotati spesso di una propria autonomia formale e funzionale, l'impiego di sistemi a telaio o di involucri costituiti da pannellature, la prefabbricazione dei prodotti, la coordinazione modulare e l'ottimizzazione dei tempi e costi di trasporto e lavorazione. Ciò richiede la massima precisione costruttiva, la cura più attenta del dettaglio e un intransigente rigore compositivo. Rigore, esattezza, controllo, possono essere considerate le parole chiave per comprendere la “dimensione” progettuale e tecnologica che contraddistingue numerose esperienze costruttive condotte a partire dall'affermazione della cultura tecnica della costruzione in ferro e vetro. *L'estetica del leggero*, mutuata dalla rivoluzione tecnica dell'ingegneria ottocentesca, si concretizza nelle opere dei maestri dell'architettura moderna: Gropius, Mies, Berens, e in alcune esperienze di seguito maturate in California nel campo dell'edilizia abitativa

<sup>8</sup> La Creta Rosalba, in prefazione a Capasso Aldo ( a cura di ), *Architettura e leggerezza*, Maggioli, Rimini, 1999.

<sup>9</sup> Cfr. Otto Frei et al., *L'architettura della natura. Forme e costruzioni della natura e della tecnica e processi della loro formazione*, Saggiatore, Milano, 1984.

a basso costo basata sulla prefabbricazione industriale di elementi leggeri. Le opere di Richard Neutra, i padiglioni in ferro e vetro di Charles Eames, Craig Ellwood, Raphael Soriano e Pierre Koenig costituiscono una vera e propria "rivoluzione tecnica ed espressiva" che, supportata da una forte spinta innovativa nel campo della produzione industriale di sistemi e materiali destinati all'edilizia, mutuano la tradizione costruttiva americana dei sistemi in legno con l'innovazione tecnologica e la lezione del modernismo europeo.<sup>10</sup>

Conferire leggerezza agli edifici, prima ancora di essere un'esigenza espressiva, fu una necessità dettata dalla diffusione, nel campo delle costruzioni, di materiali e tecniche innovative che hanno consentito l'instaurarsi di nuovi rapporti tra forma, struttura e materia, attraverso l'ottimizzazione della produzione industriale. Tali condizioni tecniche e produttive hanno rappresentato un terreno fertile per numerose ricerche sperimentali che, partendo da un approccio pragmatico, teso al raggiungimento della massima flessibilità spaziale, della reversibilità e della dinamicità, hanno portato alla definizione di sistemi strutturali arditi, in grado di coprire spazi di dimensioni sempre maggiori. *Lo sviluppo di coperture di grande luce ha impegnato con notevole successo alcuni protagonisti dello scenario costruttivo dell'ultimo secolo e mezzo, nella ricerca di tipologie strutturali che, attraverso il superamento della logica legata alla pura forza gravitazionale dei materiali, tendono alla leggerezza dell'edificazione per risolvere efficacemente i problemi posti dalla realizzazione di nuove forme architettoniche non compatibili con le tecniche consolidate.*<sup>11</sup>

La macchina dell'innovazione tecnologica nel campo delle **grandi coperture** è inizialmente messa in moto e guidata dagli ingegneri che,

<sup>10</sup> Cfr. Perriccioli Massimo, *Trasparenti leggerezze* in Perriccioli Massimo (a cura di), *Trasparenti leggerezze*, Rinascente, Ascoli Piceno, 1998, pag. 38.

<sup>11</sup> Cfr. La Creta Rosalba, prefazione in Pone Sergio, *L'idea di struttura*, FrancoAngeli, Milano, 2005, pag. 9.

traendo spunto dalle esperienze condotte da Gaudì e Isler, individuavano configurazioni resistenti partendo dalla simulazione di forme, spesso desunte dalle strutture presenti in natura, fondate sull'equilibrio di forze secondo i principi di "Formfinding" (o ricerca della forma) e "Selbstbildungsprozess" (o processo di autoformazione). Tali ricerche sperimentali rafforzavano l'indissolubile legame tra istanze estetiche e meccaniche: la struttura diventa essa stessa architettura e l'interpretazione intuitiva del comportamento statico diventa fonte di ispirazione del progettista e punto di riferimento della ricerca scientifica applicata. Era perseguita, così, la *filosofia strutturale* promossa da Edoardo Torroja secondo la quale la ricerca progettuale è sostenuta da un "*intimo sentimento del modo di resistere dell'opera; tale intuizione, penetrando profondamente nel nostro animo, ci dà come la sensazione di partecipare alla fatica della costruzione e ci fa percepire ciascuno dei suoi elementi come qualcosa di vivo e di sensibile*"<sup>12</sup>. La verità statico-resistente diventa disvelatrice di bellezza e, come affermava Pierluigi Nervi: "*L'avvicinarsi con animo modesto alle misteriose leggi della natura, lo sforzo di interpretarle e quel comandarle ubbidendo che è l'unico modo per portare la loro maestosa eternità a servizio dei nostri militati e contingenti scopi, ha in se una profonda poesia, che può tradursi in forme di un'elevata espressività estetica e artistica ... Il progressivo affinarsi della capacità di comprendere e intuire le leggi fisiche renderà sempre più evidente l'intrinseca e pura bellezza delle forme in accordo con le necessità di una tecnica in crescente sviluppo*"<sup>13</sup>.

Le **strutture resistenti per forma** rientrano in alcune tipologie costruttive che Eduardo Vittoria definisce nei termini di: "*membrane, qualunque forma di lastra sottilissima composta con materiale elastico; gusci, qualunque forma di lastra sottile composta con materiale rigido;*

<sup>12</sup> Torroja Eduardo, *La concezione strutturale*, Città studi, Milano, 1995, p. 28.

<sup>13</sup> Nervi Pierluigi, *Scienza o arte del costruire*, Roma 1945, Avvertenza, p.77.

*reticoli spaziali, quelle maglie geometriche regolari i cui fili sono stati tesi e il cui disegno giace sul luogo geometrico che occuperebbe una membrana se potesse essere sottoposta agli stessi vincoli”<sup>14</sup>.*

La parzializzazione delle grandi strutture inflesse in una serie di piccoli elementi tesi o compressi e il ricorso a superfici a doppia curvatura, rappresentano i due principali metodi per attribuire rigidità per forma alle strutture. I vantaggi del reticolare, nel caso delle cosiddette “grandi cupole”, risultano integrati con quelli tipici delle volte sottili; la concomitanza dei due effetti strutturali garantisce alla costruzione un surplus di resistenza, favorito probabilmente dalla stabilità complessiva della forma sferica.

Nel campo delle strutture resistenti per forma una spinta all’innovazione nasce dalla volontà di dare all’acciaio e al calcestruzzo armato le forme giuste per sfruttarne al massimo le prestazioni.

Le potenzialità del calcestruzzo armato sono esplorate attraverso la costruzione di coperture laminari curve che, come afferma Anna Maria Zorgno, sembrano destinate a “*esaltare due prerogative del materiale, predisposte a liberare l’immaginazione: l’inconsistenza materica legata allo spessore piccolissimo, la riproducibilità in forme assolutamente libere*”<sup>15</sup>.

L’intento di sfruttare pienamente le prestazioni dell’acciaio orienta, invece, il lungo percorso di innovazione che dalle realizzazioni pionieristiche di Choukhov, fondate sull’utilizzo di pochi elementi sollecitati a compressione e di una membrana composta di elementi tesi, passa per le costruzioni a reti di cavi di Severud, dove la struttura è ancora impostata su elementi compressi in calcestruzzo armato, completati con il sistema di cavi in contrasto, fino a giungere alla concezione strutturale del Padiglione dell’Esposizione di Montreal costituita da puntoni metallici isolati, strallati tra di loro e al suolo

<sup>14</sup> Vittoria Edoardo, *La natura maestra, la natura spettacolo, nella visione leggera della tecnologia*, in *Architettura delle vele*, in corso di stampa.

<sup>15</sup> Zorgno Anna Maria, *Oltre la prigione cubica*, in “Rassegna” n.49, marzo 1992.

mediante trefoli, e una rete di cavi realizzata con elementi più sottili. Un'ulteriore riduzione delle masse soggette a compressione si ottiene in sistemi strutturali più recenti *"nei quali la materia compressa apparirebbe come un isolotto al centro di una materia tesa"*<sup>16</sup>, riconducibili al principio della *tensegrity*.<sup>17</sup>

L'evoluzione dei sistemi strutturali leggeri è profondamente condizionata dalla necessità di ottimizzare i processi produttivi industriali. L'*architetto-tecnologo*<sup>18</sup> Konrad Wachsmann finalizza la sua attività di ricerca alla normalizzazione e composizione di elementi prefabbricati per la realizzazione di grandi strutture, basate su due elementi principali: l'asta e il nodo. Il progetto del dettaglio tecnologico assume un ruolo importantissimo. Come lo stesso Wachsmann afferma: *"lo studio di tali giunti (...) costituisce oggi l'essenza stessa del segreto dell'arte edilizia (... avremo) un ordinamento continuo, partendo dagli elementi basilari che origineranno i giunti, che origineranno superfici e strutture, che origineranno gli edifici (...)"*.<sup>19</sup>

Il tema dell'unificazione degli elementi costitutivi di un sistema strutturale complesso rappresenta il tema centrale del contributo che R.B. Fuller offre nel campo delle grandi coperture. *"Il sistema costruttivo della cupola geodetica messa a punto dallo studioso statunitense, si fonda sull'unificazione degli elementi, che quindi possono essere prefabbricati dall'industria. Tale principio costruttivo si traduce nell'uniforme ripartizione degli sforzi all'interno delle aste in modo da realizzare un'ulteriore ottimizzazione dei comportamenti strutturali"*<sup>20</sup>.

<sup>16</sup> Motro René, Tenségrité (mat de), s.v. in Aa vv., *L'art de l'ingénieur*, cit., p.503.

<sup>17</sup> Cfr. Pone Sergio, *L'idea di struttura*, FrancoAngeli, Milano, 2005, pag. 67

<sup>18</sup> Cfr. De Fusco Renato, *Storia dell'architettura contemporanea* vol. II, Universale Laterza, Bari, 1977, pag. 435.

<sup>19</sup> Wachsmann Konrad, *Concetti di architettura*, conferenza tenuta l'11 aprile 1956 al Circolo artistico di Roma, cit. in Benevolo, *Storia dell'architettura moderna*, pag. 714.

<sup>20</sup> Pone Sergio, *L'idea di struttura*, FrancoAngeli, Milano, 2005, pag. 46

Le cupole geodetiche di Fuller, le tensostrutture a membrana e i gusci a graticcio di Frei Otto, i reticoli spaziali di Conrad Wachsmann e le strutture pneumatiche di Walter Bird offrono un repertorio di forme fino a quel momento impensate e in grado di sedurre i grandi maestri del Movimento Moderno.

Le Corbusier, profondamente attratto dalle strutture sospese a cavi metallici, ne darà un'interpretazione molto personale nella Casa dei giovani e della cultura a Firminy-Vert dove egli concepisce una copertura a forma di settore cilindrico con la concavità rivolta verso l'alto, la cui struttura è composta da coppie di cavi unidirezionali tesi tra le travi di bordo dei due lati lunghi del fabbricato e coperti da lastre in calcestruzzo cellulare prefabbricate.

*"I solai dell'Art Gallery dell'Università di Yale che appaiono come un'intelaiatura tridimensionale in calcestruzzo costituita da elementi cavi tetraedrici"* manifestano l'influenza di R. B. Fuller sull'opera di Luis Khan.<sup>21</sup>

Anche l'anziano Frank Lloyd Wright, sedotto dalla libertà di forme offerta dalle strutture pneumatiche, si cimenta con questa tecnologia nel progetto della *Airhouse*, piccola costruzione residenziale composta dall'unione di due cupole in tessuto gommato, ancorate al suolo con un tubo riempito d'acqua, realizzata dopo la scomparsa del maestro di Taliesin ed esposta alla *International Home Exposition* tenutasi nel 1960 a New York.

Se solitamente l'ingegnere è la figura professionale "titolare" dell'innovazione tecnologica e quindi del progresso tecnico nei diversi settori strutturali, nella costruzione delle grandi coperture, e a maggior ragione di quelle che affidano la loro resistenza a geometrie particolari, tale egemonia sfuma leggermente: qui, all'origine dell'atto innovativo, è quasi sempre la forma delle membrature costruttive; ed è l'architetto ad avere storicamente la maggiore sensibilità e la maggiore dimestichezza nei confronti delle problematiche e dei temi formali nonché una migliore

<sup>21</sup> De Fusco Renato, Storia dell'architettura contemporanea vol. II, Universale Laterza, Bari, 1977, pag. 446.

capacità di controllo delle forme ispirate a geometrie complesse. Stéphane du Chateau, Felix Candela, Frei Otto, René Sarger sono solo alcuni degli architetti che, senza sfigurare con rilevanti figure di ingegneri, hanno dimostrato come l'idea dell'architetto decoratore, auto confinata nella "torre d'avorio" di cui parla Giedion<sup>22</sup>, relegata cioè nel settore dell'ornamento e destinato a un ruolo sempre più eccentrico e sovrastrutturale, non fosse una necessità storica bensì una colpevole volontà di una parte della cultura architettonica diffusa.<sup>23</sup>

Inoltre, se come sostiene Giulio Carlo Argan, *"l'architettura rientra, ed anzi ha il primo posto, tra le attività umane intese a modificare l'ambiente fisico in rapporto alle necessità dell'esistenza"*<sup>24</sup>, e quindi ogni sua opera dovrebbe introdurre nuovi sistemi fisici che inducono nuove e migliori condizioni di vita, l'architettura è per sua natura fattore di innovazione<sup>25</sup> e, come tale, deve essa stessa innovarsi nelle sue forme e nei suoi modi di prodursi, al fine di dare risposte efficaci e possibili alle "necessità dell'esistenza" che cambiano continuamente nel tempo e nello spazio.<sup>26</sup>

E spesso, come afferma Emmerich: "(...) i momenti importanti della storia dell'architettura coincidono con i momenti di scoperte strutturali derivate da un duplice ordine di conoscenze: le configurazioni geometriche che sono i mezzi per organizzare lo spazio architettonico, e la tecnologia dei materiali i quali sono i mezzi per costruire nella realtà"<sup>27</sup>.

<sup>22</sup> Giedion Sigfried, *Spazio tempo architettura* (1941), tr. it. Hoepli, Milano, 1981, pp.204-205.

<sup>23</sup> Cfr. Pone Sergio, *L'idea di struttura*, FrancoAngeli, Milano, 2005.

<sup>24</sup> Argan Carlo Giulio, *"Architettura"* s.v. in Dizionario Enciclopedico di Architettura e Urbanistica, Istituto Editoriale Romano, 1968.

<sup>25</sup> Secondo la definizione del Dizionario Enciclopedico italiano, per innovazione si intende *"l'atto dell'innovare, cioè dell'introdurre nuovi sistemi, nuovi ordinamenti, nuovi metodi di produzione e simili"*.

<sup>26</sup> Cfr. La Creta Rosalba, *Prefazione* in Pone Sergio, *L'idea di struttura*, FrancoAngeli, Milano, 2005, pag. 7.

<sup>27</sup> Emmerich David G., *Exercices de géométrie constructive*, Ecole Nationale Supérieure des Beaux-arts, Paris, p.VII.

## 1.2 Gusci continui e "discretizzati": differenze e similitudini

### 1.2.1 La tipologia costruttiva dei gusci

In *Spazio, tempo e architettura* Sigfried Giedion si interrogava su: «*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 sia la vivacità, sia la durata che apprezziamo*». <sup>28</sup> Analogamente, Torroja affermava che «*(...) tali strutture sono come il presagio della rivoluzione che sta per manifestarsi in campo architettonico con l'adozione di un linguaggio di forme plastiche più aperto e più ampio, caratterizzato da una fecondità immaginativa che non si ritrova in nessun periodo della storia della costruzione*». <sup>29</sup>

Affermatosi come terzo materiale elastico della storia delle costruzioni, dopo il legno e l'acciaio, il calcestruzzo armato è utilizzato dai primi sperimentatori Hennebique e Cottancin principalmente per la costruzione di opere di architettura diffusa. Le prime grandi realizzazioni in calcestruzzo armato, infatti, «*opponevano all'eleganza da filigrana delle strutture in ferro e vetro la necessità dell'alternanza tra le possenti membrature strutturali e le superfici trasparenti concepite come residui tra le parti portanti*». <sup>30</sup>

Quando nel 1848 J. L. Lambot costruisce un piccolo battello costituito da un elemento portante tridimensionale, capace di offrire elevate prestazioni statico-resistenti con uno spessore minimo, si passa dal concetto di *lastra portante* a quello di *superficie portante*. Tale intuizione strutturale fu successivamente ripresa da Monier le cui ricerche porteranno al suo celebre brevetto, depositato in Francia nel 1867, in cui erano descritte le sottili

<sup>28</sup> Giedion Sigfried, *Spazio, tempo e architettura*, tr. it. Hoepli, Milano, 1981, p. 466.

<sup>29</sup> Torroja Edoardo, *La concezione strutturale*, tr. it. Cittàstudiedizioni, Milano, 1995, p.

<sup>30</sup> Pone Sergio, *Luce e grande luce. Innovazione tecnologica e trasparenza nelle grandi coperture in* (a cura di) Perriccioli Massimo, *Trasparenti leggerezze*, Ascoli Piceno, 1998, p. 65

pareti in calcestruzzo armato applicabili anche a superfici curve per la costruzione di serbatoi e volte.

Nel Novecento, la perenne sfida contro la gravità, porterà i grandi interpreti del calcestruzzo armato ad assottigliare fino all'inverosimile le parti strutturali, fino a renderle simili a dei gusci.<sup>31</sup>

La volontà di svelare interamente le potenzialità del calcestruzzo armato, liberandolo, attraverso l'utilizzo di nuove forme resistenti, dalla gabbia della geometria cartesiana, ha guidato molteplici ricerche sperimentali che hanno portato alla realizzazione, a partire dagli anni Trenta, di numerose costruzioni a guscio in grado di creare spazi a grandi luci, senza appoggi intermedi, e di forme fino ad allora sconosciute.

Il guscio è una *“struttura di spessore sottile che costituisce una superficie curva, delimitando un volume al suo interno”*<sup>32</sup>. Esso è *“un elemento portante tridimensionale (o a due dimensioni nello spazio) capace di coprire vaste aree con uno spessore minimo: 5 – 8 cm per 40 – 50 m di portata, cioè lo stesso rapporto tra spessore e larghezza del guscio dell'uovo”*<sup>33</sup>. Lo spessore sottile impedisce la presenza di un significativo braccio della coppia interna, non permettendo lo sviluppo di un'azione flessionale apprezzabile.<sup>34</sup>

Le costruzioni a guscio non sono adatte a reggere carichi concentrati ma offrono straordinarie prestazioni in presenza di carichi distribuiti. Il loro comportamento strutturale è definito *“a membrana”*.

---

<sup>31</sup> Il Planetario di Iena, realizzato nel 1925 dagli ingegneri Bauersfeld e Dishinger, è una cupola a rete autoportante alla quale si aggiunge un getto di calcestruzzo di sei centimetri che, pur costituendo in questo caso un irrigidimento e un completamento strutturale non necessario, è considerato il primo esempio di volta sottile in calcestruzzo armato della storia delle costruzioni.

<sup>32</sup> Schodek D.L., *Strutture*, tr. it. a cura di Coronelli D. e Martinelli L., Pàtron Editore, Bologna, 2004, p.423.

<sup>33</sup> Panayotis Michelis A., *Estetica del cemento armato* (1963), tr. it. Vitali e Ghianda, Genova, 1968, p. 77.

<sup>34</sup> Cfr. Schodek D.L., *Strutture*, tr. it. a cura di Coronelli D. e Martinelli L., Pàtron Editore, Bologna, 2004, p.423.

Una membrana è un elemento di superficie molto sottile che, alla stregua di una bolla di sapone, consente soltanto lo sviluppo di forze di trazione. Se sottoposta ad un carico verticale, reagisce con forze di trazione che si sviluppano lungo la superficie. L'azione di trasferimento dei carichi è simile a quella presente in un sistema di cavi incrociati; il meccanismo di base per il trasferimento di carichi in un guscio rigido è uguale a quello prodotto da una membrana rovesciata. Il carico è retto da due sistemi di forze nella superficie, che agiscono in direzioni ortogonali tra loro e ad una sorta di sforzo tangenziale (connesso alla trazione normalmente presente nella superficie).<sup>35</sup>

Tali forze si definiscono forze di meridiano (lungo le linee di meridiano) e forze cerchianti (lungo le linee circonferenziali o di parallelo). Le forze di meridiano sono sempre di compressione mentre le forze cerchianti sono di compressione nella zona superiore, laddove le strisce di meridiano tendono a convergere verso l'interno, e di trazione nella zona inferiore, dove le strisce di meridiano tendono a spostarsi verso l'esterno.

La natura del comportamento definito "a membrana" esige che la lamina sia continua, ossia priva di tagli o bucatore, analogamente a quanto accade nella perfetta membrana del guscio dell'uovo. Nei gusci in calcestruzzo, invece, si pone il non poco rilevante problema del taglio della superficie continua per consentire l'ingresso della luce ma anche dei fruitori, e questo è contemporaneamente un tema di architettura e di scienza delle costruzioni.

Lungo i bordi (sottili, spessi, a unghia, etc), infatti, si determinano turbolenze significative nel regime tensionale del guscio rispetto al comportamento a membrana poiché insorgono sollecitazioni flessionali che possono essere compensate a condizione o di trasformare il bordo in una

---

<sup>35</sup> Shodek D.L., Strutture, tr. it. a cura di Coronelli D. e Martinelli L., Pàtron Editore, Bologna, 2004, 426.

vera e propria trave capace di assorbire la flessione o di sagomare il guscio secondo le linee interne di distribuzione delle sollecitazioni.

Traforare la lamina strutturale, seguendo le complesse giaciture dettate dal regime tensionale interno, oppure sollevare e, eventualmente, ispessire i bordi, per portare all'interno della costruzione la luce naturale, rappresentano i più efficaci metodi per risolvere i problemi legati alla natura opaca del calcestruzzo armato. Entrambe queste soluzioni, cui hanno ampiamente fatto ricorso i più brillanti interpreti di tale tipologia strutturale, implicano un'attenta ricerca progettuale basata sul continuo confronto tra istanze estetiche e meccaniche.

L'ingegnere spagnolo **Eduardo Torroja**, grazie alla sua grande capacità creativa, tanto tecnica che artistica, e la sua ampia conoscenza dei materiali da costruzione, sarà il principale interprete della "lamina traforata".

Nel **Mercato di Algeciras**, come egli stesso racconta: «*la calotta sferica di 47,6 metri di luce appoggia direttamente su otto supporti, collegati fra loro da un anello poligonale post-teso. Gli spioventi della volta, fra supporti adiacenti, vengono tagliati da lunette formate da volte cilindriche perimetrali ribassate. Queste costituiscono le protezioni delle porte e, nel contempo, irrigidiscono la cupola ed incanalano i fasci di isostatiche verso i supporti*»<sup>36</sup>.

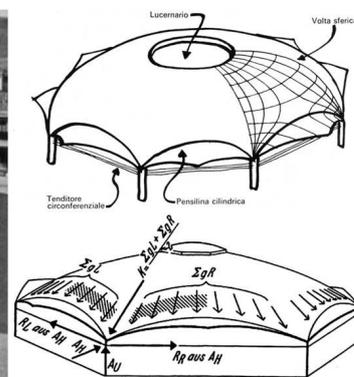


Fig.1 Mercado di Algeciras.

<sup>36</sup> Torroja Eduardo, *La concezione strutturale*, tr.it. Città Studi, Milano, 1995, pp. 138-139.

Così risulta brillantemente risolto il tema del bordo della membrana, in cui le spinte derivanti dal teorico taglio sono bilanciate dagli otto aggetti a forma di unghia. La luce naturale, inoltre, riesce a penetrare all'interno della costruzione grazie all'inserimento di un ampio lucernario, anch'esso in calcestruzzo armato, di forma ottagonale, dotato di un fitto disegno di aste complanari con il guscio, che formano un reticolo di maglie triangolari; in tal modo la luce zenitale filtra nello spazio interno generando un suggestivo intreccio di luci e ombre.

Nel **Frontòn Recolétos**, sala per il gioco della pelota basca, progettato dallo stesso Torroja in collaborazione con l'architetto Secundino Zuazo e costruito a Madrid nel 1935, la copertura in calcestruzzo armato, *«formata da due lobuli longitudinali, coprivano i 55 metri della sala scaricandosi principalmente sui muri frontali, e solo in misura molto ridotta su quelli laterali. La forma e l'orientamento dei lobuli rispondevano a motivi funzionali di illuminazione, legati all'utilizzazione della superficie interna»*

37.

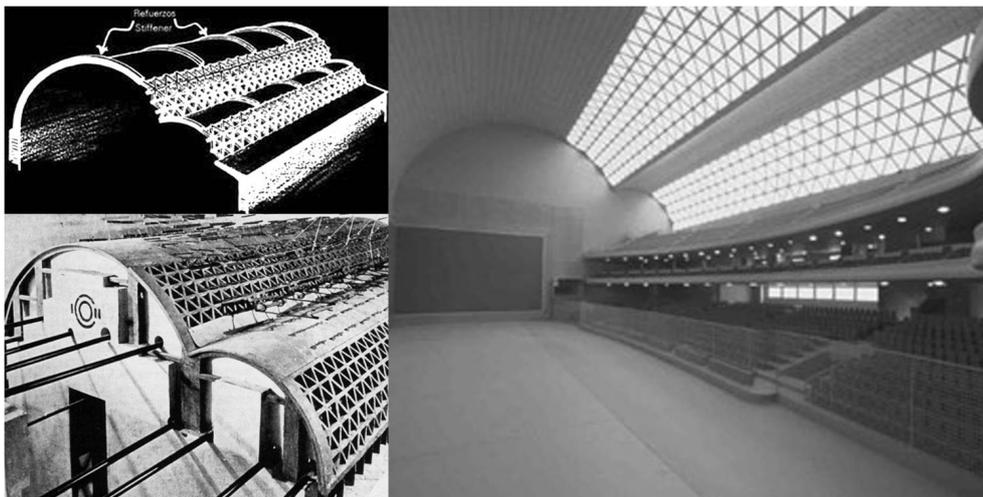


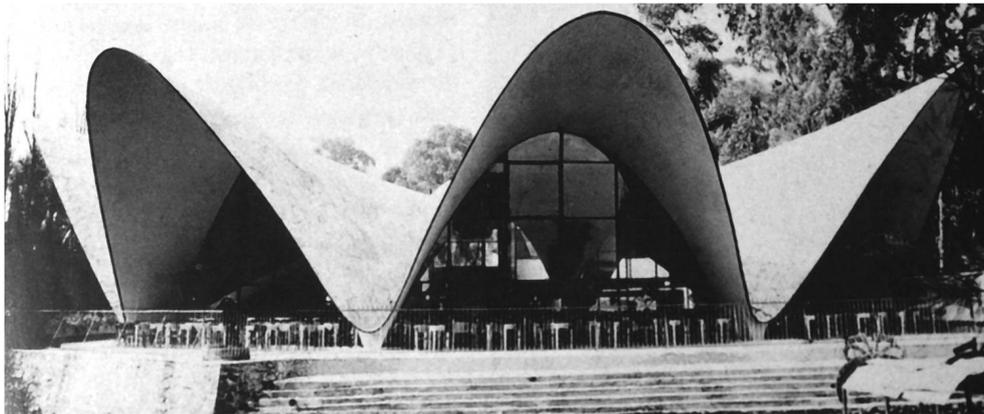
Fig.2 Frontòn Recolétos.

La smaterializzazione della lamina in calcestruzzo, attraverso un sistema di bucaure triangolari accostate tra loro in modo da formare due losanghe traforate, consente la penetrazione della luce naturale, orientandola

<sup>37</sup> Torroja Eduardo, *La concezione strutturale*, tr.it. Città Studi, Milano, 1995, p.217.

all'interno del grande vaso; Torroja disegna in questo modo lo spazio proprio attraverso la luce, quasi si trattasse di un'architettura in ferro e vetro e realizza un'opera paradigmatica che, fondata sulla "discretizzazione" di porzioni di superficie, presenta alcuni tratti in comune con la tipologia costruttiva dei gusci a graticcio.

Importante contributo nel campo delle costruzioni a guscio è fornito anche dall'architetto spagnolo Felix Candela<sup>38</sup> che progetta, in collaborazione con i colleghi Joaquim e Fernando Alvarez Ordóñez, il ristorante Los Manantiales a Xochimilco, realizzato in Messico nel 1958.



*Fig. Ristorante Los Manantiales a Xochimilco.*

*Nell'edificio, «composto dall'aggregazione radiale di otto spicchi di paraboloido iperbolico che si incontrano lungo otto diagonali anch'esse paraboliche, della luce massima di 30 m, il bordo esterno è realizzato attraverso una sezione della lamina effettuata con un piano fortemente inclinato verso l'esterno che taglia il guscio ancora secondo una sagoma parabolica. Questo complicato disegno consente di captare più luce naturale possibile e rendere visibile, dall'esterno dell'edificio, l'estrema sottigliezza della copertura laminare»<sup>39</sup>.*

<sup>38</sup> L'architetto- ingegnere Felix Candela partecipa alla guerra civile spagnola al termine della quale è costretto a emigrare in Messico dove realizza più di 500 opere di cui più di 400 includono volte in calcestruzzo armato. Avvantaggiato dalle favorevoli condizioni ambientali, trovate in una nazione in cui regolamenti e norme edilizie risultavano meno costrittivi di quelli europei, matura un'enorme esperienza nel campo della progettazione delle strutture a guscio, tanto da guadagnare il titolo di principale costruttore di volte sottili in calcestruzzo armato della storia.

<sup>39</sup> Pone Sergio, *L'idea di struttura*, FrancoAngeli, Milano, 2005, pp.55-56.

Altra rilevante questione riguarda la scelta della strategia costruttiva delle strutture a guscio, soprattutto in relazione alla costruzione delle casseforme e delle altre strutture provvisorie per la realizzazione del getto in calcestruzzo.

Tali strutture presentano, nella maggioranza dei casi, forme complesse, riferite a geometrie non cartesiane, e comportano grandi complicazioni dal punto di vista costruttivo. In riferimento al ristorante Los Manantiales a Xochimilco, le scelte progettuali sono state guidate dalla volontà di ricondurre la forma delle casseforme a geometrie note: il paraboloido, essendo una superficie a doppia curvatura "rigata" ossia realizzabile attraverso una doppia traslazione di segmenti rettilinei su due generatrici, rettilinee e sghembe nello spazio, consentiva di realizzare casseforme costituite da elementi lignei lineari, orditi secondo la rigatura stessa della superficie.

In riferimento al processo costruttivo del Palazzetto dello Sport di Roma, Pier Luigi Nervi afferma: *«è evidente che in questi casi la preparazione delle normali casseforme in legno si presenta particolarmente laboriosa e costosa, per l'impossibilità di preparare, con elementi rettilinei, quali le tavole, superfici a doppia curvatura. il sistema consiste nello scomporre la superficie da costruire in porzioni delle dimensioni medie da circa 2 a 4 mq e di preparare ognuno di questi elementi su un'apposita dima, riprodotte la superficie da costruire, in modo che, affiancati gli uni agli altri, vengano a ricostruirla esattamente. Inoltre ogni elemento ha i bordi sagomati in modo che accostando gli elementi si creano canali di circa 10/15 cm di larghezza i quali, previo collocamento di opportune armature in tondino e successivo getto di conglomerato, diventano altrettante nervature resistenti»<sup>40</sup>.*

Il calcestruzzo, inoltre, presenta *«alcune nascoste deficienze e specifiche caratteristiche che rendono quanto mai ardua, se non impossibile, la esatta*

<sup>40</sup> Nervi Pier Luigi, *Costruire correttamente*, Hoepli, Milano, 1965, pp.34-35.

*previsione del comportamento di una struttura in cemento armato»<sup>41</sup>*; pertanto, le costruzioni a guscio, al contrario dei sistemi costruttivi a secco, non consentono il pieno controllo dei tempi e dunque dei costi di costruzione.

### 1.2.2 *La tipologia costruttiva dei gusci a graticcio: soluzioni "pre-configurate" e "post-configure"*

Alcune strutture hanno un comportamento simile a quello dei gusci continui pur non essendo caratterizzate da una superficie continua. La forma tridimensionale è infatti ottenuta dall'assemblaggio di elementi rigidi e gli sforzi che nei gusci sono normalmente presenti in una superficie continua, qui sono concentrati in singoli elementi.

Gusci a graticcio in cui la superficie a doppia curvatura è realizzata attraverso una griglia di aste e nodi sono definite *grid-shell*<sup>42</sup>.

Tali strutture, resistenti per forma, riescono a coprire grandi luci garantendo, al contempo, massima flessibilità spaziale, dinamicità e sottrazione di peso a parità di prestazioni offerte.

Le tipologie strutturali *grid-shell* hanno avuto nell'ultimo ventennio maggior fortuna rispetto ai gusci in calcestruzzo i cui troppi limiti, come la difficoltà di "*traforare la lamina*"<sup>43</sup> strutturale per portare la luce naturale all'interno degli edifici o la grande complessità delle opere provvisorie per la realizzazione del getto, ne hanno impedito la diffusione che profetizzava Giedion. In termini di resistenza, tuttavia, la rigidità nel piano di una *grid-shell* è inferiore rispetto a quella di un guscio continuo di uguale forma e dimensione e ciò rende di norma necessario il ricorso a sistemi di

<sup>41</sup> Nervi Pier Luigi, *Scienza o arte del costruire?*, Città Studi, Torino, 1997, pp. 78-79.

<sup>42</sup> *grid* = reticolo (struttura complessa realizzata a partire da elementi di piccole dimensioni, intrecciati in modo da formare incroci e nodi); *shell* = conchiglia, guscio (struttura di spessore sottile che costituisce una superficie curva, delimitando un volume al suo interno).

<sup>43</sup> Pone Sergio, *L'idea di struttura*, FrancoAngeli, Milano, 2005, p.53.

irrigidimento che sfruttano principi strutturali mutuati dalla progettazione delle travature reticolari.

Per i gusci continui è possibile associare a una determinata condizione di carico e di vincoli esterni la sua forma funicolare, assunta la quale, la costruzione risulta sottoposta soltanto al peso proprio. Ma se la ricerca della forma funicolare è molto utile per strutture "pesanti", nel caso delle *grid-shell* (e in generale nel caso delle strutture leggere), il peso proprio non è altrettanto rilevante quanto l'azione dei carichi dissimmetrici di vento e neve che generano sforzi flessionali nella struttura e pertanto ne modificano la configurazione ideale.

Affinché la *grid-shell* possa resistere a flessione, si inseriscono sistemi di irrigidimento che sfruttano il principio fondamentale su cui si basa la progettazione delle travature reticolari per il quale, posizionando gli elementi secondo configurazioni a triangolo, si attribuisce stabilità all'intera struttura.

Il termine *grid-shell* è oggi riferito a tutte le costruzioni aventi la caratteristica di essere gusci in cui la superficie continua è discretizzata. La ricerca si occupa di un particolare tipo di *grid-shell* il cui processo costruttivo è articolato in due fasi attraverso le quali un graticcio piano è gradualmente deformato in cantiere, fino ad assumere la configurazione finale a doppia curvatura. Data l'assenza di un termine in grado di individuare univocamente le strutture aventi tale caratteristica, si è provveduto a individuare, nell'ambito delle strutture *gridshell*, due diverse famiglie, in funzione dei differenti processi costruttivi adottati.

In primo luogo, gusci "discretizzati" la cui forma tridimensionale è ottenuta mediante l'assemblaggio di elementi rigidi, rappresentano soluzioni "*pre-configurate*" perché gli elementi strutturali, realizzati in officina, mantengono inalterata la loro forma durante tutte le fasi del processo costruttivo e la griglia, in fase di montaggio, assume direttamente la configurazione finale tridimensionale. Affinché ciò avvenga, gli elementi

sono di norma progettati uno a uno, numerati e trasportati in cantiere per il montaggio.

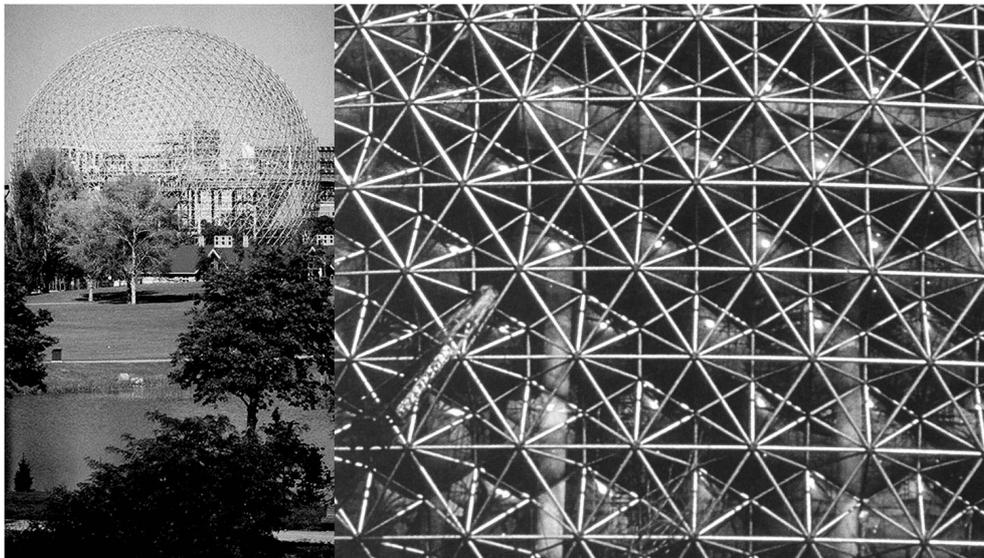
Tali sistemi furono utilizzati per la prima volta in modo diffuso nel secolo diciannovesimo. Tra i primi esempi vi è la cupola nervata in elementi in ferro forgiato, progettata da Francois Joseph **Belanger** agli inizi dell'800, con la collaborazione dell'ingegnere Francois Brunet. L'edificio è già fondato su principi strutturali, messi definitivamente a punto circa mezzo secolo dopo: *“la cupola, di Bèlanger- nota Mark Deming - posa direttamente sul muro interno della Hall. Essa si compone di 51 costole connesse alla struttura della lanterna e cerchiata da 14 cinture orizzontali. Si offre così alla vista, sotto la luce zenitale dell'occhio centrale, un impressionante scheletro di 765 cassoni, la cui riduzione progressiva è stata accuratamente stabilita da Brunet”*.<sup>44</sup>

Più complesso lo schema strutturale della cupola Schwedler che prende il nome dall'ingegnere che, nel 1863, la introdusse a Berlino, per il progetto di una copertura con una luce pari a 40 m. La struttura risulta composta dall'intersezione di archi meridiani con cerchiature parallele, con l'introduzione di aste diagonali di controvento, inserite nei campi trapezi in maniera alternata.

Nel corso dei decenni, per minimizzare le difficoltà costruttive legate all'uso di barre di diversa lunghezza per creare la superficie a guscio, sono stati sviluppati alcuni sistemi fondati sull'unificazione degli elementi costitutivi della struttura. Tra questi vi è il sistema delle **cupole geodetiche**, associate al nome di Fuller, dove la superficie sferica è approssimata attraverso l'assemblaggio di un numero limitato di elementi piani aventi la stessa forma e dimensione. *“Fuller disegna la complessa geometria della sua cupola a partire dalla proiezione sulla sfera dei vertici di un icosaedro- il solido platonico formato da 20 facce a forma di triangolo equilatero- ulteriormente parzializzata dalle circonferenze contenenti le altezze dei*

<sup>44</sup> Deming Mark K., *“Halle au blé (coupole de la )”*, s.v. in Aa.vv., *L'art de l'ingénieur*, cit., p.220.

*triangoli sferici. Suddividendo i triangoli così ottenuti con tre fasci di rette parallele alle altezze, si ottiene una rete di triangoli equilateri; questi, raggruppati intorno a un vertice comune, ricompongono alternativamente esagoni e pentagoni che formano il tronco- icosaedro, solido archimedeo, dotato di 32 facce di cui 12 pentagonali e 20 esagonali, utilizzato, ad esempio, per il disegno del pallone da football. Aumentando il numero delle facce e riducendo il numero dei pentagoni, è possibile far crescere il diametro dello sferoide a condizione di accettare piccole variazioni di segmenti costituenti i triangoli che così determinano un'alternanza di isosceli ed equilateri.*"<sup>45</sup>



*Fig. 4 Padiglione statunitense all'Esposizione Universale di Montreal del 1967*

Strutture realizzate mettendo in coazione un intreccio piano di aste, fino al raggiungimento della forma finale a doppia curvatura, rappresentano, invece, costruzioni “*post configurate*”, ovvero formate direttamente in sito. Esse presentano una notevole innovazione nel processo costruttivo: si parte dalla griglia piana bidimensionale che, attraverso due differenti metodi

<sup>45</sup> Pone Sergio, *L'idea di struttura*, FrancoAngeli, Milano, 2005, p.53.

Sulla geometria di solidi platonici alla base delle sperimentazioni di Fuller cfr. Abbate Francesco, *Sollecitazione e forma*, Cuen, Napoli, 1984 e Amirante Isabella e Rosalba La Creta, *Cupole per abitare*, Quaderni dell'istituto di Tecnologia dell'architettura dell'Università degli Studi di Napoli, Napoli, 1978.

(*upward*<sup>46</sup>: “verso l’alto” e *downward*<sup>47</sup>: “verso il basso”) può essere gradualmente deformata fino a raggiungere la configurazione tridimensionale.

Questo processo si rende possibile grazie al fatto che, nella prima fase del montaggio, le giunzioni metalliche tra le singole assicelle non sono serrate e quindi si comportano come nodi cerniera e la rigidità è proporzionata a quella della singola bacchetta. Una volta assunta la configurazione finale, i nodi intermedi vengono serrati, quelli perimetrali fissati alle travi di bordo, le bacchette cominciano a collaborare e si genera l’effetto guscio.

Tale sistema, la cui prima applicazione compiuta è considerata la copertura di grande luce del *Mannheim Lattice Shell* per la Federal Garden Exhibition del 1971, a opera di Frei Otto, affonda le sue radici in tecniche costruttive plurisecolari. La “*tessitura*”, fondata sull’intreccio tra trama e ordito, rappresenta l’atto costruttivo che, assieme alla messa in coazione degli elementi strutturali, ha dato origine a costruzioni dove gli elementi “*sono messi in forza, costretti, in altre parole a non dormire mai*”<sup>48</sup>, e che sono considerate i prodromi delle grid-shell post configurate.

Oggi, nel campo della progettazione del sistema strutturale *Gridshell*, è possibile individuare alcuni personaggi chiave, come gli ingegneri tedeschi Schlaich e Bergermann, tra i più illustri interpreti della tipologia costruttiva delle gridshell pre-configurate, o gli ingegneri che fanno capo alla Buro Happold, società fondata dall’ inglese Ted Happold che, a partire dalla stretta collaborazione con Frei Otto nel campo delle strutture leggere, ha fornito un importante contributo nel processo innovativo delle gridshell post-configurate.

<sup>46</sup> Cfr. Paoli Céline, *Past and future of Grid Shell structure, Master of Engineering in civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2007*, p. 37.

<sup>47</sup> Cfr. Paoli Céline, *Past and future of Grid Shell structure, Master of Engineering in civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2007*, p. 39.

<sup>48</sup> Laner Franco, *Mettere in forza, la chiesa della Compagnia di Gesù a Cordoba, Argentina*, *Adrastea*, 18, 2001, p. 4.

Riguardo alle soluzioni pre-configurate, le avveniristiche coperture progettate da Fuksas per la fiera di Milano, la complessa struttura in acciaio e vetro ideata da Gehry per coprire l'atrio del DZ Bank building, le coperture di grande luce progettate in Germania da von Gerkan, il recente Yas Hotel costruito per la Formula 1 ad Abu Dhabi, solo per citare alcuni esempi, mostrano come i grandi nomi dello star system internazionale sempre più frequentemente sono stati affascinati e si sono misurati con tale sistema costruttivo. Tutti conoscono queste suggestive opere ma pochi sanno che "stanno in piedi" soltanto grazie al lavoro degli ingegneri Schlaich e Bergemann che, mettendo a disposizione la loro vasta esperienza nel campo della progettazione di strutture leggere, interpretano le forme libere progettate dagli architetti, tramutandole in strutture stabili e, soprattutto, costruibili.

Lo studio SB&P ha partecipato attivamente alla progettazione e cantierizzazione dell'innovativa copertura in acciaio e vetro della fiera di Milano, costruita nell'ex area industriale di Rho Pero, su progetto di Massimiliano Fuksas. Per conto della società MERO cui è stata appaltata la sua costruzione, lo studio ha provveduto, in fase esecutiva, alla modellazione e al calcolo delle due gridshell realizzate rispettivamente in corrispondenza dell'asse centrale di connessione tra i padiglioni espositivi, per un'estensione di 1300 m, e dell'ingresso principale, dove la struttura definita "Logo", si innalza verso il cielo, fungendo da *landmark* per l'intero complesso fieristico. Entrambe le coperture risultano composte da maglie strutturali quadrangolari, successivamente irrigidite mediante l'inserimento di controventi. Ogni elemento strutturale è stato progettato singolarmente e numerato prima del montaggio, in modo da ottenere, immediatamente, la forma tridimensionale progettata.

A opera degli stessi Schlaich e Bergemann è la suggestiva copertura dello Schlueterhof, il cortile centrale dell'edificio barocco che ospita il German historical museum di Berlino, il cui ampliamento è stato curato dall'arch.

cino-americano I.M.Pei.. La gridshell in acciaio e vetro ha una luce pari a 41 x 41 m, presenta una maglia strutturale quadrangolare, di dimensioni 1.75 x 1.75 m ed è supportata solo da colonne poste sui quattro lati.

Tra gli innumerevoli contributi forniti dagli stessi ingegneri nel campo della progettazione delle *grid-shell pre configurate*, vi è anche il progetto della copertura della stazione centrale di Berlino, concepita dall'architetto Meinhard von Gerkan. Per la costruzione di tale *grid-shell* in acciaio con luce massima di 65 m, altezza 17 m e lunghezza 230 m, sono state utilizzate circa 85000 tonnellate di acciaio per coprire un volume pari a 500.000 mc.

Nel campo delle *grid-shell* post-configurate, invece, il maggiore contributo è fornito dalla *Buro Happold*, società di ingegneria molto attiva nel campo dei sistemi strutturali leggeri, fondata nel 1976 da Ted Happold, insieme ad altri sei colleghi che lavoravano alla Ove Arup, e oggi consulente per tutti i più importanti progetti di strutture di questo tipo. Ted Happold, pur avendo partecipato al progetto della *gridshell pre configurata* che copre l'atrio del British Museum di Londra, ha concentrato la sua attenzione principalmente su soluzioni costruttive post configurate (ampiamente analizzate nel prossimo capitolo) ed è stata una figura chiave nel processo innovativo del sistema strutturale Gridshell, sviluppato a partire dagli anni '70 in collaborazione con Frei Otto, fino a progetti molto recenti come il Weald and Downland Open Air Museum progettato in collaborazione con Edward Cullinan, o il padiglione del Giappone all'Expò di Hannover del 2000 progettato da Shigeru Ban, con la consulenza esperta di Frei Otto, o il Savill Building inaugurato nel 2006.

### *1.3. Caratteristiche delle gridshell post-configurate*

Le *grid-shell post-configurate* devono teoricamente poter avere origine e “degenerare” in una griglia piana<sup>49</sup> e perché ciò avvenga devono verificarsi alcune condizioni.

1) La maglia deve essere deformabile in fase di costruzione in modo da consentire la trasformazione della griglia piana bidimensionale in una superficie a doppia curvatura.

Si esclude il ricorso ad una maglia triangolare poiché quest'ultima costituisce un sistema rigido che non può essere deformato dall'applicazione di una forza esterna, senza che si deformino uno o più elementi che lo compongono. La griglia, dunque, deve essere composta da maglie quadrate, rettangolari o esagonali che, proprio perché deformabili in campo rigido, sono in grado di assumere nuove configurazioni sotto l'azione di forze esterne.

2) Gli elementi strutturali che formano la griglia bidimensionale devono avere sezioni di piccole dimensioni in modo da consentire le deformazioni necessarie affinché essa possa assumere la configurazione finale a doppia curvatura.

Per sezioni rettangolari si dispone il lato minore, in corrispondenza del quale il momento di inerzia e, dunque, la resistenza, risultano inferiori, perpendicolarmente al piano della griglia.

3) I vincoli nodali devono essere variabili in funzione della fase del processo costruttivo.

Nella prima fase i vincoli nodali devono consentire la deformazione e la rotazione delle aste e, successivamente, una volta raggiunta la forma finale,

---

<sup>49</sup> Il reticolo strutturale piano è sottoposto a graduali deformazioni fino al raggiungimento della configurazione tridimensionale resistente per forma. In teoria, data la variabilità dei vincoli nodali, è possibile ipotizzare anche il processo inverso per cui la superficie curva viene “stesa” fino a riassumere la configurazione piana di partenza. Si ipotizza, così, un'ideale reversibilità del processo costruttivo.

devono poter essere serrati in modo da consentire che il sistema, inizialmente deformabile, diventi, in un secondo momento, stabile e non ulteriormente modificabile.

La *grid-shell*, infatti, è costituita da un graticcio a doppio strato di aste incernierate tra loro. Il sistema nella sua forma piana risulta internamente labile. Ciò determina la possibilità di deformare le maglie quadrate del graticcio in parallelogrammi fino ad ottenere una geometria a doppia curvatura. Nella fase di montaggio le singole aste sono interessate da uno stato di sollecitazione di tipo flessionale, funzione della deformazione imposta al sistema. Al termine del processo deformativo le aste vengono vincolate al suolo ed il sistema strutturale risulta costituito da un serie di archi interconnessi che individuano la superficie a doppia curvatura.

La struttura nella sua configurazione finale diventa iperstatica in virtù delle condizioni di vincolo al contorno e degli elementi diagonali di controventamento.

4) La rigidità delle aste deve poter variare in funzione della fase del processo costruttivo.

In base alle prestazioni statico-resistenti attese dalla costruzione, il reticolo bidimensionale può comporsi di due o quattro schiere di aste.

Nel primo caso, la struttura è definita *a singolo layer* e il graticcio piano risulta composto da soli due fasci di aste perpendicolari tra loro.

Nelle soluzioni progettuali *a doppio layer*, invece, ciascun fascio di aste è costituito da due livelli sovrapposti, in modo che in ciascun nodo convergano quattro elementi strutturali. In questo caso, durante la "messa in forma" la rigidità della *grid-shell* è proporzionale a quella del singolo *layer* mentre, alla fine del processo deformativo, quando i nodi sono serrati, le aste collaborano tra loro e il momento di inerzia è quello corrispondente ad elementi monodimensionali con sezione trasversale costituita da due masse concentrate, poste a una distanza pari a quella tra i *layer*.

5) Una volta raggiunta la configurazione finale è necessario prevedere opportuni sistemi di irrigidimento nel piano.

Questi sistemi di irrigidimento rendono i moduli indeformabili e assicurano il trasferimento degli sforzi da una maglia all'altra. Le controventature diagonali possono essere realizzate attraverso il ricorso a elementi rigidi, in grado di sostenere sia compressione che trazione, o a cavi in grado di reagire soltanto a trazione. L'irrigidimento della struttura può essere ottenuto anche attraverso l'uso di lamiere rigide che, fissate in corrispondenza dei moduli, li rendono indeformabili.<sup>50</sup>

6) Il progetto strutturale delle *grid-shell* richiede lo studio del campo strutturale in fase pre e post-costruzione, in relazione alle diverse configurazioni assunte.

Nella fase *pre-costruzione* del sistema occorre determinare le relazioni che intercorrono tra la geometria piana del graticcio, la configurazione finale a doppia curvatura e le relative sollecitazioni. In particolare, risulta necessario valutare le tensioni che si producono nelle aste durante il montaggio, ovvero nel passaggio tra la geometria iniziale del sistema piano e la configurazione finale, al fine di verificare la capacità strutturale sia in termini di sollecitazioni che di deformazioni. E' evidente che in questo caso la geometria a doppia curvatura è definita dalla lunghezza delle membrature e dalle condizioni di vincolo al contorno, ovvero dalla loro posizione in pianta e dalla rispettiva quota.

Per quanto concerne lo studio del campo strutturale in fase *post-costruzione*, è importante tenere conto possibili escursioni in campo plastico ed eventuali fenomeni di viscosità del materiale utilizzato. Le prime possono verificarsi sia in fase di montaggio, ad esempio per una eccessiva inflessione delle aste, che in esercizio, non solo lungo i campi del graticcio ma anche in corrispondenza dei fori nei nodi. Le proprietà viscoplastiche del materiale

<sup>50</sup> Cfr. Happold Edmund, Liddell Ian, *Timber lattice roof for the Mannheim Bundestagenschau*, ed. The structural Engineer, n.3, vol.53, 1975.

portano a dissipare nel tempo lo stato tensionale nelle aste, compromettendone sia la rigidità iniziale che quella a lungo termine.<sup>51</sup>

---

<sup>51</sup> Cfr. Happold Edmund, Liddell Ian, *Timber lattice roof for the Mannheim Bundesgartenschau*, ed. The structural Engineer, n.3, vol.53, 1975.

## *1.4 La questione del materiale*

### *1.4.1. Materiali per la costruzione di grid-shell post configurate*

*<<Il rapporto che lega la scelta dei materiali alle sollecitazioni cui possono essere sottoposti, non solo, ma anche l'intensità delle stesse, genera una forma, una struttura, che di per sé tende ad essere l'ottimale: e nella progettazione e nell'evoluzione storica delle forme strutturali, l'architetto ha inteso fare "il più con il meno" sfruttando sempre al massimo le sue conoscenze fisico-meccaniche, le tecniche costruttive e le potenzialità dei materiali. >><sup>52</sup>* Così F. Abbate spiega come ogni nuovo sistema strutturale nasca dalla sintesi tra sollecitazione e forma e come a ogni tipologia strutturale si possa associare il materiale più adatto in termini di caratteristiche fisico-meccaniche e viceversa, ossia partire dall'analisi delle prestazioni offerte da un dato materiale e scegliere in funzione di queste una particolare tipologia strutturale. La scelta di un materiale rispetto a un altro, nel caso della gridshell, è subordinata anche a fattori indipendenti dalle sollecitazioni cui la struttura sarà sottoposta in fase di esercizio, e connessi, invece, a logiche processuali, come, per esempio, la capacità di un dato materiale di "assecondare" il particolare processo costruttivo, assorbendo il forte stato tensionale che, durante la "messa in forma" della gridshell, si genera all'interno del graticcio.

Affinché, in fase di montaggio (quando il sistema è ancora cinematicamente labile), la struttura non collassi sotto il carico delle sollecitazioni imposte per la sua messa in forma, il materiale di cui è composta deve essere prima di tutto sufficientemente resistente a eventuali rotture interne dovute al suddetto sistema di forze applicate.<sup>53</sup> Ciò significa che per favorire il processo deformativo che porta il graticcio bidimensionale ad assumere la

<sup>52</sup> Abbate Francesco, *La forma delle strutture*, Cuen, Napoli, 1998, p.9.

<sup>53</sup> Eventuali rotture, causate da forze esterne eccessive o da deformazioni che si sviluppano internamente alla struttura, come conseguenza dell'applicazione dei carichi, minaccerebbero la stabilità dell'opera, sia interna che globale, portando, in casi estremi, al suo collasso.

configurazione finale a doppia curvatura, il materiale deve essere caratterizzato da un modulo di elasticità elevato<sup>54</sup>, includendo la possibilità di escursione in campo plastico.<sup>55</sup> Nelle gridshell, come nei gusci continui in calcestruzzo armato, fenomeni di instabilità, sia locale che globale (fenomeno dello "*snap-through*"), risultano più frequenti per piccole curvature. Il materiale deve pertanto poter raggiungere raggi di curvatura anche elevati per adattarsi alla configurazione tridimensionale di progetto.

Per questi motivi i principali materiali utilizzati per la realizzazione di gridshell sono il legno, l'acciaio, le plastiche fibrorinforzate. Le particolari proprietà fisico-meccaniche del **legno**, infatti, lo rendono un materiale adatto alla realizzazione di gridshell post configurate. Nonostante il suo peso specifico sia notevolmente inferiore rispetto a quello degli altri materiali da costruzione, il legno presenta buone capacità di resistenza agli sforzi di compressione e trazione esercitati da carichi paralleli alle fibre (a parità di peso, la resistenza del legno alla trazione è quattro o cinque volte maggiore di quella degli acciai di impiego corrente), è elastico, può facilmente deformarsi sotto l'azione di sollecitazioni esterne e la sua lavorazione necessita di poca energia primaria di produzione.

L'impiego del legno rende opportuno considerare sia le possibili escursioni in campo plastico che i fenomeni di viscosità. Le prime possono verificarsi sia in fase di montaggio, ad esempio per una eccessiva inflessione delle aste, che in esercizio, non solo lungo i campi del graticcio ma anche in

---

<sup>54</sup> L'applicazione di un carico a un elemento strutturale, provoca delle variazioni nelle dimensioni e a volte nella forma dell'elemento stesso, descritte attraverso il concetto di deformazione. Nei materiali elastici, il rapporto tra la deformazione dell'elemento strutturale e lo sforzo che la produce, è costituita da una costante, il modulo di Young, che rappresenta una peculiarità del materiale stesso.

<sup>55</sup> Fin quando le deformazioni avvengono in campo elastico del materiale, l'elemento strutturale ritorna alle sue dimensioni iniziali dopo che i carichi applicati vengono rimossi. Durante il montaggio della gridshell, data l'intensità delle forze applicate, non si esclude la possibilità di escursione in campo plastico. Questo accade quando lo sforzo nel materiale raggiunge un livello sufficientemente alto da causare cambiamenti nella struttura interna del materiale ovvero rotture di legami molecolari. Una volta che questi cambiamenti sono avvenuti, non è più possibile tornare esattamente allo stato originale, anche rimuovendo i carichi precedentemente applicati. Conseguentemente, quando un materiale entra in campo plastico, esso subisce cambiamenti dimensionali irreversibili e una parte di questi perdura anche se i carichi esterni vengono completamente rimossi.

corrispondenza dei fori nei nodi. Le proprietà viscoplastiche del materiale portano a dissipare nel tempo lo stato tensionale nelle aste, compromettendone sia la rigidità iniziale che quella a lungo termine.

Casi studio relativi a costruzioni *gridshell* in legno saranno analizzati nel seguente capitolo.

Gusci a graticcio post configurati possono essere realizzati a partire da sottili aste d'**acciaio**. Questo materiale, infatti, offre ottime prestazioni statico-resistenti, consente di realizzare strutture di grande luce, il suo utilizzo può rendere più semplice l'eventuale integrazione con sistemi di chiusura<sup>56</sup>, ma, in termini di comportamento a flessione, non può essere curvato facilmente come altri materiali e le alte sollecitazioni necessarie a trasformare la griglia piana in una superficie a doppia curvatura possono richiedere l'utilizzo di macchine speciali. Una volta curvato, inoltre, il singolo elemento strutturale tende a conservare nel tempo la configurazione raggiunta, rendendo molto difficili eventuali successivi aggiustamenti della forma dell'intera struttura: se in fase di montaggio si imprimesse, per motivi costruttivi, una deformazione maggiore rispetto a quella che l'elemento dovrebbe avere a "formatura" ultimata, difficilmente l'asta in acciaio riuscirebbe a rilasciare le tensioni per assumere la configurazione desiderata, condizione ottenibile senza troppe difficoltà con altri materiali come il legno.

Interessante applicazione dell'acciaio per la costruzione di un guscio a graticcio è rappresentato dalla *Lattice Dome*, struttura realizzata nel 1962 da Frei Otto, in occasione di un seminario sulle costruzioni leggere tenuto presso l'Università della California, Berkeley. Si tratta di una *gridshell* post configurata in cui le aste costituenti il graticcio risultavano composte da una coppia di armature metalliche di diametro pari a 12 mm, disposte parallelamente tra loro e tenute insieme mediante una doppia rondella

---

<sup>56</sup> La struttura in acciaio è in grado di supportare agevolmente il peso dei sistemi di chiusura.

d'arresto e bulloni. Durante il processo deformativo tale giunto consentiva alle barre metalliche di ruotare, mentre, raggiunta la configurazione finale a doppia curvatura, il serraggio dei bulloni permetteva alle rondelle di bloccare le aste senza il ricorso a fori aggiuntivi o saldatura. La messa in coazione delle barre metalliche fu realizzata attraverso un'impalcatura centrale a torre dalla quale partiva un sistema di funi che, collegate in vari punti alla struttura, portavano gradualmente i nodi nella posizione finale di progetto.

Una *gridshell* in **tubi di cartone** (prodotti dalla Sonoco Europe) riciclabili e impermeabili, è stata realizzata in occasione dell'Expo 2000 di Hannover, su progetto di Shigeru Ban (con la collaborazione di Frei Otto e la consulenza strutturale di Buro Happold). La messa in coazione dei tubi di cartone, resi celebri dalla *Paper Dome* (Osaka 1998) e dalla *Paper Log House* (Kobe 1995), tenuti insieme mediante lacci di stoffa, dà origine all'edificio di carta più grande del mondo (72.8 metri di larghezza per 15.5 di altezza), riciclabile sino all'ultimo millimetro. Anche in questo caso il sollevamento della struttura avviene secondo quote giornaliere stabilite e mediante un sistema di martinetti posti in corrispondenza delle intersezioni dell'orditura.

Nel campo delle gridshell post configurate, recenti sperimentazioni mostrano le enormi potenzialità dei materiali plastici rinforzati che, alla varietà di aspetto (possono essere trasparenti, opachi o colorati) e alle innumerevoli forme che riescono ad assumere, associano ottime prestazioni statico-resistenti (la resistenza a flessione è superiore rispetto alla maggior parte degli altri materiali).

Nel 2006, presso l'Ecole des Ponts Paris Tech, il professore Olivier Baverel UR NAVIER, ha guidato una ricerca che ha portato alla realizzazione di una costruzione gridshell composta da tubi di **materiale composito** con diametro di 42 mm e spessore di 3,5 mm, assemblati a formare un graticcio piano di forma ellittica, successivamente deformato fino al raggiungimento

della forma tridimensionale con dimensioni pari a 3,7 m d'altezza, 22 m di lunghezza e 8 m di larghezza, per una superficie coperta di circa 160 mq. La distribuzione dei carichi lungo le aste costituenti il graticcio ha consentito il ricorso a materiale composito unidirezionale e ciò ha generato un risparmio dei costi di produzione, favorito anche dalla scelta di elementi strutturali e di sistemi di giunzione uguali tra loro e già disponibili sul mercato.<sup>57</sup>

#### *1.4.2. La scelta del legno. Verso un uso sostenibile del legno basato sul ricorso a semilavorati di piccole dimensioni.*

Dal 2005, quando il protocollo di Kyoto è entrato in vigore in tutti i paesi aderenti alle nazioni unite, il mondo delle costruzioni, che da solo consuma il 50 per cento delle risorse energetiche del pianeta ed è responsabile del 50 per cento delle emissioni di gas serra, sta cambiando rotta.

Al fine di ridurre sensibilmente gli impatti sull'ambiente, si verifica, da parte degli operatori del settore, una maggiore attenzione verso l'impiego di materiali ottenuti da materie prime rigenerabili e con processi che necessitano di poca energia di produzione, nonché di materiali riciclabili, capaci di prolungare la permanenza delle materie nei cicli ecologici ed economici, riducendo il consumo di materie prime e la quantità dei rifiuti.<sup>58</sup>

Queste motivazioni hanno orientato tale ricerca verso lo studio di grid shell post configured in legno, unico materiale da costruzione che, proprio per il suo utilizzo in settori diversi e con finalità estremamente varie, può essere definito una risorsa.<sup>59</sup>

<sup>57</sup> Cfr. <http://w3.bwk.tue.nl/fileadmin/bwk/ade/workshops/22.pdf>

<sup>58</sup> Tra le recenti acquisizioni dell'umanità è la consapevolezza che le risorse che abbiamo a disposizione non sono illimitate e che il Pianeta costituisce un sistema chiuso, nel quale ogni risorsa naturale trova i suoi limiti nella disponibilità e nella capacità di assorbimento dell'ecosistema.

<sup>59</sup> Il dizionario Demauro definisce "risorsa" un "mezzo, espediente con cui è possibile provvedere a un bisogno, a una necessità", o anche "l'insieme dei mezzi e delle disponibilità produttive, che costituiscono fonte di ricchezza" e, "ciascuno degli elementi di un sistema"(<http://www.demauparavia.it/97952>).

Tale materiale offre un rapporto molto vantaggioso tra peso e resistenza (ad esempio il carico di rottura a trazione dell'abete è pari a 70N/mm<sup>2</sup>), è utilizzabile tramite il ricorso a molteplici modalità di collegamento (incastri, fissaggi con elementi metallici, incollaggio) e il suo impiego nel settore delle costruzioni, presenta numerosi vantaggi ecologici, economici ed energetici.

La lavorabilità del legno consente, in tutte le fasi del ciclo lavorativo, l'impiego di "attrezzi del mestiere" semplici, maneggevoli, e meno costosi di quelli necessari per la trasformazione di altre materie prime. Questa caratteristica contraddistingue tutte le fasi della lavorazione e permette una vasta produzione dimensionale degli elementi. Le operazioni, inoltre, non presentano un grado di complessità tale da rendere necessario il ricorso a personale qualificato.<sup>60</sup>

Il legno rappresenta una materia prima naturale, rinnovabile e completamente biodegradabile. La sua lavorazione necessita di poca energia e, di conseguenza, presenta emissioni inquinanti molto ridotte (per dei segati medi il contenuto energetico è pari a 190 kWh/mc, contro circa 85.000 kWh/mc dell'alluminio) e i prodotti di scarto delle lavorazioni possono essere recuperati e riciclati o, al limite, costituire una fonte energetica tramite termovalorizzazione. A tal riguardo Franco Laner afferma: "*Nessun materiale oggi, come il legno, possiede davvero la possibilità di essere rimosso dopo l'impiego ed essere riutilizzato altrove o essere stoccato, pronto per un nuovo utilizzo, proprio grazie alla sua peculiarità di assemblaggio a secco e per la sua leggerezza*".<sup>61</sup>

Nonostante tali caratteristiche, la natura fortemente ecologica della risorsa legno è seriamente minacciata da un dissennato sfruttamento delle foreste del pianeta.

<sup>60</sup> Cfr. Capasso Aldo, La Creta Rosalba. e Vitale Augusti, (a cura di), *Edilizia a struttura in legno*, Roma, Prolegno e SEN, 1982

<sup>61</sup> Laner Franco, Olimpiadi di Torino 2006, in "Adrastea", n. 17, 2001.

A partire da alcune iniziative intraprese dai primi movimenti ecologisti, la questione delle cosiddette foreste storiche è salita alla ribalta del dibattito sulla conservazione degli equilibri globali del sistema planetario e così hanno avuto inizio una serie di azioni indirizzate a definire la classificazione e certificazione dei boschi e predisporre piani di gestione appropriati, individuare protocolli condivisi nella pianificazione dei tagli e mettere a punto interventi normativi tendenti a garantire la sopravvivenza delle risorse forestali. Naturalmente questo nuovo atteggiamento nasce nei paesi tradizionalmente dediti a un massiccio utilizzo del legno come materiale da costruzione quali Cina, Canada, Giappone e Nord-Europa per diffondersi lentamente nelle altre nazioni dell'Occidente avanzato.<sup>62</sup>

Negli USA è nato il Forest Stewardship Council (FSC), ONG internazionale composta da gruppi di ambientalisti, comunità indigene, proprietari forestali, industrie che lavorano e commerciano il legno, scienziati e tecnici, tutti orientati verso un miglioramento della gestione delle foreste e la promozione dell'impiego di legni da coltivazione. Tale ente per il controllo dello sfruttamento forestale ha sede anche in Italia, contando diversi associati tra le aziende produttrici di arredi in legno.<sup>63</sup>

Negli anni successivi sono stati redatti numerosi programmi di gestione e certificazione, da adattare a livello locale, tra cui il modello di certificazione ISO 14000, in cui spicca l'importanza dell'analisi del ciclo di vita o Life Cycle Analysis (Lca), L'Emas e, più di recente, quello del Pefc (Pan-European Forest Certification), documento contenente le proposte dei proprietari forestali e da una parte della componente industriale, riguardo alcuni aspetti ritenuti non soddisfacenti nei sistemi di eco certificazione consolidati.

---

<sup>62</sup> Cfr. Colabella Sofia, Tesi di dottorato in Tecnologia dell'architettura dal titolo "Gli usi innovativi del legno di piccole dimensioni in architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II, Facoltà di Architettura, 2006.

<sup>63</sup> Cfr. Giacchetta A., Magliocco A., *Progettazione sostenibile. Dalla pianificazione territoriale all'ecodesign*, Carocci Editore, Roma, 2007, p. 310.

Alla crescente domanda di eco compatibilità, la ricerca nell'ambito dell'utilizzo del legno in edilizia, si è orientata verso il ricorso a semilavorati di piccole dimensioni, provenienti da colture a rapido accrescimento.

Il bosco ceduo<sup>64</sup> (dal latino *caeduus* ossia adatto al taglio), in particolare, si caratterizza per la periodicità dei tagli, con cicli di ricrescita di minimo 12 anni che insieme a quelli di manutenzione, pulizia a due anni e sfollo a otto anni, portano alla produzione di grezzi e semilavorati destinati al mercato e sono funzionali alla corretta conservazione del bosco, poiché proteggono il suolo dall'erosione dovuta agli agenti atmosferici, grazie al basso peso delle piante, all'intensità del reticolo radicale e alla costante copertura del terreno.

<sup>65</sup>

A tal riguardo Julius Natterer afferma: *«I nostri antenati piantavano e proteggevano il bosco non solo per principi altruistici, ma perché consapevoli che da questo non ricavano soltanto materiale combustibile per il loro fuoco, ma anche il materiale necessario per costruire. Il bosco svolge diverse funzioni, influenza positivamente il clima, protegge il territorio, ha un valore culturale ed estetico altissimo. L'unico modo di salvaguardare anche per il futuro il patrimonio boschivo è quello di utilizzare il legno in edilizia»*<sup>66</sup>. Come sostenuto da Stefano Berti, Maurizio Piazza e Roberto Zanuttini: *«Il mancato taglio dei boschi provoca il loro invecchiamento biologico cui può conseguire una maggiore instabilità ecologica e una minore funzionalità (...) I boschi ben gestiti, in cui i tagli non superano gli incrementi, continueranno a rimanere una fonte inesauribile di materia prima. È ampiamente dimostrato che una gestione*

<sup>64</sup> In Italia la maggior parte di boschi cedui è costituita dal castagno e solo questa essenza copre una superficie di circa 700.000 ettari. Le regioni che mostrano le maggiori produzioni di legno di castagno sono Campania, Toscana, Calabria, Lazio, Piemonte, dove avviene oltre il 90 % della produzione nazionale.

<sup>65</sup> Cfr. Colabella Sofia, Tesi di dottorato in Tecnologia dell'architettura dal titolo *«Gli usi innovativi del legno di piccole dimensioni in architettura»*, Università degli Studi di Napoli Federico II, Facoltà di Architettura, 2006.

<sup>66</sup> Natterer Julius, testo pubblicato sul sito [www.holzbau.com](http://www.holzbau.com)

*intensiva ma corretta, ecologicamente sostenibile, può determinare un aumento consistente della produzione legnosa senza particolari controindicazioni di carattere ambientale».*<sup>67</sup>

Va considerato, inoltre, che un albero giovane presenta un'attività metabolica molto più intensa rispetto a un albero vecchio, fenomeno che si riflette in un maggior assorbimento di CO<sub>2</sub>, che viene in un certo senso "stoccata" nel legno e lì relegata fino a che i processi di decadimento (marcescenza, combustione) non la liberano nuovamente nell'atmosfera. Utilizzare molto legno significa quindi eliminare molta CO<sub>2</sub> dall'atmosfera, con prevedibili effetti sulla salute del nostro pianeta e dei suoi abitanti.<sup>68</sup>

Il ricorso a semilavorati di piccole dimensioni provenienti da bosco ceduo contribuisce a favorire processi produttivi sostenibili dal punto di vista della gestione del bosco, attraverso l'uso di scaglie o sfoglie, ma, molto spesso, porta alla produzione di materiali compositi in cui la presenza di colle sintetiche, rende il prodotto finito fortemente inquinante e soprattutto non riciclabile.<sup>69</sup>

L'attenzione è rivolta, dunque, alla riscoperta di sistemi fondati sull'assemblaggio di elementi costruttivi derivati da semilavorati in legno massello di piccola dimensione, con l'esclusione dei diffusissimi collanti chimici dalla filiera produttiva. Tra questi vi è sicuramente il sistema costruttivo Gridshell che spinge la sperimentazione dei componenti lignei di piccola dimensione nella direzione della **sostenibilità** poiché l'assemblaggio delle singole bacchette di legno avviene ricorrendo

<sup>67</sup> Berti Stefano, Piazza Maurizio, Zanuttini Roberto, *Strutture in legno per un'edilizia sostenibile. Materie prime e prodotti, progettazione e realizzazione*, Il Sole 24 ore, Milano, 2002, p.16.

<sup>68</sup> Cfr. Giacchetta A., Magliocco A., *Progettazione sostenibile. Dalla pianificazione territoriale all'ecodesign*, Carocci Editore, Roma, 2007, p. 309.

<sup>69</sup> Si tratta per lo più di collanti termoindurenti derivati dalla condensazione della formaldeide con la resorcina. Il componente più pericoloso è la formaldeide contenuta oltre che nella miscela di base anche negli induritori a base di paraformaldeide. Se sottoposti a temperature elevate, i materiali trattati con questi prodotti, rilasciano composti di formaldeide che si traducono in inquinamento dell'atmosfera e del terreno dovuto allo smaltimento dei residui di lavorazione.

Il settore chimico è oggi impegnato nella ricerca di colle non inquinanti come per esempio la lignina, polimero naturale che tiene insieme le fibre del legno, i risultati delle cui sperimentazioni non sono tuttavia ancora soddisfacenti.

esclusivamente a giunzioni metalliche. La scelta consente il semplice smaltimento del prodotto di un'eventuale demolizione, e, utilizzando semilavorati provenienti da colture a rapido accrescimento, non incrementa il depauperamento del patrimonio forestale.

Poiché lo sviluppo sostenibile rappresenta valore ormai condiviso in tutto il mondo occidentale, l'industria del legno, non più concentrata soltanto sugli aspetti strategici e operativi legati alla filiera, alla domanda, alla definizione dei prezzi, ecc.. pone un accento sempre più forte sulla competitività ecologica del materiale durante tutto il ciclo di vita ("dalla culla alla tomba")<sup>70</sup>. Il binomio costruzione in legno/costruzione sostenibile si va gradualmente rafforzando e valore aggiunto e visibilità mediatica, oltre a un nuovo impulso verso la composizione di un'iconografia contemporanea dell'architettura in legno, sono arrivati dai grandi nomi dello "star system" internazionale, che sempre più frequentemente sono stati affascinati e si sono misurati con il materiale. Per citarne solo alcuni, i numerosi lavori di Thomas Herzog, tra cui spicca la straordinaria copertura per l'Expò di Hannover 2000, Renzo Piano (dal padiglione espositivo per Ibm sino all'auditorium di Roma), Foster con la chiesa Futura a St. Moritz, Shigeru Ban con le sue infinite sperimentazioni, Tadao Ando con il suo padiglione all'Expo di Siviglia (1992) e Tempio Komyo-ji-Saijo (della Terra Pura), 2000, Zumthor che vanta anche trascorsi da carpentiere, Toyo Ito con la grande cupola per lo Jukai dome park, e molti altri illustri progettisti <sup>71</sup>,

---

<sup>70</sup> Il Roadmap 2010, percorso coordinato di iniziative che le industrie europee del settore hanno promosso per rendere il legno e i prodotti a base di legno, i materiali più utilizzati nelle costruzioni e nel campo delle forniture per interni. Tale programma, redatto dell'European confederation of woodworking industries, con la consulenza del Bre (Building research establishment), Indufor Oy, Jakko Poyry management consulting e Timwood Ab, punta sulla natura ecologica delle costruzioni in legno e promuovere iniziative in grado di incrementare il consumo del materiale fino a raggiungere una crescita annua pari al 4 per cento, di gran lunga superiore rispetto a quella tendenziale dell'1 per cento. (Alfredo Zappa, *Legno e architettura. L'albero della cuccagna*, Costruire n 257, ottobre 2004, p.170)

<sup>71</sup> Cfr. Zappa Alfredo, *Legno e architettura. L'albero della cuccagna*, Costruire n 257, ottobre 2004, pp.172-173.

contraddicono quanto sostenuto da Franco Laner nel 2001, secondo il quale: *“nonostante la pur recente, ma notevole innovazione tecnologica – di processo e di prodotto – le opere realizzate col legno assai raramente sono opere di architettura. Qualche volta sono buona edilizia, per lo più è tettonica, accozzaglia di aste e puntoni, miseri telai nel piano, semplice sopravvivenza di linguaggi e concezioni, acriticamente riciclati da altri materiali e sistemi costruttivi»*.<sup>72</sup>

---

<sup>72</sup> Laner Franco, *Vecchi morfemi per nuovi tecnomi*, Materia, n.36, settembre- dicembre 2001, p. 22.

### *1.5. Potenzialità e criticità delle grid-shell post configurate in legno*

*“La gridshell<sup>73</sup> è una struttura che si realizza in due fasi: la prima, la tessitura, consente di creare la lamina attraverso l'assemblaggio degli elementi lineari in una trama e un ordito regolari; la seconda, la manifattura, consente di “cucire” il tessuto secondo la forma desiderata. Se l'operazione è generale, regolare e ripetitiva durante la fase di tessitura, diventa particolare, diversa e unica nella manifattura. La prima ha le caratteristiche della produzione industriale, la seconda quelle dell'artigianato. La tessitura interpreta l'anima razionalista e cartesiana della grid, la manifattura rappresenta la parte organica della shell. Non possono esistere una senza l'altra.”<sup>74</sup>*

Il sistema costruttivo *Gridshell* rientra a pieno titolo tra le tipologie strutturali leggere che, attraverso la riduzione di materiale da manipolare e la ricerca di nuove forme resistenti, per sottrarre peso agli edifici, hanno conseguito un'**ottimizzazione strutturale**, fondata sulla capacità di disporre nel modo migliore una data quantità di materiale in una forma prestabilita, riducendo al massimo gli sprechi. Tale costruzione risulta particolarmente interessante perché presenta un rapporto tra leggerezza e resistenza molto vantaggioso. L'integrazione tra i vantaggi del reticolare e quelli tipici delle strutture che utilizzano superfici a doppia curvatura, attribuisce alle gridshell elevate prestazioni statico-resistenti, soprattutto in relazione alle ridotte dimensioni degli elementi tecnici unitari costituenti il graticcio, tanto da poter ricoprire spazi di dimensioni molto ampie con poca materia. (inserisci confronto con altre tipologie strutturali)

La tipologia strutturale *Gridshell* presenta **forti contenuti di sostenibilità ambientale ed ecologica**.

<sup>73</sup> Si fa riferimento alla tipologia strutturale precedentemente definita gridshell post configurata.

<sup>74</sup> Colabella Sofia, *Drappeggio strutturale*, in «Costruire», n. 300, maggio 2008.

Assemblare organicamente elementi leggeri, relazionati tra essi in modo da determinare la resistenza della struttura, consente di realizzare, attraverso il ricorso a semilavorati in legno massello di piccole dimensioni, manufatti che, per dimensioni e capacità portante, sarebbero abitualmente costruiti con pochi elementi grandi. Tale logica è in accordo con alcuni ragionamenti sviluppati dai primi utilizzatori delle strutture reticolari i quali, per superare i limiti imposti dalle massime dimensioni raggiungibili con i grandi tronchi, ricercarono nuove logiche costruttive basate sulla scomposizione degli elementi strutturali in pezzi minuti.<sup>75</sup>

Come notano Giulio Pizzetti e Anna Maria Zorgno Trisciuglio, essi incominciarono a *“sostituire all’anima piena una tralicciatura multipla molto fitta, alla quale non erano certo estranei taluni schemi tralicciati in orditura lignea già sfruttati in precedenza e riportati nell’Album di Villard de Honnecourt ed in parte reperibili nel Codice Atlantico di Leonardo, nonché numerosi ponti palladiani e, soprattutto le singolari esperienze compiute in Svizzera dalla seconda metà del XXVII secolo, nelle quali si ravvisa l’intento di proporre una figura strutturale ibrida “archo-trave”.*<sup>76</sup>

Nelle gridshell, la discretizzazione della superficie della “shell” in un numero finito di assicelle in legno, fondata sull’applicazione di tali principi progettuali, rende possibile l’utilizzo di semilavorati provenienti da colture a rapido accrescimento, al fine di non incrementare il depauperamento del patrimonio forestale.

L’utilizzo di metodi di giunzione a secco che escludono il ricorso ai collanti attualmente disponibili sul mercato, garantiscono la **separabilità**<sup>77</sup> dei

<sup>75</sup> Cfr. Colabella Sofia, Tesi di dottorato in Tecnologia dell’architettura dal titolo *“Gli usi innovativi del legno di piccole dimensioni in architettura”*, Università degli Studi di Napoli Federico II, Facoltà di Architettura, 2006, p.34.

<sup>76</sup> Pizzetti Giulio e Zorgno Trisciuglio Anna Maria, *Principi statici e forme strutturali*, Utet, Torino, 1980, p.637.

<sup>77</sup> Le costruzioni costituite da parti in materiali disomogenei devono essere pensate e realizzate in modo tale che, al termine del loro ciclo di vita, sia possibile ed agevole separare tali componenti al fine di facilitare la loro immissione in processi di trattamento – riciclo e/o smaltimento. Cfr. Antonini Ernesto, Mucelli Giovanni, Sinopoli Nicola,

materiali in seguito ad un' eventuale demolizione.

Il peso specifico del legno, notevolmente inferiore rispetto a quello degli altri materiali da costruzione<sup>78</sup>, associato alle esigue dimensioni delle assicelle costituenti il sistema, dà origine a **elementi strutturali molto leggeri** e maneggevoli e ciò ha riflessi positivi sui costi di costruzione durante le fasi di produzione, trasporto e di montaggio, oltre che sulle opere di fondazione. È ovvio, infatti, che riducendo il peso proprio della costruzione, le fondazioni si semplificano e si riducono, qualunque sia il terreno su cui vanno a gravare.

La *gridshell* è dotata di un valore architettonico "proprio", legato alle qualità della sua "forma strutturale", e di una sorta di autonomia formale, tipica degli oggetti di design.

Rispetto ad altre tipologie strutturali leggere in cui la forma è quasi sempre riconducibile a matrici geometriche note, il sistema costruttivo *gridshell* offre al progettista un'enorme libertà compositiva che, assieme alle sue caratteristiche di aggregabilità, di variabilità formale (uno spazio al tempo stesso definito e "aperto", coperto o scoperto, diversamente permeabile), di adattabilità (la possibilità di essere "cucito" su misura dello spazio che la accoglie), lo rende molto interessante rispetto a una ampia serie di applicazioni progettuali.

Ma i forti contenuti di sostenibilità ambientale ed ecologica uniti alla capacità di coprire grandi luci garantendo, al contempo, massima flessibilità spaziale, dinamicità e sottrazione di peso a parità di prestazioni offerte, sembrano non essere sufficienti a garantire la diffusione delle *gridshell* post configurate in legno.

---

*Sostenibile come un rifiuto*, Costruire n. 207, settembre 2000.

<sup>78</sup> Il legno presenta una buona capacità di resistenza agli sforzi di compressione e trazione esercitati da carichi paralleli alle fibre: si può dire che a parità di peso, la resistenza del legno alla trazione, è quattro o cinque volte maggiore di quella degli acciai di impiego corrente.

A partire dal 1971 quando il genio di Frei Otto progetta la *Mannheim Lattice Shell*, prima applicazione compiuta di tale tipologia strutturale resistente per forma, sono state realizzate pochissime costruzioni di questo tipo. Ciò è imputabile alla carenza di studi e ricerche sui complessi sistemi di calcolo strutturale, alla difficoltà di determinare l'esatta configurazione della struttura in fase di progetto e, soprattutto, all'alto grado di complessità del processo costruttivo. Come afferma Sofia Colabella: *"il grande svantaggio è tutto interno alla complessità di questa geometria, dal suo disegno, al suo calcolo, alla sua realizzazione: la gridshell, infatti, va progettata, verificata e montata nei tre tempi che partono dalla griglia piana e labile alla sua deformazione in guscio discretizzato ancora supportato dalle impalcature, alla forma finita con i giunti intermedi serrati e l'ancoraggio ai vincoli esterni effettuato; queste difficoltà sono forse all'origine della scarsa diffusione di questa tipologia strutturale che è stata praticamente ignorata per quasi trent'anni nella scena delle coperture di grande luce e conquista solo da pochi anni una certa visibilità."*<sup>79</sup>

---

<sup>79</sup> Colabella Sofia, *Gridshell, tecnologia delle forme complesse*, in Perriccioli Massimo (a cura di), *L'officina del pensiero tecnologico*, Alinea, Firenze 2010, p. 74.

## Capitolo II

### ***Gridshell post- configurate in legno***

#### *2.1 Linee evolutive delle gridshell post-configurate in legno*

Il sistema costruttivo dei gusci a graticcio affonda le sue radici in tecniche costruttive plurisecolari.

Gli etnografi raccontano che le popolazioni nomadi del paleolitico usavano trovare riparo in una buca, ricoperta di rami e foglie. Uno dei primi atti costruttivi è dunque caratterizzato da un intreccio, una tessitura. *Tessere* deriva dalla radice *taks* che nella matrice sanscrita significa *comporre, produrre* e da cui derivano anche le parole tetto, telaio, tecnica, e il derivato architetto. Probabilmente la prima abitazione dell'uomo non è la capanna primitiva ma la tenda, come sospettò Semper visitando a Londra, nella metà dell'800, i magazzini museo con oggetti recuperati dagli esploratori della Geographical Society nei loro viaggi nel centro Africa.<sup>80</sup>

Come spiega Frampton: "*Semper affermava che il primo manufatto strutturale in assoluto era il nodo, da cui deriverebbe la cultura edilizia primitiva dei nomadi, riferita alla tenda e alla tessitura.*"<sup>81</sup>

Non è un caso che il tema della "tessitura" sia stato per la prima volta messo in luce e interpretato dall'illustre studioso tedesco nella *Die vier Elemente der Baukunst* (I quattro elementi dell'architettura), opera in gran parte scritta nel 1850.

Fondata sull'intreccio tra trama e ordito, essa rappresenta l'atto costruttivo che, assieme alla messa in coazione degli elementi lignei, ha dato origine a

---

<sup>80</sup> Cfr. Masiero Roberto, *Nodi, giunti, rizomi e le astuzie della tecnica*, Materia, n. 34, gennaio- aprile 2001, p.20.

<sup>81</sup> Frampton Kenneth, *L'origine della tettonica: forma nucleo e forma artistica nell'Illuminismo tedesco, 1759-1870*, Tettonica e architettura. Poetica della forma architettonica nel XIX e XX secolo, (1995), tr. it. Skira, Milano, 1999, p.108.

strutture dove gli elementi “sono messi in forza, costretti, in altre parole a non dormire mai”<sup>82</sup>, considerate i prodromi dei gusci a graticcio.

Questi risalgono alla secolare tradizione costruttiva in legno che parte dalle efficienti strutture in coazione (sottili aste montate in flessione), che nell'antichità sostenevano le tende dei nomadi, fino a giungere alla teorizzazione scientifica rinascimentale, anche grazie all'interscambio di conoscenze tra carpentieri navali (lo scafo in fasciame è il più classico esempio di struttura in coazione) e carpentieri edili.

Emblematico è il caso della struttura di copertura in legno della chiesa della compagnia del Gesù di Cordoba (Argentina), progettata nel 1650 dall'architetto belga Lamer. A tale opera Franco Laner dedica un articolo<sup>83</sup>, mettendone in evidenza la straordinaria esecuzione in coazione nonché i principali riferimenti culturali che, assieme all'esperienza dovuta ai suoi trascorsi di carpentiere navale, avevano guidato il progettista in tale vicenda. Emergono gli studi del francese Philibert De L'Orme, contenuti nel suo libro intitolato *Nouvelles inventions pour bien bâtir* (1561) in cui si descrive la tecnica di una struttura in legno composta per assemblaggio di segmenti sottili. Ancora Laner, nel citato articolo, evidenzia come il gesto di Lemer fosse di assoluta modernità: “la grande differenza tra Delorme e Lemer- spiega l'autore- è che il primo concepisce staticamente e nel suo piano la struttura, il secondo la concepisce invece dinamicamente e nello spazio”<sup>84</sup>. Percorrendo la storia delle strutture leggere, particolarmente intensa nel IXX secolo, si giunge alle avveniristiche costruzioni di Buckminster Fuller, tra cui la Tensegrity dome con struttura in legno per *The Garden of Eden*, o alle sperimentazioni con il plywood (compensato) condotte da Eams e Saarinen che, note ai più per le

<sup>82</sup> Laner Franco, *Mettere in forza, la chiesa della Compagnia di Cordoba, Argentina*, Adrastea, 18,2001, p.4.

<sup>83</sup> Laner Franco, *Mettere in forza, la chiesa della Compagnia di Gesù a Cordoba, Argentina*, in Adrastea n.18, 2001.

<sup>84</sup> Laner Franco, *Mettere in forza, la chiesa della Compagnia di Gesù a Cordoba, Argentina*, in Adrastea n.18, 2001.

applicazioni d'arredo, portarono alla definizione di gusci preformati in legno multistrato, a quei tempi ampiamente impiegati in aeronautica.<sup>85</sup>

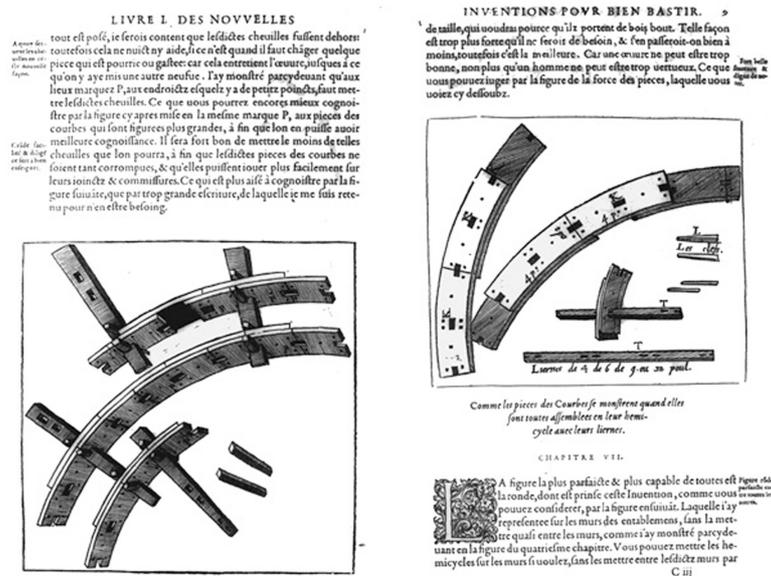


Fig 5- Philibert de L'Orme, *Nouvelles inventions pour bien bastir et à petit frais*, 1561. Le tavole da collegare con caviglie metalliche misurano 130 x 22 x 2,7 cm.

Ma la più eccellente dimostrazione delle potenzialità del principio di “tessitura” della struttura applicata non a una tensostruttura bensì a una maglia di elementi lignei di piccola dimensione è fornita dalla copertura di grande luce del Mannheim Lattice Shell per la Federal Garden Exhibition (Herzogenriedpark) del 1975, progettata da Frei Otto in collaborazione con gli architetti Joachim Langner, Winfried Langner e Carlfried Mutschler (Buero Mutschler & Partners) e, per i calcoli statici, con il gruppo di specialisti della Ove Arup, noti come Structures 3, Edmund “Ted” Happold, Ian Liddel e Michael Dickson; il tutto realizzato grazie alla maestria del costruttore Wilhelm Poppensieker, della Michael Gärtner GmbH e della Wehmeyer GmbH & Co.

<sup>85</sup> Cfr. Zappa Alfredo, *Legno e architettura. L'albero della cuccagna*, Costruire, n.257, ottobre 2004, p.174 e cfr. Colabella Sofia, Tesi di dottorato in Tecnologia dell'architettura dal titolo “*Gli usi innovativi del legno di piccole dimensioni in architettura*”, Università degli Studi di Napoli Federico II, Facoltà di Architettura, 2006.

Precedenti sperimentazioni compiute nell'ambito delle strutture in coazione (pensiamo ad esempio al *Lattice Dome*<sup>86</sup>, piccola struttura in legno costruita per la German Building Exhibition che si tenne a Essen nel 1961, o alla cupola a graticcio di legno che copriva il vestibolo dell'auditorium costruito all'interno del German Federal Pavillion per l'expo del 1967 a Montreal<sup>87</sup>), nonché l'enorme esperienza nel campo delle nuove forme architettoniche sviluppate attraverso il paradigma della leggerezza, consentono a Frei Otto di realizzare un sottilissimo guscio a graticcio composto da una doppia schiera di assicelle di legno 50x50 mm di sezione giuntati ogni 50 cm e la cui forma tridimensionale era ottenuta portando gli elementi in uno stato di coazione e poi serrandoli insieme tramite giunzioni estremamente semplificate.

L'enorme libertà compositiva offerta al progettista, unita alla capacità della struttura di essere "cucita" su misura dello spazio che la accoglie, crea una distanza tra la tipologia costruttiva *Gridshell* e le costruzioni resistenti per forma progettate da Fuller, tutte riconducibili a matrici geometriche note (il ricorso a superfici sferiche o cilindriche e le complesse modalità di discretizzazione adottate, rendevano possibile un'ottimizzazione della produzione industriale attraverso la normalizzazione degli elementi prefabbricati costituenti la costruzione, come ad esempio nel caso delle cupole geodetiche). Nel caso delle gridshell, il graticcio strutturale piano, realizzato attraverso l'assemblaggio di elementi lineari in una trama e un ordito regolari, rappresenta un'operazione ripetitiva che, fondata sul ricorso

<sup>86</sup> Nel 1962 Frei Otto sperimenta la costruzione di un guscio a graticcio attraverso la deformazione di un reticolo piano, fino al raggiungimento di una superficie finale a doppia curvatura. Tale struttura, la *Lattice Dome*, con luce massima pari a 15 m, altezza in chiave della volta di 5 m e modulo strutturale di 48 cm, è realizzata a partire da aste di pino dell'Oregon (40x60mm di sezione trasversale), connesse tramite bulloni. Tale sperimentazione fu seguita, nel 1962, dalla costruzione di una cupola a graticcio realizzata a partire da sottili barre in acciaio, realizzata in occasione di un seminario sulle strutture leggere tenutosi presso l'università della California a Berkeley.

<sup>87</sup> Nel 1965, in collaborazione col prof. Rolf Gutbrod di Stoccarda, vinse il concorso per il progetto del German Federal Pavillion per l'expo del 1967 a Montreal. La struttura principale era costituita da una copertura a rete di cavi ma al suo interno era previsto un auditorium con il vestibolo coperto da una cupola a graticcio di legno dalla forma irregolare. In seguito a tale esperienza costruttiva furono approfondite le tematiche relative ai gusci a graticcio in legno, incluso gli studi per il progetto (mai realizzato) di una sala da cerimonie in Arabia Saudita dove il prof. Otto collabora col prof. Rolf Gutbrod e Ove Arup.

ad elementi strutturali seriali, offre i più comuni vantaggi della produzione industriale e, contemporaneamente, le potenzialità di un sistema disponibile a essere contestualizzato in funzione della forma prescelta, delle condizioni di vincolo esterno, del contesto in cui si inserisce, quasi potesse essere "cucito su misura".



*Fig.6- Cupola geodetica di Fuller (sinistra) e copertura di grande luce del Mannheim Lattice Shell per la Federal Garden Exhibition progettata da Frei Otto (destra).*

*“La grande curiosità intellettuale e l’atteggiamento naturalmente sperimentale di Frei Otto generano, nel settore delle gusci a graticcio (come peraltro in quello delle tensostrutture), un’opera che risulterà paradigmatica per le generazioni successive. E forse non è un caso che sia proprio Otto a “inventare” questo modo di costruire utilizzando l’esperienza ventennale accumulata nell’osservazione di come si deformano trama e ordito dei tessuti delle sue tensostrutture quando sono portati ad assumere una forma a doppia curvatura.”<sup>88</sup>*

Nonostante tali ricerche mettessero in evidenza come negli anni Settanta esistesse ancora molto da sperimentare nella cultura costruttiva del legno, Per molti anni il sistema strutturale dei gusci a graticcio è stato accantonato a vantaggio, soprattutto in Europa, delle concorrenti strutture in acciaio e in calcestruzzo armato. «Travi in acciaio e calcestruzzo armato soppiantano

<sup>88</sup> Colabella Sofia, Tesi di dottorato in Tecnologia dell’architettura dal titolo “Gli usi innovativi del legno di piccole dimensioni in architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II, Facoltà di Architettura, 2006.

*quasi completamente il legno nei solai e nelle coperture, e solo sul finire del Novecento si registra un rinnovato interesse per questo materiale»<sup>89</sup>.*

Negli ultimi anni il legno è tornato alla ribalta nel settore delle costruzioni, grazie alla riscoperta delle sue potenzialità tecnologiche, applicative, ed espressive. La storia recente, racconta Josef Wiedemann, dimostra che *«nonostante le sue possibilità di impiego straordinariamente molteplici e la sua capacità di conservarsi per millenni, il legno per un certo periodo è stato trascurato dal nuovo che avanzava. [...] Oggi siamo nuovamente consapevoli delle sue eccezionali proprietà. Il vasto lavoro di ricerca e sviluppo, in particolare negli ultimi trent'anni, ha fatto sì che il legno ritornasse a essere un elemento fondamentale nell'edilizia»<sup>90</sup>.*

Ed è proprio il filone di ricerca impegnato a indagare le possibilità espressive offerte dal legno nel campo delle strutture in coazione (dove il materiale viene messo in opera in presollecitazione) e di quelle in cui è invece chiamato a resistere per forma attraverso curvature di pannelli o intelaiature a graticcio orientate nelle tre dimensioni dello spazio, a spiccare per originalità e spinta innovativa.<sup>91</sup>

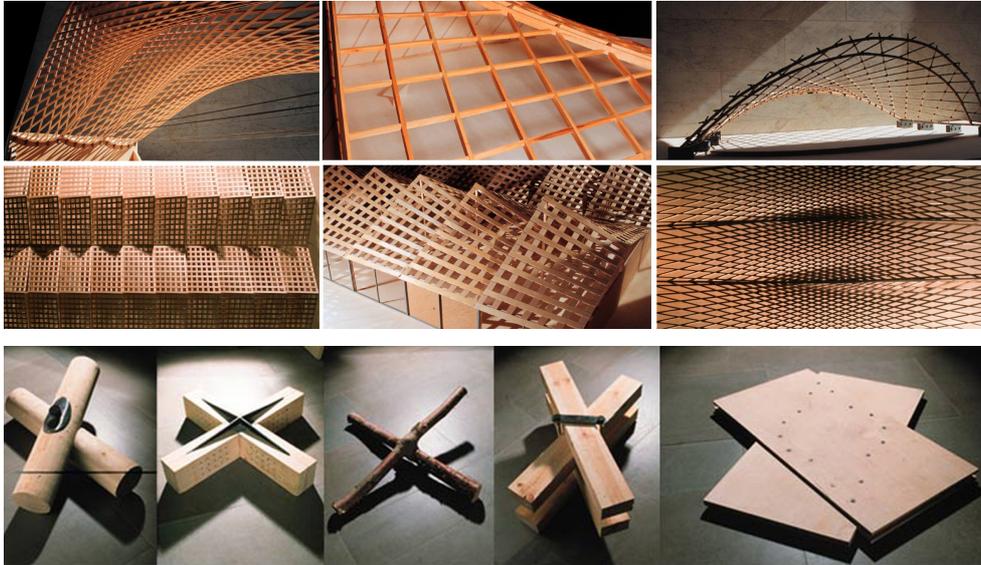
In questo solco si inseriscono le numerose sperimentazioni condotte dal Pook architects' office di Helsinki, ufficio professionale fondato nel 1997, che esplora il legno come materiale primario per generare soluzioni progettuali fondate su innovazione strutturale e sostenibilità ambientale. Nel corso del Netlike wooden structures research, lo studio ha messo a punto diversi sistemi in cui pannelli o intelaiature a graticcio orientate in tre dimensioni danno origine a strutture in coazione resistenti per forma e in grado di offrire soluzioni spaziali estremamente flessibili.<sup>92</sup>

<sup>89</sup> Barbisan Umberto e Masiero Roberto, *Il labirinto di Dedalo. Per una storia delle tecniche dell'architettura*, FrancoAngeli, Milano, 2000, p.145.

<sup>90</sup> Wiedemann Josef, *Il legno nella nostra vita*, in Natterer Julius, Thomas Herzog, Michael Volz, *Atlante del legno*, UTET, Torino, 1998, pp.10-11.

<sup>91</sup> Cfr. Zappa Alfredo, *Legno e architettura. L'albero della cuccagna*, Costruire n 257, ottobre 2004, pp.174.

<sup>92</sup> La *Netlike wooden structures research* fu commissionata alla fine degli anni Novanta dalla National Technology agency, Puuinfo, Finforest e Vierumaen Teollisuus, al fine di ideare e progettare strutture in legno resistenti per forma che potessero essere sfruttate dall'industria delle costruzioni. Il



*Fig.7 - Tipologie costruttive resistenti per forma e relativi nodi strutturali sviluppati dal Pook architects' office di Helsinki nel corso della Wooden structures research.*

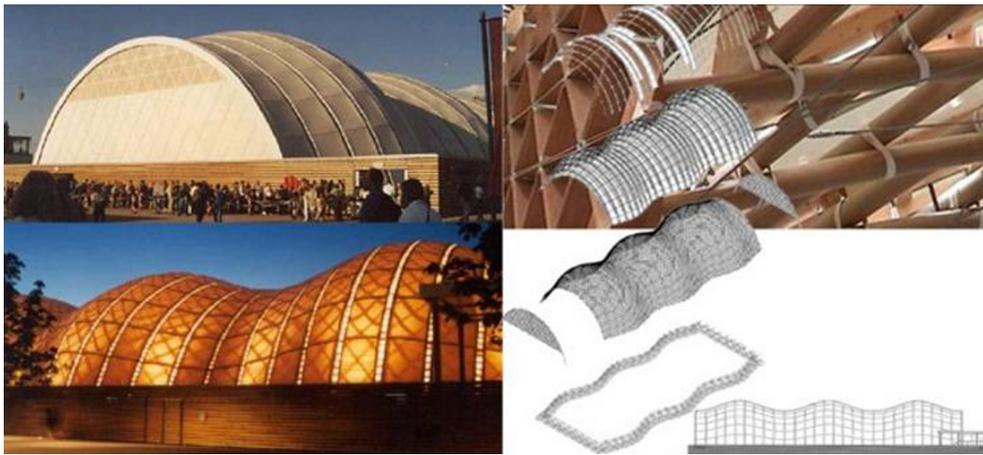
Nel campo dei gusci tessuti con elementi minuti un ruolo importante è giocato dalle sperimentazioni progettuali di Shigeru Ban tra cui la struttura fondata sull'intreccio di pannelli di compensato per la copertura della Wickerwork House<sup>93</sup>, nei pressi di Nagano, e i sottili e sinuosi gusci a graticcio in bamboo realizzati per il progetto del Forest Park Pavilion e per il *Bamboo roof della Rice University art gallery* di Houston; senza dimenticare il progetto per il **padiglione del Giappone all'Expò di Hannover**, innovativo edificio di 72.8 metri di larghezza per 15.5 di altezza, composto da tre cupole realizzate attraverso un intreccio di tubi di cartone,

---

lavoro ha portato alla definizione di sei sistemi di copertura caratterizzati da destinazioni funzionali, geometria, dimensioni, essenza del legno utilizzata e metodi costruttivi diversi. (Cfr. Alfredo Zappa, *Legno e architettura. L'albero della cuccagna*, Costruire n 257, ottobre 2004, pp.179)

<sup>93</sup> Con la collaborazione di Arup Japan nel 2001, Ban realizza la Wickerwork House, casa per weekend immersa nella foresta, formata da un parallelepipedo in vetro, coperto da una cupola formata dall'intreccio di strisce di compensato di larice prefabbricate, di dimensioni pari a 1.60x0.30 metri e giuntate in opera dopo essere state interconnesse in modo da incurvarsi naturalmente. Una volta montata, la cupola è protetta con uno strato di schiuma poliuretanicca e con un successivo strato di plastiche rinforzate con fibra di vetro che garantisce l'impermeabilità. (Cfr. Sofia Colabella, *Tesi di dottorato in Tecnologia dell'architettura dal titolo "Gli usi innovativi del legno di piccole dimensioni in architettura"*, Università degli Studi di Napoli Federico II, Facoltà di Architettura, 2006)

tenuti insieme con semplici lacci di stoffa, per il quale Ban si avvale della consulenza esperta di Frei Otto e, per l'ingegnerizzazione, dell'indispensabile supporto di Buro Happold.



*Fig.8 - Shigeru Ban, Padiglione giapponese all'Expò di Hannover, 2000*

Oggi, nel campo delle grid shell post configurate in legno, il maggiore contributo è fornito proprio dalla *Buro Happold*, società di ingegneria molto attiva nel campo dei sistemi strutturali leggeri, fondata nel 1976 da Ted Happold, insieme ad altri sei colleghi che lavoravano alla Ove Arup, e oggi consulente per tutti i più importanti progetti di strutture di questo tipo.

Ted Happold, pur avendo partecipato al progetto della gridshell pre configurata che copre l'atrio del British Museum di Londra, ha concentrato la sua attenzione principalmente su soluzioni costruttive post configurate. In occasione del progetto della copertura del Mannheim Multihalle di Frei Otto, fu chiesta e ottenuta, nell'ottobre 1973, la collaborazione del gruppo di specialisti della Ove Arup, noti come Structures 3, del quale Ted Happold faceva parte assieme agli ingegneri Ian Liddel, Michael Dickson e Terry Easley.

Nel 2002 il gruppo di progettazione *Edward Cullinan Architects*, chiede e ottiene la collaborazione della società di ingegneria per realizzare nel Sussex, in Inghilterra, il Downland Gridshell per il Weald & Downland

Open Air Museum, un guscio lungo 50 metri, largo 12 e alto 10 metri, realizzato con una griglia a doppio strato formata da assicelle di legno di quercia di 20x40 mm connesse ogni 40 cm con, in tutto, più di 1000 bulloni. Ogni nervatura è composta da due assicelle che, incrociandosi con l'altra famiglia di elementi, forma un nodo che prevede una sovrapposizione di quattro listoni. La griglia prefabbricata, composta da 600 assicelle la cui lunghezza totale è di 12 km, è stata posata su una piattaforma resistente, collocata ad una quota pari alla massima altezza di progetto e, di seguito, gradualmente deformata, portando le estremità verso il basso, fino al raggiungimento della configurazione finale a doppia curvatura.



*Fig.9 - Downland Gridshell per il Weald & Downland Open Air Museum.*

In seguito la Buro Happold realizza, in collaborazione con il gruppo Glen Howells Architects, il progetto del più recente Savill building, visitor centre situato all'ingresso del Savill Garden nel Windsor Great Park, Surrey. L'edificio, in perfetta armonia con gli alti alberi che lo circondano, risulta composto da un guscio a graticcio dalla forma sinuosa, realizzato con ben

20 km di assicelle di legno proveniente dai boschi del parco di Windsor e poggiante su sostegni verticali in acciaio, efficace esempio di ibridazione tecnologica.



*Fig.10 - Savill building nel Savill Garden nel Windsor Great Park, Surrey.*

Altra applicazione progettuale del sistema costruttivo gridshell in legno è costituita da The Bubble, l'innovativa torre d'avvistamento dello zoo di Helsinki, progettata tra il 2000 e il 2002 dal giovanissimo architetto Ville Hara nell'ambito del Wood studio workshop presso il dipartimento di Architettura della Helsinki University of technology e costruita da un gruppo di dodici studenti coadiuvati da un loro professore, Jan Söderlund e dall'architetto Risto Huttunen. La complessa geometria, ottenuta con un tessuto di assicelle in legno da 6x6 cm di sezione, curvate in cantiere e serrate con 600 giunti, si è potuta materializzare grazie a un sofisticato

modello tridimensionale cad ottenuto attraverso la scansione 3d dell'omologo modello realizzato con la plastilina.<sup>94</sup>



*Fig.11 - Torre d'avvistamento dello zoo di Helsinki*

<sup>94</sup> Date le enormi difficoltà di gestire con metodi tradizionali una forma così irregolare, Ville Hara ha rilevato mediante uno scanner 3D il modello in plastilina appositamente plasmato, ottenendo, così, la base per il progetto in AutoCad. La risoluzione dei problemi esecutivi è stata facilitata dalla costruzione di un mock-up alto circa 2 m, in scala 1:5.

## 2.2 *Gridshell e forma funicolare*

*“Una struttura che autonomamente assume una conformazione ideale è la catena, o la fune, quando viene fissata alle due estremità. La curvatura che questa struttura naturalmente assume, se sottoposta a un carico pari al proprio peso, è denominata catenaria e, data la flessibilità della fune, il sistema ottenuto risulta in regime di pura trazione (la fune o la catena non possono reggere sollecitazioni di flessione o compressione).”<sup>95</sup>*

Se questa forma, così descritta da Rainer Graefe, e comunemente chiamata *funicolare*, fosse semplicemente capovolta e caricata precisamente nello stesso modo, la struttura risultante sarebbe, per analogia, in uno stato di pura compressione. L'impiego di una catenaria capovolta può essere utile nella ricerca delle forme ad arco nelle quali non insorgono forze di flessione e che, pertanto, necessitano di poco materiale e di una limitata massa, soddisfacendo, così, i presupposti necessari alla realizzazione di una campata ampia. Ma le strutture funicolari, ovvero strutture per cui la forma è derivata in questo modo, ove il carico induce solo uno stato di trazione o compressione, possono essere anche tridimensionali: la forma assunta da una membrana flessibile sotto un carico uniformemente distribuito, se capovolta, rappresenta la forma funicolare di strutture tridimensionali a volta o a guscio.

La maggior parte delle strutture a volta più antiche non erano modellate secondo il principio della catenaria, ma realizzate in base a forme geometriche note (cerchio o segmenti di cerchio); ciò significava ricorrere a una configurazione resistente “non appropriata” che dava luogo a problemi strutturali quali rigonfiamenti e crepe, risolti di volta in volta senza modificare la forma complessiva, ma intervenendo nei punti considerati di maggiore instabilità attraverso l'aggiunta di pesi nell'area inferiore della

---

<sup>95</sup> Otto Frei et.al. , *L'architettura della natura. Forme e costruzioni della natura e della tecnica e processi della loro formazione*, Saggiatore, Milano, 1984. p. 46.

curvatura e l'utilizzo di materiali più leggeri nella parte alta (Pantheon) o mediante l'istallazione di tiranti ad anello esercitanti forze di trazione (Duomo di Firenze, San Pietro a Roma). Allo stesso tempo, però, anche senza conoscerne il principio, venivano realizzate strutture a volta dalla forma molto simile alla catenaria rovesciata. Un esempio evidente è fornito dalle volte in argilla di popolazioni primitive oppure dalle tecniche per costruire volte in mattoni degli antichi orientali, in cui si arrivava alla forma strutturalmente più efficiente, casualmente, attraverso ripetuti fallimenti e successi. L'arco acuto gotico, se paragonato all'arco a tutto sesto, risulta avere una forma staticamente più valida e più vicina alla catenaria capovolta. Tale analogia fu riconosciuta per la prima volta nel 1870 da Robert Hooke il cui metodo di ricerca formale fu adottato già da Christopher Wren per la costruzione della cupola della cattedrale di San Paolo, riguardo al cui progetto, però, non è stato trovato alcun materiale che testimoni l'utilizzo di modelli a struttura sospesa. Di modelli sperimentali composti da catenarie riferisce per la prima volta Giovanni Poleni il quale, per verificare il profilo della cupola di S. Pietro a Roma, allora pericolante, appese ad una catena pendente piccole sfere di dimensioni differenti, corrispondenti ai pesi dei vari conci in cui ciascuno spicchio di cupola era stato suddiviso.<sup>96</sup>

In tale direzione vanno collocati i modelli funicolari, complesse costruzioni di fili e pesi attraverso i quali Gaudì, nella seconda metà dell'800, realizzava *maquette* "rovesciate" delle sue ipotesi costruttive, cercando di trovare le distribuzioni dei carichi che meglio rispondessero alle forme dinamiche che ricercava. L'ispirazione alle forme della natura che avevano affascinato l'architetto catalano sin dall'infanzia, ben sintetizzata nella sua frase: "*Quest'albero vicino al mio studio: ecco il mio maestro*"<sup>97</sup>, il fortissimo

<sup>96</sup> Cfr. Otto Frei et.al. , *L'architettura della natura. Forme e costruzioni della natura e della tecnica e processi della loro formazione*, Saggiatore, Milano, 1984. p. 46-47.

<sup>97</sup> Cit. in Ceccarelli N., *Antoni Gaudì: alla ricerca della forma*, DDD- Rivista trimestrale di Disegno Digitale e Design, Poli.Design, Milano, Anno 1 n.4 ott/dic 2002, pg.168-[www.mediadigitali.polimi.it/ddd/ddd\\_004/art\\_pdf/ceccarelli.pdf](http://www.mediadigitali.polimi.it/ddd/ddd_004/art_pdf/ceccarelli.pdf)

interesse per la geometria spaziale mediata dalla geometria descrittiva, associati all'inesauribile creatività personale, lo hanno portato a concepire opere innovative, frutto della complessa interazione tra geometria, struttura, spazialità e aspetti costruttivi.<sup>98</sup>

Gli studi di Gaudí erano evidentemente ben noti al genio di Frei Otto il cui *"lungo lavoro nel campo delle nuove forme architettoniche, fondate sul paradigma della leggerezza strutturale, spazia dalla teoria delle catenarie a quella delle superfici minime, dallo studio del comportamento degli scheletri animali e delle forme resistenti esistenti in natura alla prassi di costruzioni audaci e innovative come il padiglione tedesco all'Expò del 1967 a Montreal, lo stadio Olimpico di Monaco (1972), il padiglione venezuelano all'Expò di Hannover del 2000. Nel 1954 Otto pubblica la sua tesi di laurea, Hangende Das Dach: Gestalt und Struktur (Coperture sospese: forma e struttura) in cui affronta in via ancora teorica gli argomenti che lo vedranno protagonista per il cinquantennio successivo<sup>99</sup>: la progettazione delle sue architetture anziché svolgersi a partire da criteri formali di composizione, parte dalla simulazione di forme, spesso dedotte dalle strutture presenti in natura, in cui c'è un equilibrio di forze secondo i principi di "Formfinding" o ricerca della forma e "Selbstbildungsprozess" o processo di autoformazione."*<sup>100</sup>

Il rapporto tra architettura e biologia è alla base del suo libro *"L'architettura della natura"* in cui, superando un ingenuo atteggiamento progettuale basato

<sup>98</sup> Tra i principali capolavori vi è la chiesa della Colonia Guell (effettivamente realizzata solo nel basamento e nella cripta) per il cui progetto Gaudí procedette alla rotazione di 180 gradi e alla successiva modellazione grafica del plastico a catene pendenti. Anche per la sua più importante e nota opera, la Chiesa della Sagrada Família, assieme a disegni e schizzi, egli fece largamente ricorso all'elaborazione e modifica dei modelli di studio, facendo di una maquette in scala 1:10, fortunatamente sopravvissuta alla guerra civile spagnola, oggi restaurata e oggetto di meticolosi studi, il principale strumento di progettazione. (Cfr. N. Ceccarelli, *Antoni Gaudí: alla ricerca della forma*, DDD- Rivista trimestrale di Disegno Digitale e Design, Poli.Design, Milano, Anno 1 n.4 ott/dic 2002, pgg. 166-174 - [www.mediadigitali.polimi.it/ddd/ddd\\_004/art\\_pdf/ceccarelli.pdf](http://www.mediadigitali.polimi.it/ddd/ddd_004/art_pdf/ceccarelli.pdf))

<sup>99</sup> Dieci anni più tardi, Otto fonda l'*Institut für Leichte Flächentragwerke (Istituto per le strutture leggere)* alla Technisch Universität di Stoccarda.

<sup>100</sup> Colabella Sofia, Gridshell, Tecnologia delle forme complesse, in M. Perriccioli, *Officina del Pensiero Tecnologico*, Alinea, Firenze, 2010.

sulla mera imitazione delle forme della natura, egli indaga le cause e gli effetti che danno origine agli esseri animati e inanimati in essa presenti. Egli sottolinea come le forme architettoniche che aspirano all'ottimizzazione delle risorse (ovvero al ridotto impiego di massa e alla ricerca di superfici resistenti minime) si basino spesso su tecniche che, raggiunto un certo livello di sviluppo, consentono di fornire una lettura critica di determinati fenomeni naturali. Le tensostrutture realizzate per l'Esposizione Elvetica di Losanna nel 1963, il Padiglione tedesco a Montreal e quello successivo per le Olimpiadi di Monaco (solo per citarne alcuni) sembrerebbero, agli occhi di un osservatore superficiale, riproduzioni di ragnatele. In realtà, come lo stesso Frei Otto racconta, quando queste costruzioni leggere furono progettate, non si conosceva molto sulle ragnatele; solo quando le strutture furono studiate e perfezionate da un punto di vista statico, fu possibile guardare le tele dei ragni con occhi diversi, ovvero "riconoscerle".<sup>101</sup>

A partire da tali presupposti, egli mette a punto una pluralità di tecniche, approcci e strumenti per la ricerca morfologica delle sue ardite architetture, riuscendo, attraverso numerose prove, tentativi e correzioni, ad approssimare al massimo la soluzione dei problemi strutturali e tecnologici che di volta in volta era chiamato a fronteggiare. Con l'aiuto di numerosi studenti dell'IL, Otto conduce, a partire dal 1946, una grande quantità di esperimenti sui processi di auto generazione della forma, dai più conosciuti modelli funicolari, ai modelli con acqua saponata, utili per la ricerca della superficie minima di tensostrutture o strutture a rete di cavi; dai modelli realizzati insufflando aria compressa all'interno di sottili membrane in Pvc, utilizzati per controllare la sagoma di strutture pneumatiche, a quelli formati da pezzi di tessuto irrigiditi mediante impregnanti, per la progettazione di gusci disegnati a partire da forme funicolari.<sup>102</sup>

<sup>101</sup> Cfr. Otto Frei et.al., *L'architettura della natura. Forme e costruzioni della natura e della tecnica e processi della loro formazione*, Saggiatore, Milano, 1984. pg.8.

<sup>102</sup> Cfr. Otto Frei, Rush Bodo, *Finding Form*, Edition Axel Menges, Stuttgart, 1995.

Quest'ultimo metodo fu sviluppato, in maniera del tutto indipendente, anche dall'ingegnere svizzero Heinz Isler il quale, a partire dal 1952, realizza numerosi plastici in scala ridotta, composti da pezzi di tessuto assemblati, sospesi e quindi impregnati di una speciale sostanza plastica. I modelli essiccati assumevano la rigidità necessaria per poter essere capovolti e riprodurre la forma del guscio; tale procedimento, che si ispira ad alcune pratiche in uso presso i costruttori delle cattedrali gotiche, consente di ottenere forme funicolari in cui tutte le parti della lamina sono sottoposte esclusivamente a compressione e di sperimentare figure derivanti da geometrie estremamente complesse.

Nel campo della progettazione dei gusci a graticcio, Otto ricorre a modelli funicolari con lo scopo di individuare non solo la configurazione per cui la struttura, in assenza di carichi esterni dissimmetrici, risulti sottoposta soltanto a peso proprio, ma anche l'esatta discretizzazione della superficie a doppia curvatura, nonché la forma funicolare degli archi di bordo, affinché essi non lavorino a flessione. L'utilizzo delle catenarie sospese gli consente di determinare la forma e la lunghezza degli elementi strutturali del guscio a graticcio in legno, su base ellittica, costruito per il German building exhibition ad Essen nel 1962, e di quello composto da barre circolari di acciaio, realizzato nello stesso anno, in occasione di un seminario sulle strutture leggere condotto presso l'Università della California Berkeley. Nel 1965, in collaborazione col prof. Rolf Gutbrod di Stoccarda, vince il concorso con il progetto del German Federal Pavillion per l'expo del 1967 a Montreal. La struttura principale era un tetto continuo a rete di cavi ma al suo interno c'era un auditorium il cui vestibolo era coperto da una cupola a graticcio di legno, dalla forma irregolare.

Modelli a catenarie furono utilizzati dallo stesso Frei Otto per il progetto della copertura di grande luce del Mannheim Lattice Shell per la Federal Garden Exhibition (Herzogenriedpark) del 1975, realizzato in

collaborazione con gli architetti Joachim Langner, Winfried Langner e Carlfried Mutschler (Buero Mutschler & Partners).

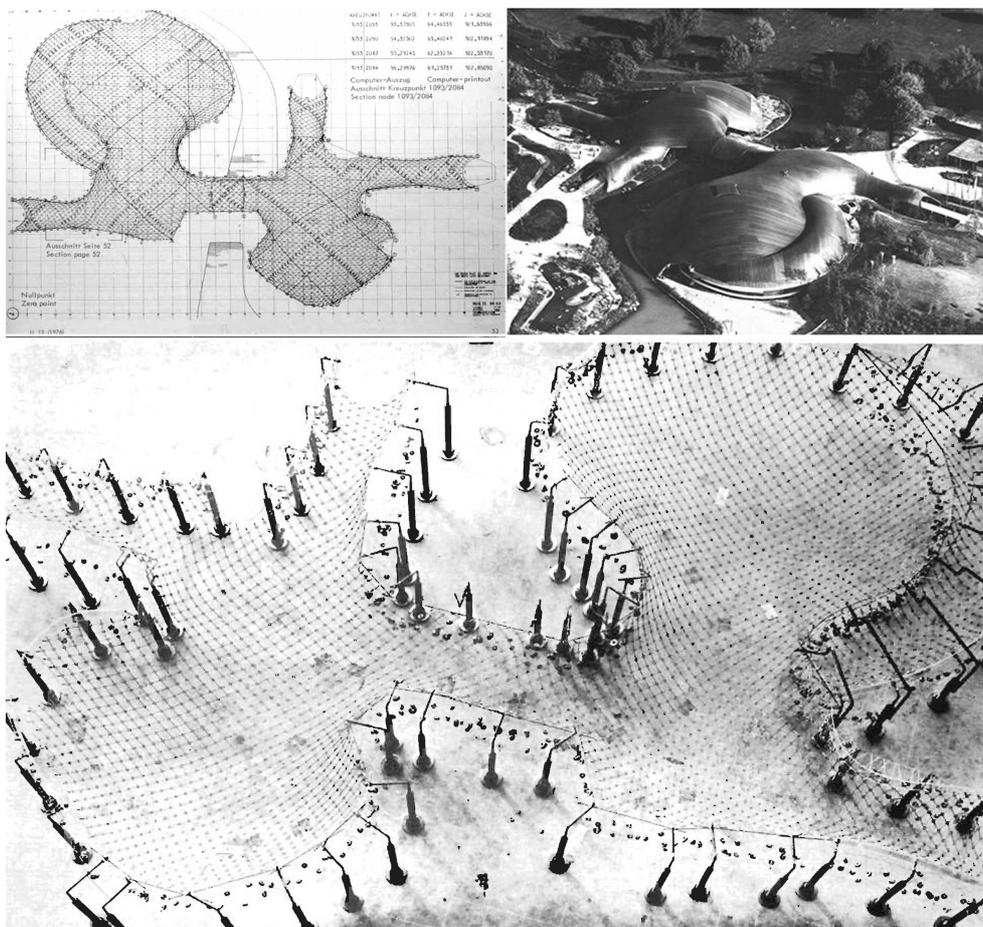
Dagli anni '60, in una delle principali città tedesche, ogni due anni, si tiene questa importante manifestazione grazie alla quale intere aree depresse della città prescelta possono avvalersi dei finanziamenti governativi e degli sponsor per la realizzazione di nuovi parchi e giardini e per provvedere alla loro dotazione di servizi per i fruitori (aree ristoro e polifunzionali, sentieri, illuminazione etc). Le città di Mannheim e di Ludwigshafen furono selezionate nel 1970 come sedi per l'esposizione del 1975 e l'area di progetto comprendeva due zone situate lungo i lati opposti del fiume Neckar, collegate attraverso un sistema di trasporto appositamente realizzato. Il progetto per la sala polifunzionale, da realizzarsi a Mannheim, fu affidato allo studio di progettazione Mutschler & partners, vincitore del concorso bandito nel 1971 per il disegno del parco. La proposta originaria che prevedeva, per l'area coperta, la realizzazione di una struttura pneumatica, fu subito scartata dalle autorità e i progettisti decisero quindi di rivolgersi al prof. Otto che alcuni anni prima aveva realizzato una tensostruttura per la stessa manifestazione. Dopo aver indagato diverse possibilità, si concluse che una costruzione a forma libera sarebbe stata la più appropriata, poiché la sala doveva interfacciarsi con l'adiacente collina artificiale. In seguito all'approvazione del primo plastico di studio, realizzato presso l'atelier Warmbronn, Otto preparò un modello a catenaria attraverso il quale definire la geometria della copertura.<sup>103</sup>

La Multisala, adiacente la collina e circondata da un canale artificiale, risultava composta da due grandi cupole di diametro 49 e 61 metri e altezza massima di 20 mt, connesse da un lungo "corridoio" centrale e uno trasversale, coprendo una superficie complessiva di 4700 m<sup>2</sup>. Il plastico in

---

<sup>103</sup> Cfr. Happold Edmund, Liddell Ian, *Timber Lattice roof for the Mannheim Bundersgartenschau*, ed. The Structural Engineers, vol. 53, 1975 e Colabella Sofia, *Gridshell, tecnologia delle forme complesse*, in Perriccioli Massimo (a cura di), *L'officina del pensiero tecnologico*, Alinea, Firenze, 2010.

scala 1:98, realizzato con una rete metallica di fili e anelli connessi da giunti rigidi di 15 mm di lunghezza a rappresentare ciascuno 3 campi della maglia di 50 cm di lato, fu realizzato a mano, in prima istanza, disteso su un piano. *"In esso i punti di collegamento erano mobili e orientabili, così da poter essere articolati come una forbice. Il reticolo fu sollevato nella sua forma (...). Tenendo fermi i punti di congiunzione del reticolo, dopo averne fissato il margine perimetrale e posto rinforzi supplementari composti da una rete metallica a maglie larghe e da una superficie di copertura, si riuscì ad ottenere che gli angoli delle maglie del reticolo non si potessero più modificare e che il reticolo stesso rimanesse fissato nella sua forma definitiva".<sup>104</sup>*



<sup>104</sup> Otto Frei et al., *L'architettura della natura. Forme e costruzioni della natura e della tecnica e processi della loro formazione*, Saggiatore, Milano, 1984. p.47.

*Fig.12 - Modelli per la ricerca della forma funicolare del Mannheim Lattice Shell per la Federal Garden Exhibition.*

Al prof. Klaus Linkwitz<sup>105</sup>, con il supporto dell'Institut für Anwendungender Geodäsie im Bauwesen dell'Università di Stoccarda, fu affidato il compito di esprimere la geometria del modello a rete di cavi utilizzando gli strumenti matematici e fotografici già sperimentati in occasione del progetto del Padiglione tedesco all'Expò di Montreal (1967) e dello stadio Olimpico di Monaco (1972). La restituzione geometrica del plastico era necessaria alla definizione della forma della gridshell da sottoporre a verifica strutturale e a una serie di aggiustamenti sui raggi di curvatura<sup>106</sup>.

Nell'ottobre 1973 fu ottenuta la collaborazione di *Structures 3* della Ove Arup, gruppo di ingegneri specializzati in strutture straordinarie (Edmund "Ted" Happold, Ian Liddel, Michael Dickson e Terry Easley) e, mentre si aspettavano i risultati del lavoro del prof. Linkwitz, si iniziò la sperimentazione di laboratorio sul legno da utilizzare e sull'analisi del modello della *gridshell* a singolo layer realizzata a Essen nel 1962, già disponibile presso lo studio di Otto.

noti come *Structures 3* (Edmund "Ted" Happold, Ian Liddel, Michael Dickson e Terry Easley) e, in attesa dei risultati del lavoro del prof. Linkwitz, si decise di guadagnare tempo concentrandosi sulle proprietà del legno e sull'analisi del modello della *gridshell* a singolo layer realizzata a Essen nel 1962, già disponibile presso lo studio di Otto.

I primi calcoli strutturali mostrarono che, date le dimensioni della copertura, la sezione minima delle assicelle di legno doveva essere pari a 10x10 cm, dimensione che non ne avrebbe consentito la deformazione secondo le curvature di progetto; si ipotizzò dunque di raddoppiare il numero di assicelle, dimezzandone la sezione. A partire da tale operazione ha inizio la

<sup>105</sup> Linkwitz Klaus, ingegnere, ex direttore dell'Istituto per le Applicazioni di Geodesia nel settore delle costruzioni (Iagb), partecipò alla progettazione strutturale dell'Olimpiapark per le Olimpiadi di Monaco del 1972, progettisti Frei Otto, Behnisch & Partner, Leonhardt und Andra.

<sup>106</sup>In questa fase ogni piccola modifica nella lunghezza o nella curvatura delle funi determinava una riconfigurazione delle funi prossime a quella modificata e dei bordi.

sperimentazione della *gridshell* a doppio *layer* la cui maggiore complessità riguarda l'effettiva capacità di ciascun giunto di consentire slittamenti e rotazioni nella fase iniziale di deformazione e la distribuzione del carico a tutti gli strati per effetto dell'attrito (a formatura avvenuta).<sup>107</sup>

Un secondo e definitivo plastico in perspex, in scala 1:60, fu realizzato sulla base dei disegni di Linkwitz e sottoposto alle prove di carico.

Ma la forma funicolare posta alla base della realizzazione di plastici delle strutture leggere di Otto è, come spiegano Liddell e Happold, un punto di riferimento solo iniziale dal quale far partire la ricerca della forma, necessario quando non erano ancora disponibili software interfacciati per la generazione geometrica spaziale. In riferimento al progetto della copertura di grande luce del *Mannheim Lattice Shell*, gli ingegneri spiegano che: «*La forma del guscio è ricavata mediante misurazioni di precisione del modello sospeso ed è funicolare. Se sottoposta al solo peso proprio, non si sviluppano momenti flettenti nella struttura. Questa è una condizione ideale poiché nella realtà i carichi imposti sono superiori al solo peso proprio e non uniformemente distribuiti. La forma funicolare è vantaggiosa ma non essenziale. Quando la griglia viene curvata fino ad assumere la forma del guscio, è bloccata solo dalle sue connessioni ai bordi. La forma funicolare viene modificata dalla flessione delle assicelle e in assenza di carichi applicati sarebbe tale da minimizzare le tensioni.*»<sup>108</sup>

In definitiva, mentre nelle strutture pesanti la flessione generata da eventuali carichi dissimetrici è assorbita dalla massa, la *gridshell* resta stabile nel tempo soltanto se la maglia romboidale (deformabile) viene trasformata in maglia triangolare (indeformabile) attraverso l'inserimento di elementi di

<sup>107</sup> Cfr. Happold Edmund, Liddell Ian, *Timber Lattice roof for the Mannheim Bundersgartenschau*, ed. The Structural Engineers, vol. 53, 1975, pgg. 99-132 e cfr. Colabella Sofia, *Gridshell, tecnologia delle forme complesse*, in Perriccioli Massimo (a cura di), *L'officina del pensiero tecnologico*, Alinea, Firenze, 2010.

<sup>108</sup> Happold Edmund, Liddell Ian, *Timber lattice roof for the Mannheim Bundesgartenschau*, ed. The Structural Engineers, n. 3, vol. 53, 1975, p. 102 (traduzione di S. Colabella) cit. in S. Colabella, *Gridshell, tecnologia delle forme complesse*, in Perriccioli Massimo (a cura di), *L'officina del pensiero tecnologico*, Alinea, Firenze, 2010.

irrigidimento diagonali costituiti da cavi metallici (come nella Multihalle) o da aste in legno (come nel caso del Weald & Downland Open Air Museum).

<sup>109</sup> Tale operazione è consigliabile anche per gridshell progettate a partire da modelli funicolari perché rappresenta l'unico modo per contrastare le sollecitazioni di flessione che in ogni caso insorgerebbero nella struttura a causa della sua ridotta massa.

Al contrario della Multihalle, la forma del Weald & Downland Open Air Museum non è stata sviluppata a partire da un modello a catenaria e, pertanto, le aste che la compongono non sono in regime di pura compressione sotto il peso proprio. In questo caso il processo di ricerca della configurazione tridimensionale è avvenuto attraverso il continuo confronto tra i risultati ottenuti mediante l'applicazione di software di calcolo strutturale e la costruzione di modelli fisici in scala. In particolare, approvato dai clienti il primo plastico di studio in scala 1:100, fu assemblato un secondo plastico in scala 1:30 che oltre a simulare (e quindi verificare step by step) il modo in cui la struttura si sarebbe deformata durante tutte le fasi del processo costruttivo, rappresentava una migliore approssimazione della geometria della forma finale, attraverso cui individuare, da un lato, l'esatta posizione e morfologia dei bordi e dall'altro un più preciso modello vettoriale da manipolare per conseguire il migliore comportamento strutturale attraverso una serie di equazioni non lineari<sup>110</sup>.

---

<sup>109</sup> Cfr. Linkwitz K., *On Some Peculiarities Of Timber Shells Concerning Formfinding, Manufacturing, Building Physics*, Convegno Internazionale *Lightweight Structures in Civil Engineering*, Varsavia, Polonia, 24-28 giugno, 2002.

<sup>110</sup> Cfr. Kelly O.J., Harris R.J.L., Dickson M.G.T., Rowe J.A., *Construction of the Downland Gridshell*, *The Structural Engineer*, Vol. 79, n. 17, 2001, pp. 25-33 e S. Colabella, *Gridshell, tecnologia delle forme complesse*, in Perriccioli Massimo (a cura di), *L'officina del pensiero tecnologico*, Alinea, Firenze, 2010.

### *2.3 Analisi del processo costruttivo*

La gridshell post-configurata è il risultato della traslazione, rotazione e deformazione del graticcio strutturale assemblato in forma piana sul terreno, con le due giaciture ortogonali e i nodi cerniera che configurano un meccanismo con un grado di libertà<sup>111</sup>: nel passare dalla posizione orizzontale a quella tridimensionale, le aste, prima ortogonali, cambiano angolo relativo e cominciano a curvarsi secondo il principio degli stati di coazione, in modo da sfruttare l'energia incorporata nelle aste durante la curvatura. Attraverso una graduale deformazione, consentita dalla grande elasticità del legno e quindi dalla sua disponibilità a essere deformato anche in maniera sensibile senza spezzarsi, le maglie quadrate del graticcio si trasformano in parallelogrammi e si raggiunge la configurazione "spaziale" finale. Al termine del processo deformativo i nodi intermedi vengono serrati, le aste vincolate al suolo e il sistema strutturale risulta costituito da un serie di archi interconnessi che individuano la superficie a doppia curvatura. In questa fase la resistenza, inizialmente proporzionata a quella della singola bacchetta, aumenta molto per il funzionamento sinergico delle due aste, distanziate come le ali di una putrella, e per l'effetto guscio infinitamente rigido nel suo piano e capace di trasformare i carichi in sollecitazioni liminari.

La struttura, nella sua configurazione finale, diventa iperstatica in virtù delle condizioni di vincolo al contorno e degli elementi diagonali di controventamento, inseriti per contrastare le sollecitazioni flessionali causate da eventuali carichi dissimmetrici.

Il graticcio strutturale piano può essere condotto nella sua particolare forma tridimensionale dal basso verso l'alto (la griglia piana è montata a terra e successivamente sollevata fino al raggiungimento della quota progettata) o,

<sup>111</sup> Inizialmente la struttura è labile in virtù del mancato serraggio dei nodi strutturali.

viceversa, dall'alto verso il basso (dalla massima altezza, la griglia viene deformata e abbassata con un complesso sistema di impalcature, grazie anche al peso proprio della struttura, fino a quando le linee di bordo raggiungono le travi di fondazione).

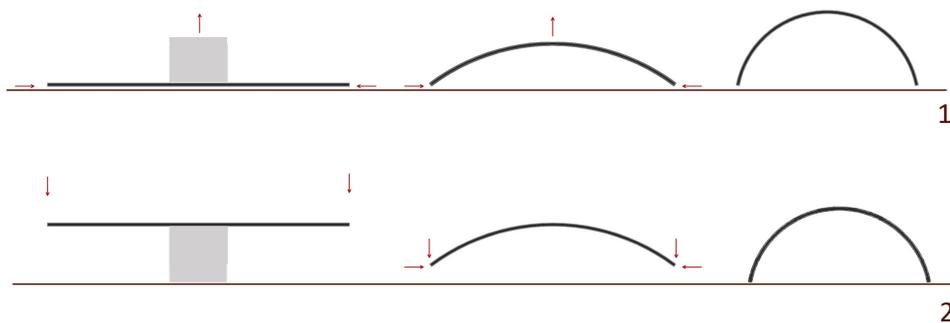


Fig.13 – 1\_Metodo di montaggio dal basso verso l'alto; 2\_Metodo di montaggio dall'alto verso il basso.

Se il comportamento statico-resistente delle gridshell si fonda sull'ibridazione dei metodi per attribuire resistenza per forma alla struttura propri dei gusci in calcestruzzo e delle travature reticolari<sup>112</sup>, il suo particolare processo costruttivo presenta forti analogie con quello di altri sistemi strutturali leggeri. La “messa in forma” delle gridshell post-configurate è realizzata in cantiere attraverso la successione di due fasi: “la prima, la tessitura, consente di creare la lamina attraverso l'assemblaggio degli elementi lineari in una trama e un ordito regolari, la seconda, la manifattura, consente di “cucire” il tessuto secondo la forma desiderata.”

<sup>113</sup> Il processo costruttivo si appropria dei principi sperimentati nel campo della progettazione delle tensostrutture in cui le rotazioni dei due sistemi ortogonali di linee parallele tra loro, consentono al tessuto di assumere giaciture anticlastiche ( superfici a sella, paraboloidi iperboliche, ellissoidi

<sup>112</sup> Per attribuire resistenza per forma alla *gridshell* si colloca il materiale resistente solo nei punti maggiormente sollecitati, lasciando vuoto il resto (reticolo) e si realizza la forma più stabile possibile attraverso superfici a doppia curvatura capaci di coprire spazi di grande dimensione (guscio).

<sup>113</sup> Cfr. Colabella Sofia, *Drappaggio strutturale*, in “Costruire” n.300, maggio, 2008.

etc.), attribuendo alla tensostruttura le sue caratteristiche configurazioni concavo/convesse.

Il passaggio da una configurazione geometrica piana a quella finale a doppia curvatura, attraverso l'immissione di energia, avvicina il processo costruttivo delle gridshell a quello delle strutture gonfiabili in cui, nel caso di utilizzo di tessuti flessibili, “ (...) *la deformazione sotto la sovrappressione interna avviene per mezzo di deformazione e modificazione nell'orientamento della trama dello stesso tessuto.*”<sup>114</sup>

---

<sup>114</sup> Fuzio Giovanni, *Costruzioni pneumatiche*, Dedalo, Bari, 1968, p.13

## 2.4 Casi studio

Frei Otto, Mannheim Lattice Shell per la Federal Garden Exhibition, 1971

*Metodo di montaggio dal basso verso l'alto*

La copertura di grande luce del Mannheim Lattice Shell per la Federal Garden Exhibition (Herzogenriedpark) del 1975, progettato da Frei Otto con il supporto degli architetti Joachim Langner, Winfried Langner e Carlfried Mutschler (Buro Mutschler & Partners) e, per l'ingegnerizzazione, del gruppo di specialisti della Ove Arup noti come *Structures 3*, Edmund "Ted" Happold<sup>115</sup>, Ian Liddel, Michael Dickson e Terry Easley, è composta da due grandi cupole di diametro 49 e 61 metri e altezza massima di 20 mt, connesse da un lungo "corridoio" centrale e uno trasversale, per una superficie totale coperta pari a 4700 m<sup>2</sup>.



Fig.14 - Mannheim Lattice Shell per la Federal Garden Exhibition del 1975.

Un graticcio bidimensionale di partenza composto da un'unica schiera di assicelle in legno con sezione trasversale 50 x 50 mm (pari a quella

<sup>115</sup> Fondatore della Buro Happold nel 1976 insieme a sei colleghi che lavoravano alla Ove Arup.

utilizzata nella precedente esperienza costruttiva condotta a Essen) non avrebbe garantito stabilità a un guscio di tali dimensioni.

Se l'aggiunta di cavi di irrigidimento può incrementare la rigidezza nel piano e prevenire l'eccessiva distorsione della struttura, l'unico modo per aumentare la rigidezza flessionale fuori dal piano è accrescere il momento di inerzia dei singoli elementi strutturali.<sup>116</sup>

Da approfonditi calcoli strutturali emergeva l'esigenza di adottare una sezione 100x100 mm al fine di garantire sufficienti prestazioni statico-resistenti alla struttura, ma aste in legno con tali caratteristiche dimensionali non avrebbero consentito il processo deformativo del graticcio se non sottoponendolo a sforzi eccessivi: l'unica soluzione era raddoppiare i *layer* e realizzare il sottilissimo guscio a partire dall'unione di un doppio strato di assicelle di legno 50x50 mm di sezione, giuntate tramite bullonatura ogni 50 cm, per un totale di circa 34.000 nodi.<sup>117</sup>

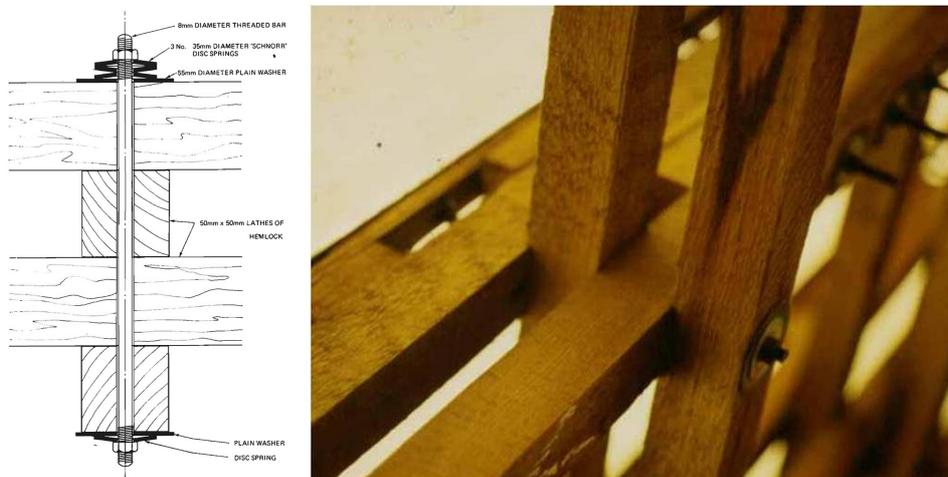


Fig.15 – Giunto di connessione tra le aste lignee.

<sup>116</sup> Cfr. Happold E., Liddell I., Timber Lattice roof for the Mannheim Bundersgartenschau, ed. The Structural Engineers, vol. 53, 1975.

<sup>117</sup> L'adozione di un doppio strato di aste implica alcuni problemi: in fase di "formatura" la traslazione relativa tra le aste è consentita soltanto se quelle poste all'estremità presentano una fenditura; a deformazione ultimata, quando le aste sovrapposte sono bloccate, nonostante il ricorso a un giunto ad attrito è difficile che il momento di inerzia corrisponda realmente a quello ideale (corrispondente a una sezione composta da due masse poste ad una distanza pari a quella tra i due layer).

Ciascuna nervatura era dunque composta da due assicelle che, incrociandosi con l'altra famiglia di elementi, formava un nodo caratterizzato dalla sovrapposizione di quattro aste.

Il legno utilizzato, lo *Tsuga heterophylla* (abete occidentale), caratterizzato da alto fusto (raggiunge un'altezza pari a 60 m) e regolarità delle fibre, fu preventivamente impregnato con una soluzione di acqua e sali di boro per soddisfare le norme antincendio vigenti.

Il peso proprio della struttura, incluse le connessioni, fu calcolato in 20 kN/m<sup>2</sup>, cui andavano aggiunti i carichi imposti durante operazioni di montaggio e manutenzione<sup>118</sup>, il carico critico da vento, calcolato sottoponendo alla galleria del vento un plastico in scala 1:200, e il carico da neve critico, per cui fu individuato un valore medio di 0,75 kN/m<sup>2</sup>.<sup>119</sup>

Le aste lignee furono prodotte presso la fabbrica Poppensieker in dimensioni variabili da 30 a 40 mt, e successivamente connesse mediante giunti in testa a pettine, alcuni dei quali si ruppero durante il processo deformativo a causa dell'errato dimensionamento della scanalatura; ciò rese necessaria la realizzazione di una vera e propria "ingessatura" che rendeva solidali le parti adiacenti dell'asta spezzata interponendole a due aste di legno (50x25 mm di sezione) connesse con due bulloni e rondelle coniche nella direzione opposta a quella ordinaria.

Il graticcio strutturale con le giunzioni non ancora serrate fu condotto alla sua particolare forma tridimensionale dal basso verso l'alto, grazie alla maestria del costruttore W. Poppensieker, della M. Gärtner GmbH e della Wehmeyer GmbH & Co.

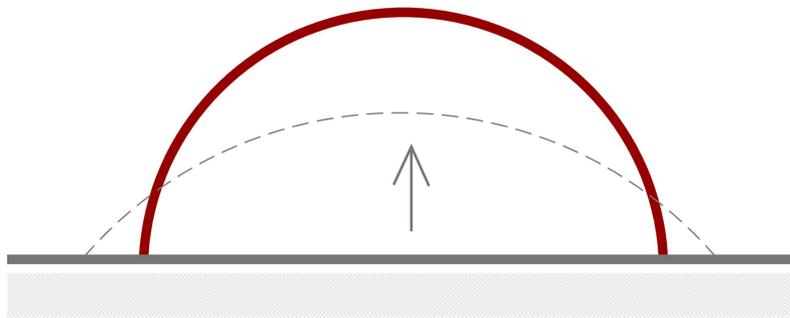
Tale operazione di montaggio poteva essere eseguita sollevando il reticolo da sopra, con una gru collegata a più punti della struttura mediante un

---

<sup>118</sup> Il sovraccarico durante le operazioni di costruzione o manutenzione è stato considerato pari al peso di due uomini (70 kg ciascuno) più quello di un'eventuale macchina di cantiere, per un totale di 200 kg concentrati su una porzione di superficie di 3 m<sup>2</sup>.

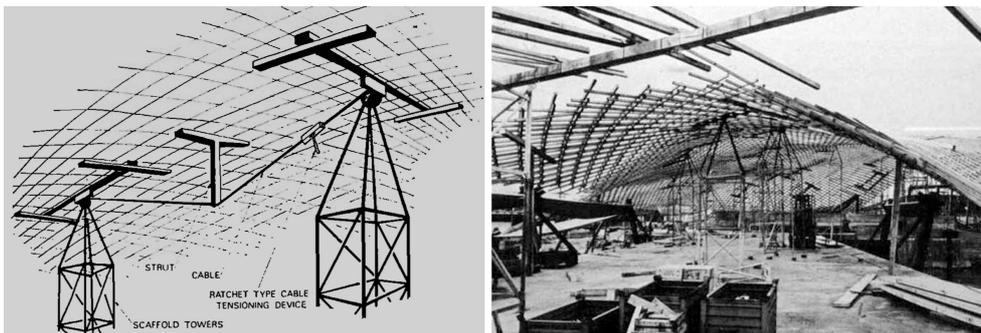
<sup>119</sup> La corretta definizione dei carichi da neve e vento è importante per una struttura leggera perché carichi dissimmetrici possono generare sollecitazioni fino a due o tre volte maggiori rispetto al peso proprio e non è possibile lavorare considerando un surplus di resistenza.

sistema di cime<sup>120</sup>, o spingendolo da sotto con il ricorso a impalcature a torre.



*Fig.16 – Metodo di montaggio verso l'alto.*

Inizialmente ci si orientò sulla prima ipotesi costruttiva che prevedeva, per il sollevamento, l'utilizzo di 4 gru da 200 tonnellate e di un sistema di impalcature che accompagnassero dal basso i movimenti della griglia.<sup>121</sup>



*Fig.17 – Pantografo a forma di H per la distribuzione della spinta verticale.*

<sup>120</sup> Tale sistema di montaggio fu sperimentato per la prima volta per la costruzione del Lattice Dome a Essen.

<sup>121</sup> Indagini condotte su un modello in rete metallica appositamente realizzato mostrarono come la deformazione del graticcio fino al raggiungimento della configurazione finale tridimensionale richiedesse l'utilizzo di 4 gru da 200 tonnellate per tre settimane, cui andavano aggiunti supporti supplementari da fissare lungo i bordi.

I costi troppo elevati dell'operazione spinsero il costruttore a optare per una strategia esecutiva alternativa, fondata sull'utilizzo di impalcature mobili a torre, connesse a un sistema a pantografo a forma di H, in grado di distribuire la spinta verticale (puntuale) in sollecitazioni nel piano della griglia in più giunti contemporaneamente; per garantire ogni tipo di rotazione tra l'impalcatura e il pantografo, il costruttore utilizzò un giunto cerniera sferico, ottenuto modificando opportunamente un comune giunto di connessione dei rimorchi.



*Fig.18 – Vicoli esterni: cordolo continuo in calcestruzzo, pilastri in acciaio e archi fondati al suolo.*

Per contenere i costi di costruzione era necessario aumentare la distanza tra i ponteggi ma ciò richiedeva l'utilizzo di pantografi più grandi; si scelse, pertanto, di lasciare 9 m tra le torri e di costruire pantografi in legno di dimensioni 3.50x2.50 m. Dall'elaborazione di tale proposta da parte degli ingegneri e del costruttore, al montaggio della prima impalcatura a torre, trascorsero ben tre settimane<sup>122</sup>.

Una volta raggiunta la configurazione tridimensionale finale, i nodi intermedi furono serrati e quelli perimetrali fissati alle travi di bordo, costituite da una "tasca" in legno compensato 40x5 cm, sagomata secondo la curvatura della *gridshell* e connessa a diverse tipologie di vincolo esterno (cordolo continuo in calcestruzzo, pilastri in acciaio e archi fondati al suolo).

Per la connessione al cordolo si ipotizzò, inizialmente, l'utilizzo di giunti cerniera in acciaio in grado di accogliere le differenti giaciture con cui la copertura arrivava a terra; ma la complessità di realizzare un adeguato sistema di serraggio che assicurasse la successiva immobilizzazione del giunto fece optare per la realizzazione *ad hoc* di ciascun profilo, con il proprio angolo di rotazione.

---

<sup>122</sup> Cfr. Colabella Sofia, *Gridshell, tecnologia delle forme complesse*, in Perriccioli Massimo (a cura di), *L'officina del pensiero tecnologico*, Alinea, Firenze, 2010 e cfr. Happold Edmund, Liddell Ian, *Timber lattice roof for the Mannheim Bundesgartenschau*, ed. The Structural Engineers, Vol. 53, n. 3, 1975.

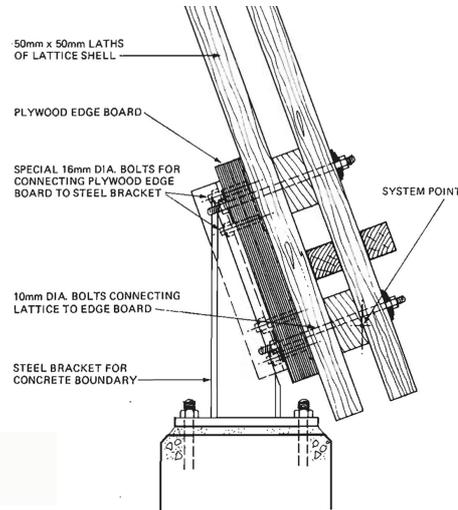


Fig.19 – Dettaglio di connessione al cordolo.

*“Serrati i nodi, l’effetto guscio fu garantito dal trasferimento dei carichi esterni ai nodi per l’attrito indotto dai bulloni, attraverso la sovrapposizione di tre rondelle coniche formanti una sorta di molla capace di dilatarsi al diminuire dell’attrito per mantenere costante la coppia di serraggio anche quando il legno si fosse ritirato”.*<sup>123</sup>



Fig.20 – Sistema di cavi per la solidarizzazione della membrana alla struttura e per l’assorbimento dei carichi dissimmetrici.

<sup>123</sup> Colabella Sofia, *Gridshell, tecnologia delle forme complesse*, in Perriccioli Massimo (a cura di), *L’officina del pensiero tecnologico*, Alinea, Firenze, 2010.

La membrana di copertura, realizzata con un filato in Trevira<sup>124</sup> spalmato di Pvc, è stata solidarizzata alla struttura mediante un sistema di cavi, che hanno anche la funzione di assorbire i carichi dissimmetrici dovuti a vento e neve.

Edward Cullinan, Downland Gridshell per il Weald & Downland Open Air Museum, Sussex, 2002

*Metodo di montaggio dall'alto verso il basso*

Il guscio a graticcio di lunghezza 50 metri, larghezza variabile da 12,5 a 16 m e altezza massima 10 m, fu realizzato a partire da una griglia a doppio strato formata da assicelle di legno di quercia con sezione trasversale 35x50 mm, connesse ogni 40 cm, con in tutto più di 11000 giunti di connessione.

Per la costruzione di questa copertura fu scelta la quercia verde il cui alto contenuto di umidità avrebbe conferito grande flessibilità alle assicelle, favorendone il processo deformativo in entrambi i sensi; una volta raggiunta la configurazione tridimensionale finale, l'essiccamento naturale del materiale avrebbe, invece, reso stabile la struttura.

Aste di lunghezza variabile, prive di punti di discontinuità, furono assemblate da giunti in testa a pettine, per poi essere collegate a gruppi di 6 per formare elementi strutturali di lunghezza pari a 36 m.<sup>125</sup>

Il graticcio, composto da 600 assicelle, per una lunghezza totale di 12 km, fu assemblato mediante giunti costituiti da due piastre d'acciaio galvanizzato serrate con quattro bulloni esterni. Uno spinotto in acciaio collegava le due assicelle interne, appositamente forate, mentre le due esterne erano intere per meglio seguire la curvatura della struttura.<sup>126</sup>

<sup>124</sup> Definizione commerciale del polietilene tereftalato, fa parte della famiglia dei poliesteri.

<sup>125</sup> Il legno è stato selezionato a controllo visivo. Per ridurre al minimo lo spreco di legname, le sezioni difettose sono state rimosse e le assicelle restanti sono state collegate a 40 atmosfere di pressione con giunto a pettine e colla poliuretanic.

<sup>126</sup> Cfr. Colabella Sofia, Tesi di dottorato in Tecnologia dell'architettura dal titolo "Gli usi innovativi del legno di piccole dimensioni in architettura", Università degli Studi di Napoli Federico II, Facoltà di Architettura, 2006.

L'infittimento del reticolo, in corrispondenza delle porzioni in cui erano previste sollecitazioni più forti in fase di esercizio, consentì di aumentare, proporzionalmente al numero di aste, la resistenza della struttura.

L'ipotesi costruttiva di partenza, fondata sull'idea di condurre il graticcio piano nella configurazione tridimensionale mediante il sistema di montaggio dal basso verso l'alto, fu scartata a causa dell'orografia del sito: una collina adiacente all'area di progetto non permetteva al reticolo piano (30x 52 m) di essere disteso sul terreno. Le particolari condizioni al contorno, unite alla volontà di sperimentare un sistema costruttivo le cui operazioni fossero facilitate e non ostacolate dalla forza di gravità, portarono alla definizione di un metodo di montaggio innovativo in cui la griglia, dalla massima altezza, è gradualmente deformata e abbassata mediante un complesso sistema di impalcature, fino a quando le estremità raggiungono le travi di bordo in fondazione. Inizialmente si immaginò di collocare il reticolo su un piano di lavoro posto a 2,5 m rispetto alla quota di terra ma quando si capì, in seguito a numerose riunioni con i *contractors*, che il costo (elevato) dell'operazione non dipendeva in alcun modo dall'altezza fissata, si scelse di portare il reticolo a una quota maggiore, pari all'altezza finale delle due selle costituenti la struttura.

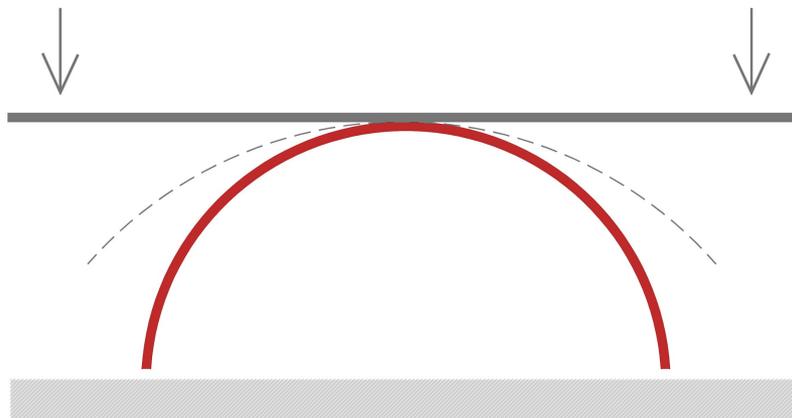


Fig.21 – Metodo di montaggio dall'alto verso il basso.

Assemblato sul deck di lavoro<sup>127</sup>, il reticolo cominciò a essere deformato mediante un innovativo sistema di impalcature modulari speciali della Peri, già sperimentate nel Padiglione Giapponese<sup>128</sup>, con giunti reversibili e calibri regolabili; a ogni fase di deformazione corrispondeva la rimozione di porzioni esterne di ponteggio e la rotazione dei restanti supporti provvisori, in modo da assecondare le graduali trasformazioni del piano tangente la superficie. Fu messa in forma prima la cupola centrale e, una volta fissata alle travi di bordo, furono realizzate le due laterali. Contemporaneamente furono collocati alle due estremità est e ovest della struttura due archi e una trave incrociata in lamellare di larice siberiano.

In seguito al processo di messa in forma, durato circa tre settimane, si provvide all'irrigidimento della struttura mediante la posa in opera di assicelle in legno diagonali, poste rispettivamente in direzione longitudinale nei 2/3 inferiori della struttura e trasversale nella rimanente parte in sommità. Tali elementi attribuirono al graticcio la capacità di resistere alla flessione generata da eventuali carichi dissimmetrici e assunsero la funzione di supporto per il sistema di rivestimento, costituito da sottili scandole in legno.



*Fig.22 – Fasi del processo costruttivo.*

<sup>127</sup> L'esecuzione di migliaia di bullonature in opera richiede ben due settimane per l'assemblaggio del graticcio strutturale a quota 10 m.

<sup>128</sup> Il modello fisico e la gridshell realizzata ad Hannover fornirono tre informazioni importanti riguardo al processo di formazione della struttura: livello su cui realizzare la piattaforma di lavoro, l'esatta sequenza per ottenere la forma a tre cupole intervallate da due superfici a sella e il vantaggio di utilizzare il sofisticato sistema di ponteggio PERI.

## *2.5 Limiti dei metodi costruttivi analizzati e ipotesi di una strategia esecutiva innovativa*

Da quanto detto finora, si può forse sostenere che la mancata diffusione delle gridshell post-configurate in legno è imputabile, oltre che alle difficoltà di rappresentazione e calcolo della sua forma complessa, anche alle complesse operazioni di montaggio; data la rilevanza di questo argomento si è provato a individuare le principali criticità dei metodi costruttivi delle gridshell analizzate in precedenza.

In fase di produzione, la difficoltà di reperire elementi strutturali di lunghezza sufficiente a coprire l'intera luce della griglia piana rende necessario l'assemblaggio di aste contigue attraverso un nodo a pettine che può essere eseguito in officina o direttamente in cantiere. Ciò comporta problemi di trasporto (la lunghezza delle aste richiede l'utilizzo di mezzi di trasporto eccezionali) e di movimentazione in cantiere (gli elementi strutturali non sono maneggevoli e la realizzazione della griglia piana richiede la presenza di molti operai) causando, al contempo, la dilatazione di tempi e costi di costruzione.

L'utilizzo di collanti per l'esecuzione delle giunzioni dà origine a un materiale composito difficilmente smaltibile in caso di demolizione della costruzione e, inoltre, le esperienze compiute a Mannheim e nel Sussex, mostrano come tali punti di discontinuità risultino estremamente delicati durante la "formatura" del graticcio strutturale.<sup>129</sup>

L'assemblaggio del graticcio strutturale piano è avvenuto interamente in cantiere, il che ha determinato tempi lunghi per il montaggio e per la bullonatura delle aste, nonché l'affidamento della precisione del risultato alla buona esecuzione degli operai.

---

<sup>129</sup> I casi studio mostrano come il forte stato tensionale, generato durante la messa in coazione degli elementi strutturali, abbia portato alla rottura di una grande quantità di aste in corrispondenza del giunto a pettine.

Altra rilevante criticità delle strategie di cantiere messe a punto nei casi noti riguarda la difficoltà di sollecitare contemporaneamente tutti i nodi (nel caso di Mannheim i nodi sono 34.000), oppure il rischio di sovraccaricare alcune aree lasciando che quelle vicine siano “trascinate”, come avviene quando il graticcio, in fase di deformazione, è sollevato dall’alto con una gru (come nel caso del *Lattice Dome* a Essen), o è spinto dal basso utilizzando impalcature a torre (come nel caso della copertura del *Mannheim Lattice Shell*).<sup>130</sup> In entrambi i casi la spinta verticale, localizzata in una piccola porzione di superficie, va scomposta in sollecitazioni nel piano della griglia in più giunti contemporaneamente, per evitare che le aste, sottoposte a carichi superiori a quelli per cui sono state progettate, assumano temporaneamente raggi di curvatura eccessivi, determinando fenomeni di rottura; inoltre, poiché le differenti fasi di montaggio implicano la modifica del piano stesso, va anche progettato il modo di far cambiare la direzione delle sollecitazioni.

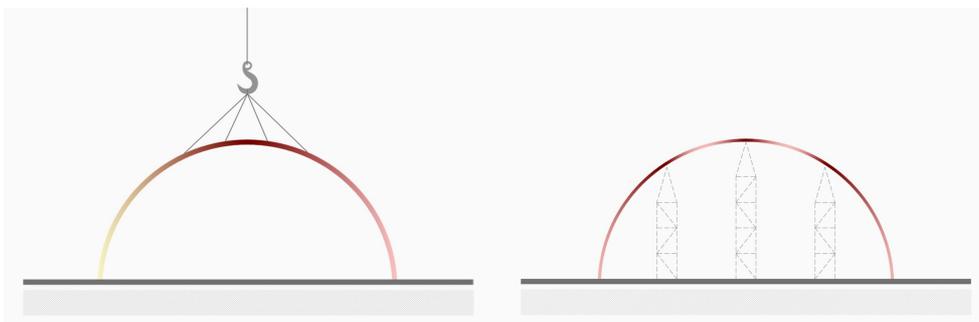


Fig.23 – Concentrazione delle pre-sollecitazioni di montaggio nei metodi costruttivi “up-ward” e “down-ward”.

Durante la costruzione del Lattice Dome a Essen, si cercò di ovviare a tale problema distribuendo la sollecitazione puntuale su una porzione più ampia di superficie mediante un sistema di cime che collegavano la gru a più nodi

<sup>130</sup> Paoli Céline, *Past and future of Grid Shell structure*, Master of Engineering in civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2007.

della struttura; ma ciò non fu sufficiente: per condurre il graticcio bidimensionale nella configurazione finale a doppia curvatura, fu necessario utilizzare numerosi supporti telescopici che spingendo dal basso verso l'alto la struttura, distribuirono gli sforzi ed evitarono che lo stress tensionale gravasse soltanto su alcune aste.

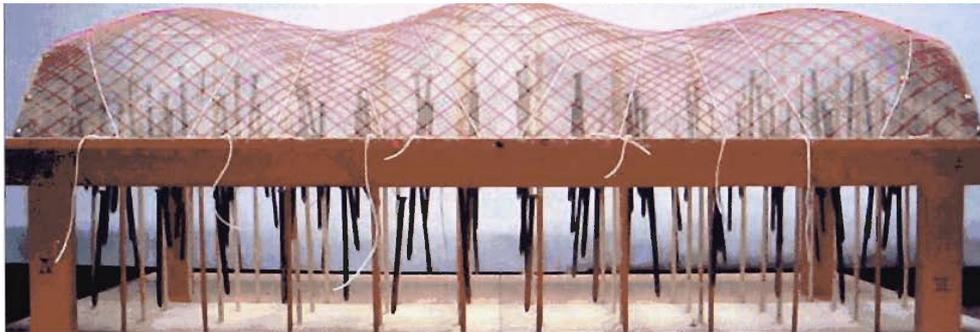
I casi studio analizzati nel precedente paragrafo, ovvero il Mannheim Lattice Shell e il Downland Open Air Museum, si fondano su strategie esecutive più complesse ma, nonostante l'utilizzo di mezzi di cantiere appositamente progettati o costosi, riescono a fornire una soluzione soltanto parziale a tale problema costruttivo.

Nella gridshell tedesca si assiste all'invenzione di un complesso sistema di sollevamento per ridurre l'alto costo delle gru previste in fase di progetto preliminare: castelletti in legno connessi a un sistema di distribuzione dei carichi a forma di H, in grado di ruotare in tutte le direzioni per assecondare il processo deformativo della struttura. Se da un lato la progettazione e la costruzione di strutture provvisorie ad hoc ha determinato *"la vittoria dell'ingegno dei progettisti sulle difficoltà costruttive al di là del ristretto budget economico"*<sup>131</sup>, dall'altro ha generato un notevole dispendio di tempo (ben tre settimane furono necessarie dalla proposta al montaggio della prima impalcatura a torre) e ha attribuito alle operazioni costruttive una forte connotazione artigianale.

---

<sup>131</sup> Colabella Sofia, *Gridshell post-formate in legno*, in Eurau '10, Atti del Convegno.

Nel caso della gridshell inglese, la costruzione fu affidata a un costoso e innovativo sistema di impalcature modulari speciali della Peri con giunti



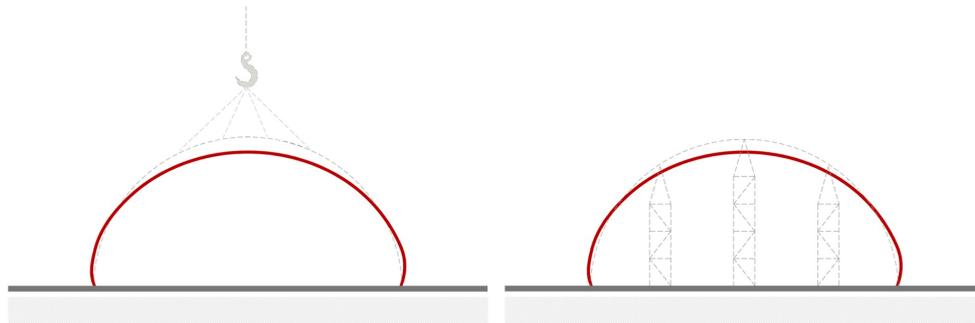
*Fig. 24 – Analisi dei punti d'applicazione delle sollecitazioni di montaggio.*

reversibili e calibri regolabili; ma in questo caso il buon esito dell'operazione costruttiva fu garantito da tecnologie innovative consentite soltanto da un elevatissimo budget economico.<sup>132</sup>

Tali esperienze costruttive mostrano come le strategie esecutive adottate influenzino fortemente la forma finale della struttura: il ricorso a ponteggi fissi o mobili e ad altri tipi di supporti telescopici consentono di portare alcuni punti del graticcio esattamente nella posizione ipotizzata in fase di progetto, ma alla fine del processo le pre-sollecitazioni esercitate da queste strutture provvisorie vanno rimosse, parte dello stato tensionale nelle aste tende a dissiparsi e solo allora la struttura assume la configurazione

<sup>132</sup> Colabella Sofia, *Gridshell post-formate in legno*, in Eurau '10, Atti del Convegno.

definitiva.



*Fig. 25 – Rimossi i supporti provvisori, lo stato tensionale tende a dissiparsi e la struttura assume la forma definitiva.*

La ricerca prende le mosse dalle criticità riscontrate nelle strategie esecutive note per proporre un sistema costruttivo innovativo, sia nelle fasi di produzione che di montaggio.

La volontà di escludere definitivamente i collanti chimici dalla filiera produttiva della gridshell e di contenere i tempi di esecuzione attraverso il trasferimento di parte delle operazioni di produzione dal cantiere all'officina, fa ipotizzare l'applicazione di un sistema per scomporre il graticcio strutturale in moduli prefabbricati da assemblare in cantiere tramite bullonatura.

**Per superare i problemi costruttivi legati alla pre-sollecitazione della struttura in fase di deformazione, si propone una strategia esecutiva basata sulla sollecitazione, in fase di montaggio, esclusivamente dei nodi che in fase di esercizio saranno sottoposti a condizioni particolari di vincolo.**<sup>133</sup>

<sup>133</sup> All'interno della gridshell è possibile individuare nodi "ordinari", in corrispondenza di ciascuna intersezione tra le aste costituenti il graticcio, e nodi "particolari", interessati da condizioni di vincolo esterno (ancoraggio a terra) o dall'inserimento di elementi diagonali di irrigidimento.

Già nel 1970 Conrad Roland affermava: *“oltre ad alzare il centro con una gru o spingerlo dal basso verso l'alto tramite impalcature a torre, possono essere sviluppati metodi di montaggio per cui la griglia non è sollevata dal centro ma è compressa ai bordi per esempio tramite una cima ad anello”*<sup>134</sup>. Ma metodi di montaggio fondati su tale principio non sono mai stati utilizzati per la costruzione di *gridshell* post configurate in legno.

Con l'obiettivo di evitare la concentrazione di sforzi tensionali in alcune porzioni del reticolo, si ipotizza di escludere dal processo costruttivo l'utilizzo di gru o di strutture provvisorie di supporto. Il graticcio è gradualmente condotto nella configurazione finale attraverso l'applicazione, in corrispondenza dei punti d'attacco a terra, di forze esterne direzionate verso il centro della struttura; man mano che tali nodi convergono verso l'interno, la curvatura del guscio a graticcio aumenta e, non appena è raggiunta la forma tridimensionale finale, essi sono ancorati al suolo mediante vincoli esterni in grado di assorbire, in fase di esercizio, le presollecitazioni impresse durante la messa in forma. In questo caso la rimozione delle pre-sollecitazioni non genera un dissipamento dello stato tensionale con conseguente “rilassamento” della struttura e si ipotizza che la forma raggiunta alla fine del processo formativo sia quella definitiva, a meno di lievi modifiche dovute alle proprietà viscoplastiche del materiale. Tali operazioni, inoltre, non implicano l'utilizzo di macchine speciali e possono essere eseguite anche da manodopera scarsamente qualificata.

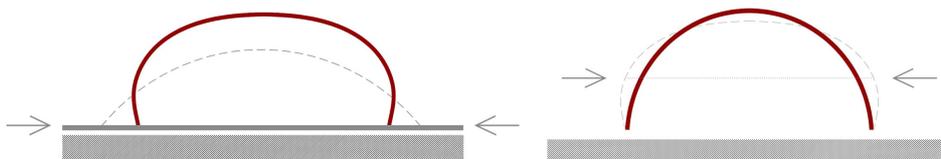
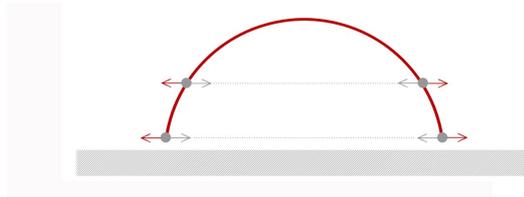


Fig. 26 – Nuova ipotesi costruttiva.

<sup>134</sup> Roland Conrad, *Frei otto: Structures*, Longman, Stuttgart, 1970 (la traduzione è mia)

L'ipotesi costruttiva iniziale si fondava sull'idea di esercitare le forze necessarie alla deformazione soltanto in corrispondenza dei nodi d'attacco a terra ma, alla luce della prima sperimentazione condotta nell'ambito della ricerca di tesi, si è notato come il processo di "messa in forma" possa essere facilitato dall'inserimento di un anello di trazione laddove il progetto prevede la posa in opera di elementi di irrigidimento diagonali: tale cerchiatura fa convergere alcuni nodi del graticcio verso il centro, generando un incremento della curvatura dell'intera struttura.



*Fig. 27 – Le sollecitazioni di montaggio sono assorbite dai vincoli esterni che caratterizzano i nodi caricati.*

Anche in questo caso le pre-sollecitazioni che contribuiscono al raggiungimento della configurazione finale non vengono dissipate in seguito alla rimozione dell'anello di trazione ma assorbite dalle controventature.

### ***Capitolo III***

#### **Sperimentazione di un sistema di copertura prefabbricato, dispiegabile, "automontante"**

##### ***Premessa***

La ricerca si pone l'obiettivo di individuare un metodo di montaggio rapido ed efficiente basato sulla razionalizzazione delle operazioni di cantiere, la riduzione o la totale eliminazione di strutture provvisorie e la scelta di tecniche di assemblaggio più semplici e rapide. La strategia esecutiva messa a punto è verificata attraverso la sperimentazione di un sistema di copertura "gridshell" concepito alla stregua di un oggetto meccanico in cui i singoli elementi, le connessioni e le operazioni necessarie al montaggio sono analizzate nei minimi dettagli e il cantiere diventa risorsa intellettuale di progetto, riferimento costante rispetto al quale decidere strategie ed esiti espressivi. L'utilizzo di elementi strutturali leggeri, maneggevoli e facili da trasportare, la scomposizione della griglia strutturale in macromoduli pre-assemblati e la standardizzazione della componentistica di base, sono finalizzati alla definizione di un sistema costruttivo prefabbricato, dispiegabile e "automontante", ovvero il cui protocollo di montaggio possa essere totalmente a carico di pochi uomini e per il quale non sia richiesta manodopera specializzata e il ricorso a strutture provvisorie di sostegno. Esso non è confrontabile, da un punto di vista dimensionale, ai casi studio analizzati nel precedente capitolo: la scelta di una soluzione formale, costruttiva e strutturale caratterizzata da dimensioni ridotte e dotata della massima regolarità geometrica possibile è giustificata dalla volontà di controllare più agevolmente i risultati della sperimentazione, sia dal punto di vista strutturale che geometrico. Il sistema si pone come valido strumento attraverso cui verificare l'efficacia delle innovazioni che la ricerca intende introdurre nell'ambito del processo costruttivo delle *gridshell* post-

configurate, sia in fase di produzione (attraverso la prefabbricazione del graticcio strutturale bidimensionale) che di montaggio (attraverso la sollecitazione dei soli nodi caratterizzati, in fase di esercizio, da particolari condizioni di vincolo). Obiettivo della ricerca è predisporre un procedimento costruttivo adatto sia a realizzare moduli standardizzati di piccole dimensioni, simili a quello oggetto della sperimentazione, utilizzabili come gazebo, info-point, piccoli padiglioni espositivi, chioschi, ecc..., sia per costruire coperture per edifici di grande luce, progettate ad hoc. Un eventuale passaggio di scala potrebbe richiedere un adeguamento del protocollo di montaggio ma la validità dei principi su cui esso si fonda prescinderebbe dalle dimensioni del manufatto che si va a progettare.

Il processo di ricerca seguito si è fondato su un continuo confronto tra teoria e prassi. In accordo con il principio di circolarità del processo "*conoscenza-azione- conoscenza*" sostenuto da Edoardo Vittoria, si è partiti da un'ipotesi intuitiva, verificata attraverso l'applicazione sperimentale di un primo prototipo, e generatrice, a sua volta, di nuove conoscenze che si sono concretizzate in una nuova esperienza costruttiva.

Questo iter cognitivo potrebbe reiterarsi numerose volte prima di generare una reale innovazione. Come affermava Vittoria, infatti, "*qualsiasi ricerca, in quanto tale, non può e non deve essere mai conclusa perché matura sempre nel dominio dell'incertezza.*" <sup>135</sup>

---

<sup>135</sup> Guazzo Giovanni, *Prefazione*, in Guazzo Giovanni et al., *Eduardo Vittoria*, Gangemi editore, Roma, 1995, p. 12.

### *3.1 Ipotesi di industrializzazione attraverso prefabbricazione, dispiegabilità e "auto montaggio"*

Il paradigma della prefabbricazione assume un ruolo importante nell'ambito del processo costruttivo contemporaneo e risulta strettamente connesso al tema della riduzione dei tempi e dei costi di costruzione. La prolungata indisponibilità delle aree, associata a disagi quali l'inquinamento acustico e la produzione di polveri, nonché il frequente dispendio economico dovuto a eventuali ritardi nella costruzione dell'opera, sono soltanto alcuni dei fastidi causati dall'attività del costruire, per ridurre i quali, il settore edilizio si è orientato verso il ricorso a tecniche di assemblaggio a secco che, cercando di ricondurre il processo costruttivo nel dominio delle azioni esatte, contribuiscono al contenimento dei tempi e dei costi di costruzione.

Nel corso della storia dell'architettura, il problema del "costruire rapido" ha guidato diverse esperienze costruttive, di natura molto diversa.

La semplicità e la rapidità delle azioni costruttive caratterizza fortemente modelli di abitazioni tradizionali di società nomadi che, dovendo far fronte a continue migrazioni, concepiscono costruzioni reversibili, trasportabili e leggere. Le strutture abitative delle popolazioni somale, ad esempio, offrono un'ampia e significativa casistica di tipologie costruttive a secco, facili da costruire e da smontare, che vanno dall'*agal* semisferico in rami e stuoie dei pastori nomadi, ai *mondul*, costruzioni cilindro-coniche in legno e paglia delle popolazioni agricole delle regioni interne. Un esempio più sofisticato è fornito dalla Yurta, la casa trasportabile in legno e stoffa delle tribù nomadi del Medio Oriente e dell'Asia centrale, dall'Iran alla Mongolia. L'ossatura di questa elaborata tenda cilindro-conica è composta da elementi in legno, standardizzati secondo un sistema perfezionato da una tradizione secolare. L'intera struttura è costituita da elementi scomponibili quali i settori di parete a traliccio, le aste curve di sostegno del tetto, la "corona" centrale, il telaio per la porta d'ingresso, i teli di feltro e le stuoie di canapa per il

rivestimento. L'intera Yurta è trasportabile su uno o due cammelli e può essere costruita da poche persone in mezz'ora.<sup>136</sup>

L'estrema rapidità di montaggio, principale punto di forza di tale tipologia costruttiva, è garantita dalla sapiente standardizzazione e prefabbricazione dei singoli elementi e dalla massima semplificazione delle operazioni di assemblaggio delle differenti parti tra loro.

Altrettanto significativa, se pur profondamente diversa, è la vicenda del Crystal Palace, sede londinese dell'esposizione universale del 1851, il cui progetto, a opera di Paxton, prevedeva la realizzazione della gigantesca sala attraverso l'iterazione di pochi elementi strutturali. L'unificazione degli elementi in ferro e vetro, nonché la ripetizione progettata del medesimo atto tecnico, garantirono tempi brevi di fabbricazione fino ad allora impensabili.

Il dibattito sulla problematica del "costruire rapido" diventò dunque argomento principe per i difensori dell'industria. Ne è testimonianza quanto afferma Walter Gropius nel 1955: *"questo metodo di montaggio a secco (...) non solo eliminerebbe l'increscioso distorcersi e piegarsi delle parti costruttive a causa dell'umidità, ma anche la perdita di tempo richiesta dall'essiccamento delle case costruite con metodi tradizionali della muratura, calcina e intonaco. (...) Godremo, come per miracolo, dell'esatto incastro delle varie parti componenti l'edificio, fatte a macchina, a prezzo fisso, e con un montaggio breve, accuratamente prevedibile e garantito"*.<sup>137</sup>

Importante sub paradigma della rapidità nelle costruzioni è la **trasportabilità**, che discende da un lato dalle logiche della prefabbricazione di componenti sempre più complessi e leggeri e, dall'altro, dalla verifica, in sede di progetto, dei limiti dimensionali imposti dai mezzi di trasporto.<sup>138</sup>

<sup>136</sup> Amirante Isabella e La Creta Rosalba, *Cupole per abitare, Quaderni dell'Istituto di Tecnologia dell'Architettura dell'Università degli Studi di Napoli*, Napoli, 1978, pp.33-35, 39-41.

<sup>137</sup> Gropius Walter, *Architettura integrata*, il Saggiatore, Milano, 1963.

<sup>138</sup> Cfr. Pone Sergio, Colabella Sofia, Lavaggi Giampaolo, *Costruire rapido* in "Costruire" n.228, maggio 2002, pg. 96.

Soprattutto nell'ambito delle grandi esposizioni universali, molte ricerche sperimentali si posero come obiettivo la progettazione e la prefabbricazione di strutture di grande luce dispiegabili, in grado di essere trasportate in cantiere sotto forma di volumi compatti, leggeri, di facile movimentazione e poco ingombranti, per poi essere ampliate o dispiegate in fase di esercizio.<sup>139</sup>

Le strutture pneumatiche giocano un ruolo importante nel rapporto leggerezza- trasportabilità- grande dimensione: nonostante riescano a coprire grandi luci sono montate più rapidamente di altre strutture e si compattano durante il trasporto, occupando un volume ridottissimo rispetto a quello che raggiungono una volta dispiegate.<sup>140</sup> Ottimi risultanti, in tal senso, sono raggiunti anche dai reticoli estensibili e pieghevoli, strutture in grado di essere assemblate in forma compatta, trasportate in cantiere, per poi essere montate con un'unica operazione.<sup>141</sup>

*“L'idea di strutture estensibili non è nuova. Il volume 1 del Codex Madrid contiene lo schizzo di un semplice meccanismo piano estensibile elaborato da Leonardo Da Vinci (1452-1519). Noi tutti abbiamo inoltre familiarità con strutture estensibili molto diffuse come le griglie a soffitto usate nelle porte degli ascensori.”*<sup>142</sup> Ma il primo a realizzare una struttura tridimensionale di questo tipo fu l'ingegnere **Emilio Perez Pinero** che, dopo aver brevettato sistemi reticolari spaziali a rete pieghevole<sup>143</sup>, utilizzò

<sup>139</sup> Le strutture dispiegabili sono sistemi in grado di passare, attraverso l'immissione di energia, da una configurazione chiusa ad una predeterminata configurazione aperta. Si possono distinguere in due grandi categorie: *le struts structures*, costituite fondamentalmente da elementi incernierati, e *le surface structures*, che comprendono le strutture telescopiche, gonfiabili, ripiegabili. (Cfr. Antonella Falotico, *Cantiere e costruzione*, Liguori editore, Napoli, 2003).

<sup>140</sup> Sono ridotte al minimo le operazioni di montaggio: il passaggio dalla configurazione chiusa a quella finale aperta avviene mediante la pressurizzazione dell'involucro e l'ancoraggio.

<sup>141</sup> Tali strutture, data la loro estrema reversibilità, possono essere montate e smontate un numero infinito di volte, mostrandosi particolarmente adatte alle condizioni di emergenza.

<sup>142</sup> Chilton Jhon, *Atlante delle Strutture Reticolari*, UTET, Torino, 2000, p.69.

<sup>143</sup> L'unità di base dei reticoli spaziali dispiegabili ideati dall'ingegnere spagnolo risulta composta da due aste collegate insieme a metà lunghezza in modo da formare un meccanismo "a forbice". Le estremità di diversi meccanismi possono essere collegate in modo da ottenere una configurazione a reticolo. Una serie di queste unità assemblate può essere collegata con un simile meccanismo a forbice che lavora in verticale, a formare un reticolo tridimensionale estensibile. Per limitare l'estensione delle unità piane si inseriscono tra le estremità adiacenti delle aste, opportuni elementi di vincolo (tiranti flessibili o pieghevoli). Raggiunta la configurazione aperta, il movimento è bloccato

reticoli piani o a cupola, a semplice o a doppio strato, per la costruzione di teatri itineranti, padiglioni e allestimenti espositivi.<sup>144</sup>

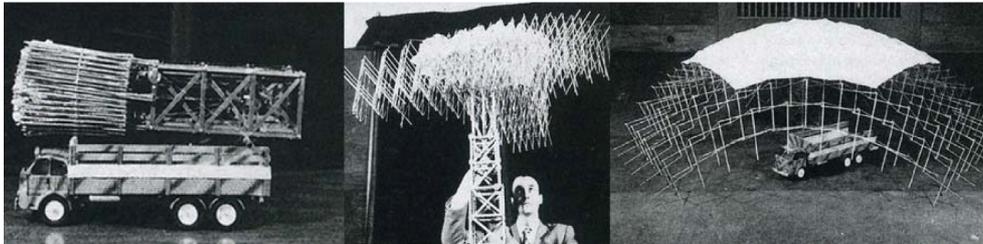


Fig.28 sistemi reticolari spaziali a rete pieghevole progettati da Emilio Pérez Pinero.

In seguito alla sua morte prematura (nato nel 1936, Emilio Pérez Pinero muore tragicamente in un incidente automobilistico nel 1972), le sue idee furono ulteriormente sviluppate da Ziegler, Calatrava, Valcarcel, Esgrid e Hernandez e altri ancora. In particolare, le sperimentazioni condotte dagli architetti F. Esgrid e J.Sanchez, in collaborazione con alcuni colleghi della scuola di architettura di Siviglia, hanno portato alla definizione di sistemi reticolari pieghevoli, utilizzati per la costruzione di numerose opere, tra cui la copertura della piscina olimpionica di San Pablo, nella stessa città.<sup>145</sup>

---

attraverso l'utilizzo di barre rigide al posto dei tiranti flessibili. (Cfr. Chilton Jhon, *Atlante delle Strutture Reticolari*, UTET, Torino, 2000, pp. 69-70).

<sup>144</sup> Emilio Pérez Pinero, come sostiene Emilio Pérez Belda, "consacrerà tutta la sua attività professionale a sistemi strutturali facili da montare, da erigere e trasportare: essenzialmente strutture rigide, piegabili e smontabili. Si applica nel 1964 alla realizzazione della sua prima opera importante. Si tratta di un padiglione per esposizioni trasportabile, costituito da una struttura piegabile in alluminio di 8000 mq in cui progetto e montaggio durarono in tutto tre mesi. Approfondisce poi le sue ricerche, costruendo modelli a scala ridotta. Comincia a interessarsi alle cupole geodetiche, per le quali concepisce un metodo molto semplificato di montaggio e smontaggio utilizzando elementi prefabbricati composti di 12 barre, evitando così il successivo montaggio barra per barra (...). Costruisce un teatro mobile per 2400 spettatori, poi una cupola reticolare smontabile dotata di sala di proiezione per 1500 spettatori. Il montaggio, come lo smontaggio, di queste cupole è realizzabile in tre o quattro giorni". (cit. in Sergio Pone, Sofia Colabella, Giampaolo Lavaggi, "Costruire rapido", *Costruire* n.228, pp.97-98, Emilio Pérez Belda, "L'art de l'ingénieur", Editions du Centre Pompidou, Parigi, 1997).

<sup>145</sup> Il sistema strutturale costituisce una copertura leggera e smontabile per la piscina. Il reticolo, spedito in cantiere sotto forma di uno stretto fascio di aste tubolari collegate tra loro, venne collocato sul fondo della piscina ancora vuota e parzialmente dispiegato per consentire di attaccare la membrana ai nodi inferiori. La struttura completa fu poi sollevata da una gru collegata a un solo punto centrale del reticolo e distesa sulla piscina vuota. (cfr. Chilton Jhon, *Atlante delle Strutture Reticolari*, UTET, Torino, 2000).

Tra i più significativi esempi di strutture dispiegabili c'è il padiglione del Venezuela per l'expò di Siviglia il cui progetto fu concepito, a partire dalle strategie esecutive, da Henrique e Carlos H. Hernandez, con la collaborazione di Waclaw Zalewsky, del Massachusetts Institute of Technology. Il carattere provvisorio dell'edificio che, dopo l'esposizione doveva essere riportato in Venezuela, unito agli alti costi di costruzione vigenti in Spagna, spinsero all'adozione di un reticolo spaziale estendibile che, realizzato in Venezuela, poteva essere piegato per assumere, durante il trasporto, un volume pari a 1/7 della struttura finale. Il padiglione - un grande piano inclinato chiuso su due lati e libero da sostegni intermedi, contenente una sala audiovisiva e uno spazio espositivo- è realizzato con travi reticolari, costituite da tubolari in alluminio, connesse da cerniere cilindriche che consentono alla struttura di dispiegarsi in una sola direzione, per poi essere bloccata in posizione.<sup>146</sup>



*Fig.29- Padiglione del Venezuela per l'expò di Siviglia.*

Illustrissimo interprete delle strutture pieghevoli ed espandibili, è R. B. Fuller, la cui ricerca appare profondamente ricca e differenziata e i molteplici fulcri di interesse, sviluppati in oltre 60 anni di attività, evidenziano una comune tensione a limitare il peso e a rendere, quindi, "portatile" ogni genere di costruzione. In particolare, nell'ambito delle strutture geodetiche, la sua ricerca ha definito soluzioni progressivamente più leggere e in grado di semplificare le operazioni di assemblaggio e di trasporto, fino a sperimentare la fattibilità di strutture pieghevoli. Nel 1947,

<sup>146</sup> Il montaggio si articola in due fasi: durante la prima la struttura viene dispiegata, cioè assume la forma definitiva; durante la seconda ruota intorno al suo segmento di base e assume la posizione finale di progetto. Il nodo è una vera cerniera cilindrica dotata di un fondo corsa che garantisce il successivo bloccaggio del movimento.

egli progetta particolari strutture geodetiche, successivamente denominate *Instant dome*<sup>147</sup>, che dovevano essere facilmente e rapidamente montate e smontate; essere abbastanza leggere da poter essere sollevate, già assemblate, da un aereo o un elicottero; oppure essere piegate in modo da occupare poco spazio durante il trasporto, per poi, come un fiore, schiudersi fino ad assumere la configurazione di esercizio.<sup>148</sup>

Una recente innovazione nel campo delle strutture dispiegabili ed espandibili è rappresentata dal sistema *Panta dome* sviluppato dall'ingegnere giapponese Mamoru Kawagushi, fondato sull'ipotesi intuitiva che qualsiasi struttura che possiede quattro o più giunti a cerniera è un meccanismo e, in quanto tale, può essere manovrato liberamente.<sup>149</sup>

Tale principio è approfondito anche da R. Tarczewski che sfrutta la messa in tensione, tradizionalmente utilizzata per incrementare la capacità portante di strutture in acciaio o in calcestruzzo, per realizzare un sistema strutturale automontante, in cui "formatura" e costruzione si integrano e gli elementi utilizzati per introdurre le sollecitazioni di tensione diventano permanenti nella struttura.<sup>150</sup>

<sup>147</sup> La Necklace Dome, prima *Instant dome* progettata insieme agli studenti del Black Mountain College tra il 47 e il 50, fu seguita, nel 1953, da una seconda, la Flyng Seedpod, aviotrasportabile, realizzata insieme agli studenti della Washington University di S. Louis. Costituita da un fascio di aste allineate, in posizione chiusa, la struttura, in seguito ad una trazione sollecitata in ogni spezzone di corda posto nelle articolazioni tra aste prende forma, raggiungendo in meno di un minuto il diametro finale di 12,8 m. (Cfr. Zanelli Alessandra, *Trasportabile/trasformabile. Idee e tecniche per architetture in movimento*, Clup, Milano 2003).

<sup>148</sup> Cfr. Zanelli Alessandra, *Trasportabile/trasformabile. Idee e tecniche per architetture in movimento*, Clup, Milano 2003, pp.60-65.

<sup>149</sup> E' ben nota la flessibilità dei meccanismi a cerniera o pantografi usati per mantenere il contatto elettrico tra i motori elettrici delle locomotive ferroviarie e i cavi aerei che forniscono energia di trazione. Tale principio è utilizzato dall'ingegnere al fine di ottenere un montaggio efficiente e rapido di strutture dalla forma curva: egli suddivide sezioni trasversali di una costruzione con l'uso di reticoli spaziali che costituiscono settori indipendenti, collegati tra loro e con i supporti attraverso giunti a cerniera. Con una scelta appropriata della posizione delle cerniere, diventa possibile ripiegare la sezione trasversale in modo che, nella posizione chiusa, la maggior parte del contorno della copertura rimanga vicina al suolo. In seguito, il reticolo spaziale può essere dispiegato secondo il profilo desiderato e bloccato in posizione, cessando di essere un meccanismo. (cfr. Chilton Jhon, *Atlante delle Strutture Reticolari*, UTET, Torino, 2000, pp.76-77).

<sup>150</sup> Il sistema costruttivo, definito dallo stesso R.Tarczewski "self erecting" (automontante), è composto da un elemento superiore continuo, dotato di una propria rigidità flessionale e da un cavo inferiore flessibile, cioè in grado di reagire soltanto a tensione. Essi sono connessi tra loro mediante elementi diagonali collegati alla parte superiore attraverso giunti cerniera e a quella inferiore

È proprio in questo filone di ricerca che si inserisce la tesi. I requisiti progettuali del sistema di copertura proposto riguardano la leggerezza degli elementi strutturali, la rapidità di montaggio, la facilità di trasporto e il massimo contenimento dei costi di costruzione.

Un'ipotesi di prefabbricazione della griglia strutturale attraverso la sua scomposizione in macromoduli dispiegabili, realizzati in officina, associata alla messa a punto di un protocollo di montaggio più rapido ed efficiente, lascia prefigurare una possibile industrializzazione di tale sistema strutturale. La standardizzazione e la prefabbricazione degli elementi strutturali con la conseguente traslazione del massimo delle operazioni dal cantiere all'officina, unita alla razionalizzazione e all'ottimizzazione delle pratiche operative in cantiere, potrebbe generare un sensibile abbattimento dei tempi e costi di montaggio della struttura, favorendone la diffusione. Ciò rappresenterebbe un importantissimo passo in avanti nel lungo percorso che, dalle prime sperimentazioni di Frei Otto, condurrà finalmente il sistema costruttivo *gridshell* ad essere accettato dalla collettività per diventare pratica costruttiva condivisa, ovvero innovazione tecnologica.

---

attraverso nodi passanti che consentono la rotazione dei diagonali e lo scorrimento del cavo. La struttura, inizialmente poggiante su due supporti (di cui uno mobile) è messa in forma attraverso il semplice tensionamento del cavo. La curvatura raggiunta dipende dalle condizioni di partenza. (Cfr. R.Tarczewski, *Compensative structure*, negli atti del convegno *Lightweight structures in civil engineering, proceedings of the international symposium*, Varsavia, 24-28 giugno, 2002).

## 3.2 *Prima sperimentazione: progetto e costruzione di un sistema di copertura prefabbricato e dispiegabile*

### 3.2.1 *Finding form*

Poiché la gridshell costituisce un guscio discretizzato, il primo problema riguarda l'esatta determinazione della sua forma, necessaria affinché essa lavori in regime di pura compressione, per evitare sforzi flessionali. Questo assunto di partenza ha portato i primi sperimentatori di questa tipologia strutturale a cominciare dallo studio delle forme funicolari, che resta però solo un punto di riferimento iniziale dal quale far partire la ricerca della forma. Le strutture leggere, infatti, per loro stessa natura, sono particolarmente sensibili ai carichi dissimmetrici di neve e vento; se fosse sottoposta al solo peso proprio, nella *gridshell* non si svilupperebbero momenti flettenti, ma questa è una condizione ideale poiché nella realtà i carichi imposti sono superiori al solo peso proprio e non uniformemente distribuiti. In definitiva la forma funicolare è vantaggiosa ma non essenziale.

Tali premesse giustificano la scelta di intraprendere un processo di ricerca della forma basato sulla realizzazione di modelli in scala non funicolari.

La definizione della forma architettonica del sistema di copertura oggetto della sperimentazione è avvenuta attraverso la successione di azioni, configuranti una metodologia operativa che possiamo definire *metodo empirico* di ricerca della forma.

Il primo passo è consistito nella definizione delle condizioni al contorno. Trattandosi di un prototipo, il modulo di *gridshell* presenta una sorta di autonomia formale, tipica degli oggetti di design e, pertanto, le sue caratteristiche morfologiche non sono dettate da un eventuale contesto in cui si inserisce, ma da esigenze di tipo geometrico e tecnologico.

La definizione di quantità di superficie da coprire, l'individuazione dei punti di appoggio al suolo e della posizione degli ingressi, associate ad alcune scelte di natura geometrica (presenza di quattro assi di simmetria e ampiezza della maglia strutturale), hanno generato una prima ipotesi morfologica del sistema di copertura, immediatamente verificata attraverso un plastico di studio in rete metallica. Quest'ultima è stata sagomata in modo da ottenere una superficie piana con la forma di un quadrato con gli angoli tagliati a 45°. La figura geometrica conseguita costituisce un ottagono irregolare con quattro lati maggiori disposti parallelamente agli assi e quattro lati minori disposti a 45°. Tale rete è stata successivamente deformata per simulare il processo costruttivo della struttura, ovvero il passaggio dalla configurazione piana a quella tridimensionale. In questa fase, i lati minori hanno rappresentato le parti della struttura ancorate al suolo mentre i lati maggiori hanno generato i quattro archi di ingresso all'area coperta. La semplicità di deformazione della rete metallica ha consentito la realizzazione di numerosi plastici di studio finalizzati soprattutto al controllo delle altezze in chiave degli archi d'ingresso e in chiave di volta, relative alla configurazione finale a doppia curvatura.

Una volta ottenuta una forma soddisfacente, con altezze pari a 2,30 m in chiave degli archi d'ingresso e 3,5 m nel punto più alto della volta, è stato disassemblato il plastico "stirando" la rete per dedurre la forma piana corrispondente. Seguendo il perimetro di questa sagoma è stato costruito un secondo plastico realizzato con bacchette di legno incrociate, molto più simile alla struttura reale.

Realizzato il modello ligneo in scala 1:20 della griglia piana, si è provveduto alla messa in forma della stessa fino al raggiungimento della configurazione tridimensionale prevista.

Data la difficoltà di controllare e rappresentare la superficie a doppia curvatura ottenuta, non riconducibile a matrici geometriche semplici e/o

note, si è effettuato un rilievo del plastico e sono state riportate le dimensioni su modello virtuale.

La superficie della *shell* è stata ricreata nello spazio virtuale 3d mediante un opportuno *software* di modellazione a partire dal rilievo del plastico ligneo, di cui vengono individuate le coordinate dei nodi del graticcio dopo la "messa in forma". La modellazione in ambiente virtuale si propone come strumento di verifica spaziale e di analisi morfologica della conformazione ottenuta piegando il graticcio, ma anche come efficace e flessibile tecnica di rappresentazione della complessità geometrica della superficie, dalla quale è possibile dedurre i più tradizionali grafici bidimensionali per il successivo progetto esecutivo. Lungo la superficie del modello virtuale è così possibile tracciare le curve nelle quali si sono deformate le aste del traliccio mediante *linee gobbe* che collegano i punti-nodo inizialmente rilevati dal plastico ligneo.

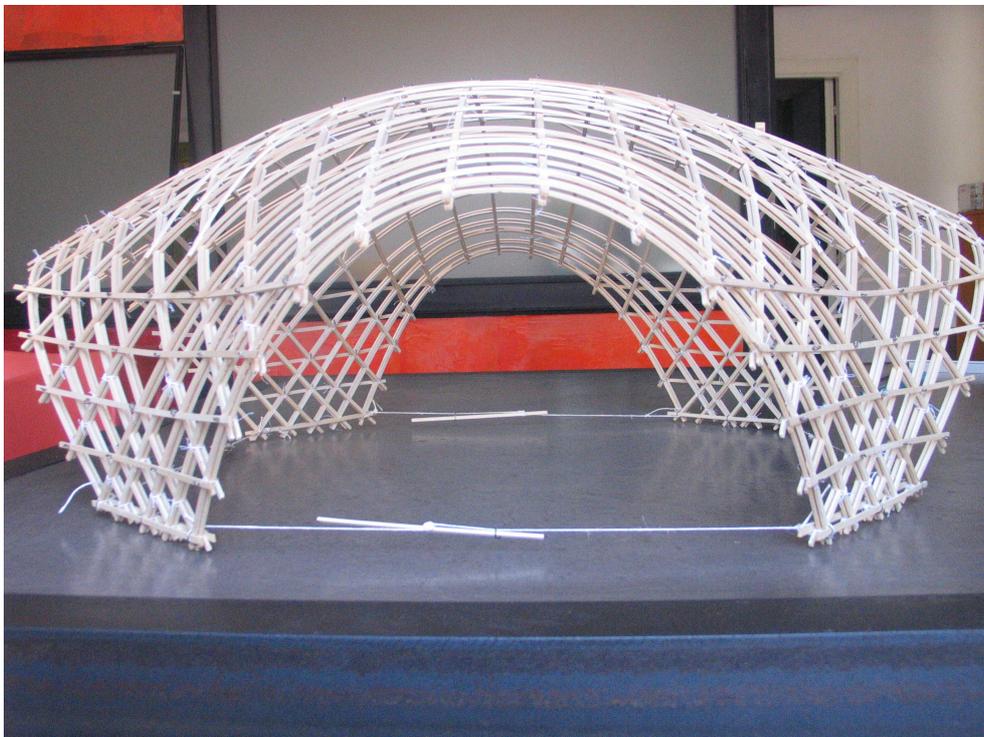


Fig. 30 – *Plastico di studio.*

### 3.2.2 Progetto

#### *Ipotesi di progetto*

Come già accennato nel precedente paragrafo, l'ipotesi progettuale parte da un graticcio piano con la forma di un quadrato con gli angoli tagliati a 45°, ovvero da un ottagono irregolare con quattro lati maggiori disposti parallelamente agli assi e quattro lati minori disposti a 45°. Il graticcio è costituito dall'incrocio di due fasci ortogonali composti ciascuno da 18 aste parallele tra loro, poste a una distanza di 50 cm l'una dall'altra e con sezione pari a 15 x 45 mm. Ogni fascio di aste risulta formato da due *layer* e ciascuna nervatura è dunque composta da due assicelle che, incrociandosi con l'altra famiglia di elementi, danno origine a un nodo caratterizzato dalla sovrapposizione di quattro aste. Così conformato, il graticcio, occupante una superficie di circa 9 x 9 m, viene sottoposto a una lenta deformazione applicando ai quattro lati minori sollecitazioni tali da avvicinare parallelamente i segmenti opposti. La struttura comincia a "montare" e progressivamente raggiunge la sua forma finale quando i quattro lati minori distano tra loro di 7 m. In questa configurazione i quattro arconi gobbi di ingresso presentano un'altezza in chiave di 2,30 m e la volta arriva nel punto più alto a 3,5 m. A graticcio montato e "formato" si procede al serraggio dei nodi e alla posa in opera delle diagonali che irrigidiscono un certo numero di maglie quadrilatera in modo da renderle triangolari e quindi indeformabili.

I vincoli nodali devono essere tali da consentire che il sistema strutturale, inizialmente molto deformabile, diventi, in un secondo momento, più rigido possibile. Prima di essere serrati, i nodi costituiscono delle cerniere cilindriche perpendicolari al piano tangente alla superficie in quel punto; esse consentono la rotazione delle aste nel piano stesso e la "rombizzazione" della maglia strutturale. Una volta serrati i nodi, il loro comportamento è simile a un incastro e il carico è trasferito per l'attrito indotto dai bulloni.

La volontà di ridurre al minimo i tempi di costruzione attraverso l'ottimizzazione delle operazioni di cantiere e il ricorso a tecniche di assemblaggio più semplici, ha spinto la ricerca a optare per una soluzione costruttiva fondata sulla serialità dei giunti e sulla standardizzazione della componentistica di base. Si considera, così, un giunto a cerniera composto da bullone passante, doppia rondella, per la distribuzione degli sforzi trasmessi dalla coppia di serraggio alla struttura, e dado. L'ovalizzazione rispettivamente dei fori sulle aste superiori e inferiori, consente lo scorrimento delle stesse in fase di deformazione.

Il basso grado di complessità delle operazioni di messa in opera di tale sistema di connessione, già utilizzato da Frei Otto per la costruzione del Mannheim Lattice Shell per la Federal Garden Exhibition, rende possibile la produzione della griglia strutturale anche da parte di manodopera scarsamente qualificata. La bullonatura, inoltre, può essere eseguita manualmente, attraverso l'utilizzo di chiavi svita bulloni, o con il ricorso a un avvitatore elettrico. In ogni caso, i decibel prodotti durante l'assemblaggio del sistema di copertura risultano irrisori, come anche la quantità di materiale inquinante prodotto.

Il sistema di connessione, così concepito, consente l'integrazione di elementi diagonali di irrigidimento costituiti da cavi in acciaio disposti in modo da formare due cerchiature parallele, poste al di sopra degli archi di

ingresso, e da controventare tutti i moduli strutturali adiacenti al bordo degli archi.<sup>151</sup>

### *Produzione fuori opera*

La volontà di orientare il processo produttivo del modulo di *gridshell* verso una progressiva industrializzazione ha spinto la ricerca a utilizzare un sistema, oggetto di una domanda di brevetto (*Elemento strutturale per una costruzione gridshell, costruzione gridshell includente detto elemento e procedimento per realizzare tale costruzione impiegando detto elemento*, n. RM2009A000227) che rende possibile la prefabbricazione della griglia strutturale di partenza.



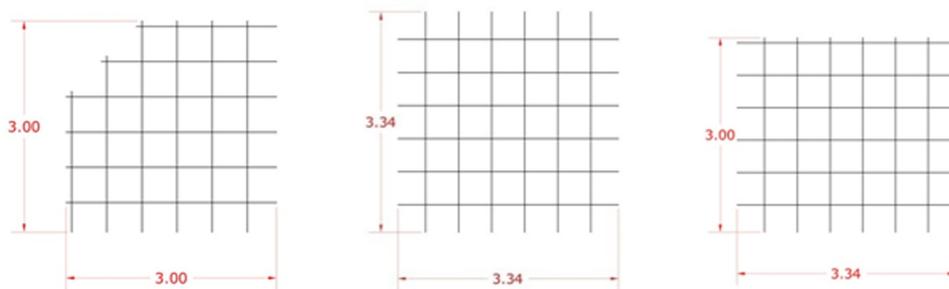
*Fig. 31- Macromoduli dispiegabili.*

Il graticcio di base risulta, infatti, dall'unione di nove moduli che si assemblano attraverso la sovrapposizione delle aste per un tratto di circa 40 cm. I quattro moduli angolari presentano la sporgenza per la sovrapposizione su due lati appartenenti all'angolo opposto a quello tagliato, i quattro laterali hanno la sporgenza su tre lati e risultano tagliati a

<sup>151</sup>La posizione dei diagonal scaturisce da calcoli strutturali condotti con il supporto del Dipartimento di Costruzioni e Metodi matematici in Architettura dell'Università di Napoli Federico II. Il modello virtuale, costruito in seguito al rilievo del plastico in scala, è importato nel programma SAP ed è assunto come modello di partenza per il calcolo strutturale del modulo di *gridshell* oggetto di studio. In particolare, data la geometria della struttura, caratterizzata dalla presenza di quattro assi di simmetria, si semplifica il calcolo, prendendo in considerazione una porzione di superficie pari ad un quarto dell'intera struttura. Si procede poi alla verifica della risposta della struttura in termini di spostamenti per azioni generate dal peso proprio, prendendo in considerazione il nodo maggiormente soggetto ad abbassamento verticale. La verifica è effettuata nei seguenti casi: 1) assenza di sistema di irrigidimento diagonale: il nodo considerato presenta un abbassamento verticale pari a 106,5 mm (tale valore è considerato inaccettabile, soprattutto in relazione alle dimensioni esigue della struttura); 2) elementi diagonali posti orizzontalmente nella parte bassa della struttura e verticalmente in prossimità dei moduli in sommità: l'abbassamento risulta pari a 6,7 mm (il valore non è sufficientemente basso, soprattutto in relazione alla grande quantità di diagonali inserite); 3) si considera un'unica cerchiatura posta all'altezza in chiave degli archi d'ingresso: il valore è di 3,5 mm; 4) si considerano 2 cerchiature e l'inserimento di diagonali in tutti i moduli adiacenti al bordo degli archi: l'abbassamento verticale è pari a 1,7 mm (tale valore è considerato accettabile).

filo dei giunti sul quarto di bordo, mentre l'unico modulo centrale presenta la sporgenza su tutti i quattro lati.

I moduli così conformati sono preassemblati e pretrattati in officina. Le giunzioni bullonate non sono serrate e quindi funzionano da cerniere cilindriche in modo da consentire, in questa fase, la rotazione relativa tra le aste di legno. Questa possibilità consente di ripiegare i moduli preassemblati e di renderli più compatti e meno ingombranti per la fase di trasporto e movimentazione sul cantiere, per poi essere dispiegati nella loro forma finale al momento del montaggio.



*Fig.32- Macromodulo angolare, centrale e laterale.*

La scomposizione della griglia strutturale in macromoduli prefabbricati consente il trasferimento dal cantiere all'officina della maggior parte delle operazioni di produzione che, nei casi noti, erano eseguite in opera causando una rilevante dilatazione dei tempi di costruzione. Ciò riduce sensibilmente i tempi di messa in opera della struttura garantendo, al contempo, una maggiore precisione nella fase di produzione: la standardizzazione degli elementi strutturali e il preassemblaggio in officina, infatti, assicurano un maggiore controllo dei risultati rispetto alle lavorazioni artigianali eseguite direttamente in cantiere.

Nei casi studio precedentemente analizzati, inoltre, la difficoltà di reperire elementi strutturali di lunghezza sufficiente a coprire l'intera luce della griglia piana rendeva necessario l'assemblaggio di aste contigue attraverso un nodo a pettine, eseguito in officina o direttamente in cantiere. Ciò ha

comportato problemi di trasporto e movimentazione a cui si aggiungeva il fatto che l'utilizzo di collanti per l'assemblaggio delle aste dava origine a un materiale composito difficilmente smaltibile in caso di demolizione della costruzione. Il sistema utilizzato, invece, consente la totale esclusione dei collanti chimici dalla filiera produttiva della *gridshell* e, in caso di demolizione della copertura o di rimozione di alcune delle sue parti, è consentita la recuperabilità del materiale. Anche se non è possibile prevedere il reimpiego delle aste in legno (ovvero un nuovo impiego analogo a quello della prima utilizzazione) perché gli elementi strutturali, fortemente deformati in fase di montaggio, non presentano più le caratteristiche necessarie per essere riutilizzati nella costruzione di una struttura analoga, il materiale può essere utilizzato per altri scopi; riguardo alle giunzioni in acciaio, la componentistica utilizzata potrebbe teoricamente essere reimpiegata o, nel caso in cui le forti tensioni avessero generato fenomeni di plasticizzazione dei bulloni, il materiale potrebbe essere utilizzato come rottame ferroso e reintrodotta nel ciclo di produzione da cui è stato generato.

La scomposizione del graticcio strutturale in macromoduli prefabbricati garantisce, infine, la sostituibilità degli elementi strutturali, requisito che acquista un peso ancora maggiore nel campo delle strutture lignee dove la scarsa durabilità del materiale impone più frequenti operazioni di manutenzione.<sup>152</sup>

---

<sup>152</sup> A proposito delle strutture in legno Franco Laner afferma: "(...) *Calcolare sappiamo calcolare, dal fuoco ci sappiamo difendere però dobbiamo pensare al tempo. (...) dobbiamo imparare a prolungarne la vita. Lo abbiamo fatto per tutti gli altri materiali, è un fatto progettuale (...)*". Egli ricorda come un capitolo della legge Merloni specifici che nell'ambito del progetto esecutivo bisogna prevedere la manutenzione: "*Se per la costruzione in legno di un ponte si prevedono opere di manutenzione a largo spettro nel tempo, il progetto cambia. Bisogna pensare a un sistema di sostituibilità. Dato che, nonostante i cicli protettivi, le parti che vanno fuori servizio sono generalmente quelle a contatto con l'acqua, bisogna fare in modo che quando marciscono siano smontabili e sostituibili con facilità. Operazioni relativamente semplici e poco onerose che la tecnologia del materiale consente di realizzare a secco, ma che vanno progettate a monte attraverso una pratica corretta del particolare costruttivo*". (Costruire, n. 257, Ottobre 2004, p. 177).

### *Produzione in opera della griglia strutturale*

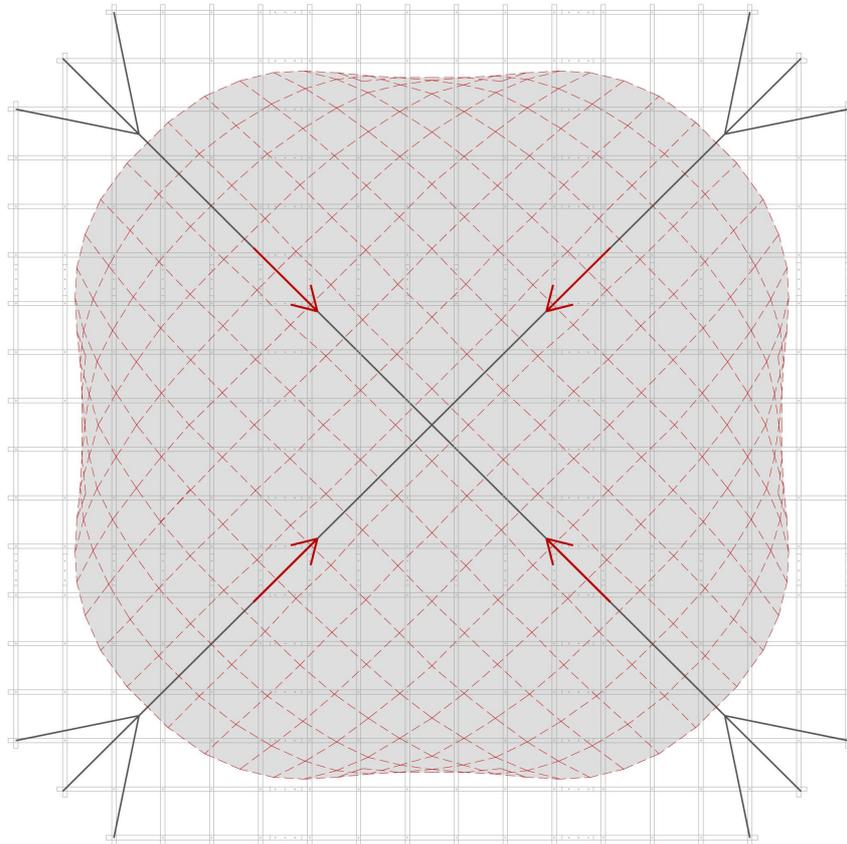
L'adozione del sistema di scomposizione del graticcio strutturale consente di ridurre al minimo le operazioni di assemblaggio da eseguire in cantiere: i nove macromoduli costituenti la griglia strutturale, prefabbricati e pretrattati in officina, devono soltanto essere collegati attraverso un incastro delle parti in sovrapposizione e una giunzione bullonata.

### *Montaggio attraverso la messa in coazione degli elementi strutturali*

La ricerca propone una strategia costruttiva alternativa fondata sull'ipotesi di sollecitare, in fase di montaggio, esclusivamente i nodi che in fase di esercizio saranno sottoposti a condizioni particolari di vincolo, in modo da non indurre carichi anomali in alcune aree della struttura (che ne potrebbero danneggiare il processo di acquisizione della forma).

Una volta conformato il graticcio in piano, si procede ad attribuirgli la sua forma finale attraverso l'applicazione, in corrispondenza dei punti d'attacco a terra, di forze esterne direzionate verso il centro della struttura

Si ipotizza di eseguire tale operazione mediante il ricorso a due paranchi manuali a leva che, fissati con delle cime alle due diagonali della struttura, fanno convergere i quattro lati minori verso il centro, conducendo gradualmente il graticcio nella sua configurazione tridimensionale.



*Fig.33- Schema di montaggio.*

Raggiunta la forma finale a doppia curvatura, si ipotizza di non ancorare al suolo la gridshell ma di inserire, in corrispondenza dei punti adiacenti al terreno, dei contrappesi in grado di assorbire le pre-sollecitazioni di trazione impresse alla struttura in fase di "messa in forma".

*Serraggio dei nodi e inserimento del sistema di irrigidimento diagonale*

La prima operazione da compiere dopo la fase di "formatura" della griglia strutturale è costituita dal serraggio dei nodi, eseguibile manualmente o attraverso il ricorso a un semplice avvitatore elettrico. Tale azione genera il sensibile aumento della capacità portante della struttura: il sistema, inizialmente labile e con rigidità proporzionale a quella della singola assicella, diventa iperstatico, le due schiere di aste iniziano a collaborare tra

loro e il momento di inerzia risultante diventa corrispondente a quello di elementi monodimensionali con sezione trasversale costituita da due masse concentrate, poste a una distanza pari a quella tra i due *layer*.

Ulteriore resistenza alla struttura è attribuita attraverso l'inserimento di elementi di irrigidimento diagonali che rendono i moduli indeformabili e assicurano il trasferimento degli sforzi da una maglia all'altra. Affinché la *gridshell* resti stabile nel tempo, è necessario che gli angoli formati dalle due giaciture della struttura non cambino mutuamente poiché ogni cambiamento nell'angolo della maglia comporta un cambiamento di forma nella struttura (in equilibrio) e ciò determina una probabile (quanto indesiderata) flessione<sup>153</sup>; questo risultato si può ottenere trasformando la maglia romboidale (deformabile rigidamente) in maglia triangolare (indeformabile in campo rigido) attraverso l'aggiunta di controventature diagonali realizzate con elementi rigidi, in grado di sostenere sia compressione che trazione, con cavi in grado di reagire soltanto a trazione, o attraverso l'uso di lamiere rigide che, fissate in corrispondenza dei moduli, li rendono indeformabili. Come già detto, il progetto del sistema di irrigidimento del modulo di *gridshell* oggetto della ricerca prevede la posa in opera di cavi in acciaio posizionati in modo che la distribuzione delle tensioni avvenga esattamente nel baricentro del nodo.

### 3.2.3 Story-board della sperimentazione

La prima esperienza costruttiva, avvenuta senza il supporto del partner industriale, ha prodotto risultati soddisfacenti evidenziando, al contempo, alcune criticità impossibili da prevedere in fase di progetto.

Il sistema di copertura è stato realizzato nel 2009 a Torre Chianca (Lecce), nella corte della *Masseria Ospitale* ed è oggi utilizzato come gazebo dagli ospiti della struttura ricettiva.

---

<sup>153</sup> Cfr. Linkwitz K., *On Some Peculiarities Of Timber Shells Concerning Formfinding, Manufacturing, Building Physics*, Convegno Internazionale *Lightweight Structures in Civil Engineering*, Varsavia, Polonia, 24-28 giugno, 2002.

Prima di attivare il processo produttivo del modulo di *gridshell* si è provveduto alla scelta dell'essenza di legno da utilizzare. Al fine di garantire resistenza e flessibilità, il legno deve essere resinoso e senza punti di discontinuità e, pertanto, ci si è orientati sul ricorso a tavole di larice giovane e di prima scelta.

In seguito si è effettuata una verifica delle sezioni di progetto rispetto alle dimensioni delle tavole di legno disponibili sul mercato. Al fine di ridurre al minimo lo sfrido, ciascuna tavola, di dimensioni pari a 175 X 40 X 4000 mm, è stata tagliata in modo da ricavare sei aste della giusta dimensione. Per la realizzazione dei macromoduli costituenti la griglia strutturale si è resa necessaria, complessivamente, la fornitura di 645,6 ml di larice per un volume totale pari a circa 0,44 mc di materiale.

La griglia strutturale è costituita da 408 nodi e 216 giunti per la sovrapposizione bullonata dei macromoduli. Per la costruzione del sistema di copertura oggetto della tesi, sono stati, dunque, acquistati più di 624 bulloni (M6 L100) e 1248 rondelle.

Adiacente al sito di costruzione fu allestita, in occasione della sperimentazione, una piccola falegnameria in cui un semplice seghetto alternativo e una macchina foratrice hanno consentito il taglio delle tavole in legno e la produzione delle aste necessarie alla fabbricazione della griglia strutturale.

L'impiego, da parte di manodopera scarsamente qualificata, di attrezzi semplici e maneggevoli ha evidenziato l'enorme lavorabilità del legno.

In seguito al taglio e alla foratura delle aste, sono stati pre-assemblati i macromoduli attraverso bullonatura, eseguita manualmente o mediante avvitatore elettrico. Il mancato serraggio dei nodi ha consentito la rotazione relativa tra le aste e i macromoduli sono stati piegati al fine di facilitare il trasporto presso il sito di costruzione.

La griglia strutturale piana, realizzata attraverso l'assemblaggio dei macromoduli prefabbricati, è stata successivamente sollevata dal suolo fino all'altezza di circa un metro e appoggiata su cavalletti.



*Fig. 34 - Il graticcio è sollevato dal terreno di circa 1 mt.*

Il graticcio, occupante una superficie di circa 9 x 9 m, è stato quindi sottoposto a una lenta deformazione, applicando ai quattro lati minori sollecitazioni tali da avvicinare parallelamente i segmenti opposti.



*Fig. 35 - La struttura assume la configurazione tridimensionale.*

La griglia si è deformata attraverso il ricorso a due paranchi manuali a leva che, fissati con delle cime alle due diagonali della struttura, hanno fatto

convergere i quattro lati verso il centro, facendo avvicinare la struttura alla sua configurazione finale.

La deformazione è stata favorita dal grado di umidità del legno: il preventivo trattamento del materiale con una soluzione d'acqua e sali di boro ha facilitato il montaggio provvedendo, al contempo, alla protezione del materiale.



*Fig. 36 - L'installazione di contrappesi in corrispondenza dei quattro lati poggianti a terra consente alla struttura di mantenere la configurazione tridimensionale raggiunta.*

Per evitare che la griglia priva di vincoli a terra si "stendesse" tornando, per inerzia, alla configurazione piana di partenza, si è provveduto all'installazione di contrappesi in corrispondenza dei quattro lati poggianti a terra.

Le forze orizzontali impresse dai due paranchi hanno generato deformazioni graduali fino a quando la distanza tra le porzioni di griglia adiacenti al suolo

è coincisa con le misure di progetto relative alla configurazione deformata. Durante la sperimentazione si è notata una incongruenza tra il comportamento del modello in scala realizzato in fase di progettazione e il modello reale: a formatura ultimata le dimensioni dei lati e delle diagonali coincidevano con quelle di progetto ma l'altezza degli archi di ingresso e quella in chiave risultava inferiore a quella attesa. Il modello fisico in scala, realizzato nella fase di form finding, non aveva messo in evidenza alcuni fenomeni quali la tendenza deformativa della struttura che, per il peso del materiale (se pur limitato), tende ad abbassarsi in chiave accentuando l'eccentricità dei quattro archi.



*Fig. 37- Le dimensioni dei lati e delle diagonali coincidono con quelle di progetto ma l'altezza degli archi di ingresso e quella in chiave risulta inferiore.*

Per ovviare a tale problema si è impressa un'ulteriore deformazione in fase di montaggio ma ciò ha provocato il "ripiegamento" su se stessa della struttura e ha reso necessaria la realizzazione di una cerchiatura nella parte

alta, ovvero al di sopra degli archi, per risolvere il problema dell'abbassamento in chiave.

Per evitare fenomeni di schiacciamento delle aste e la loro conseguente plasticizzazione, sono stati inseriti sul bordo alcuni tasselli in legno in modo che la distanza tra le stesse rimanesse costante e il bordo risultasse irrigidito. Nonostante tale operazione, la forte curvatura in chiave dell'arco ha causato la rottura di un' asta che è stata successivamente sostituita attraverso una vera e propria operazione di *cuci e scuci*: i giunti ricadenti sull'elemento strutturale interessato dal fenomeno di rottura sono stati disassemblati e la bacchetta è stata sostituita da una nuova che, dovendo assumere immediatamente la configurazione curva finale, è stata deformata mediante l'utilizzo di stringenti.



Fig. 38 - Costruzione a "formatura" ultimata.

In seguito il serraggio dei nodi, unito alla messa in opera dei cavi di irrigidimento, ha conferito alla struttura la rigidità necessaria a garantirne la stabilità non soltanto rispetto al peso proprio ma soprattutto rispetto agli sforzi flessionali dovuti a carichi dissimmetrici (vento e/o neve) .



*Fig. 39 - Costruzione a "formatura" ultimata*

### 3.3 Conclusioni: premialità e criticità emerse dalla sperimentazione

La costruzione del prototipo è avvenuta con successo e, nonostante le operazioni di produzione e di montaggio fossero ancora condotte a livello artigianale, i tempi impiegati durante le diverse fasi del processo costruttivo, risultano contenuti. In particolare la prefabbricazione dei macromoduli dispiegabili ha garantito un notevole abbattimento dei tempi di assemblaggio del graticcio strutturale, rendendo più semplice il trasporto e la movimentazione in cantiere. Le operazioni di produzione e di messa in forma della gridshell sono state eseguite da manodopera non specializzata e l'inquinamento acustico e atmosferico, nonché gli scarti di lavorazione prodotti durante la costruzione, sono stati minimi.

	tempo totale (ore)	manodopera (n)	tempo di lavoro per ogni modulo (ore)	
assemblaggio grid in piano	1,5	4	0,166666667	0,2
messa in forma	7	4	0,777777778	0,8
montaggio controventatura	2	4	0,222222222	0,25
serraggio bulloni	2	4	0,222222222	0,25
	<b>12,5</b>			<b>1,5</b>

Fig.40 - scheda riassuntiva tempi di lavorazione

Questa esperienza costruttiva ha costituito un importantissimo strumento cognitivo grazie al quale è stato possibile comprendere più a fondo il comportamento delle *gridshell* post-configurate. Il prezioso bagaglio di conoscenze maturato in seguito a questa applicazione sperimentale ha portato a un sensibile affinamento dell'idea progettuale di partenza, soprattutto per quanto riguarda il controllo della forma della struttura durante le fasi di montaggio e l'ottimizzazione delle strategie esecutive.

Rispetto alla prima questione, le rilevanti incongruenze riscontrate tra il modello in scala realizzato in fase di progetto e la struttura reale, hanno

messo in evidenza i limiti del metodo empirico di ricerca della forma: i modelli fisici, prescindendo dalle proprietà effettive del materiale, non riescono a prevedere eventuali fattori che possano alterare, in fase di costruzione, le curvature in gioco. Per questo motivo la ricerca si è orientata verso l'utilizzo di software di calcolo agli elementi finiti (ABAQUS) con lo scopo di definire una procedura informatizzata di ricerca della forma, basata sulla simulazione del processo costruttivo. Tale metodo consente di prevedere il comportamento della griglia durante tutte le fasi di montaggio, evitando il verificarsi di imprevisti durante la costruzione.

Ulteriore miglioramento apportato al progetto del prototipo riguarda il metodo di montaggio. Il ricorso ai due paranchi ha comportato alcuni problemi. Data l'esigua sezione degli elementi strutturali e il limitato peso dell'intera struttura, è stato necessario imprimere sollecitazioni graduali e non eccessivamente brusche, al fine di evitare fenomeni di rottura nella griglia o in parti di essa. Tale esigenza ha escluso la possibilità di utilizzare paranchi più grandi, con lunghezze del cavo maggiori, ma esercitanti trazioni troppo elevate per il tipo di struttura. Si è ricorso, pertanto, a piccoli paranchi manuali a leva con cavo di lunghezza pari a un metro e ciò ha generato una serie di problemi cui è imputabile una dilatazione dei tempi di costruzione del modulo di *gridshell*. Affinché la struttura passasse dalla configurazione piana a quella finale a doppia curvatura, ciascuna diagonale avrebbe dovuto subire un accorciamento superiore ai 2 m. Fissati i paranchi in corrispondenza delle due diagonali, è stato possibile imprimere deformazioni graduali fino ad ottenere un accorciamento massimo di un metro, pari alla lunghezza del cavo. In seguito è stato necessario rimuovere il paranco per poi fissarlo nuovamente lungo la diagonale e imprimere un'ulteriore deformazione. Per evitare che una volta rimossa la macchina, la diagonale, non più in trazione, si distendesse generando un riavvicinamento della struttura alla sua configurazione iniziale piana, è stato necessario fissare su di essa una cima che è andata in trazione una volta rimosso il

paranco. Nonostante questo espediente, in seguito alla rimozione della macchina, la struttura tendeva a "distendersi" vanificando parte del lavoro esercitato. Per ridurre tale fenomeno è stato necessario l'utilizzo di cristi collocati in più punti della struttura. Tale procedimento, basato sulla successione delle operazioni rimozione- fissaggio cima- re installazione del paranco, ha causato un'inutile dilatazione dei tempi di montaggio.

Altro problema generato dall'utilizzo di paranchi a trazione riguarda la difficoltà di eseguire le operazioni di montaggio al di sotto della struttura. Soprattutto durante le prime fasi di "messa in forma", quando la gridshell non ha ancora raggiunto un'altezza sufficiente a rendere agevole la movimentazione all'interno dell'area coperta, le operazioni costruttive possono provocare dei rischi. La difficoltà di rispettare le normative in materia di sicurezza riguardava già i processi costruttivi messi a punto nei casi noti, fondati tutti sull'esecuzione di operazioni di montaggio in quota o al di sotto della struttura. A proposito della costruzione del Mannheim Lattice Shell, Kelly, Harris, Dickson e Rowe affermano, addirittura, che «(...) le modalità di messa in opera della Multisala di Mannheim sarebbero impedito dalle vigenti norme sulla sicurezza dei cantieri».<sup>154</sup>

Per superare i problemi costruttivi generati dall'utilizzo dei paranchi a leva si ipotizza di ricorrere a un semplice sistema di pulegge, appositamente progettato, che consenta di demoltiplicare a tal punto la forza necessaria a deformare la griglia che la messa in forma della struttura possa essere eseguita manualmente da soli quattro uomini. Si intende, inoltre, semplificare al massimo le operazioni di montaggio, eseguibili al di fuori dell'area coperta dalla gridshell, in modo da ottenere un ulteriore abbattimento dei tempi di costruzione.

---

<sup>154</sup>Kelly O.J., Harris R., Dickson M.G.T., Rowe J.A., *Construction of the Downland Gridshell*, The Structural Engineer, Vol. 79, n.17, Settembre 2001

### *3.4 Nuova ipotesi per la ricerca della forma attraverso la simulazione del processo costruttivo*

#### 3.4.1 Form finding attraverso il ricorso a software

Il cambiamento del contesto sociale odierno, la richiesta sempre maggiore di spazi fluidi e flessibili, le rinnovate possibilità per il progetto di architettura, le nuove frontiere tecnologiche, conferiscono al progettista una maggiore libertà, incitandolo alla sperimentazione di forme sempre più complesse. Le modalità tradizionali del progettare si stanno radicalmente trasformando attraverso il ricorso sempre più massiccio a protocolli informatizzati finalizzati alla definizione della forma e del comportamento della struttura, mediante la creazione e lo studio di modelli virtuali.<sup>155</sup>

In architettura molte forme complesse sono state generate mediante modalità progettuali particolari, basate sul ricorso alla B-spline<sup>156</sup>, che ha consentito di modellare forme curve non riconducibili ad alcuna matrice geometrica nota, rendendole derivabili da equazioni e quindi costruibili. Questo procedimento, sviluppato in ambito CAD, prende le mosse da superfici NURBS (*non uniform rational B-splines*) ossia da superfici che

---

<sup>155</sup> Esistono due tipologie di software usate per la grafica: i software dell'industria dell'"intrattenimento" (film, videogiochi, ecc..) e quelli utilizzati nel campo aerospaziale e automobilistico. I primi sono oggi utilizzati per la produzione di immagini e render foto realistici utili per la rappresentazione del progetto ma non per fornire informazioni riguardo la sua costruzione. Per quanto riguarda i secondi, a partire dalla scoperta delle curve di *Bezier* (che prendono il nome dal loro inventore), e le *B-spline* (a opera di I. Shoenberg nel 1946) saranno sviluppati, nel 1960, i CAGD (COMPUTER AIDED GEOMETRIC DESIGN) da parte di Paul de Faget per la Citroen, Pierre Bèzier per la Renault, J.Ferguson per Boeing e C.de Boor alla General Motors (Cfr. Paoletti Ingrid, "Costruire le forme complesse. Innovazione, industrializzazione e trasferimento per il progetto di architettura", CLUP, Milano 2006).

<sup>156</sup> Le curve spline, dette anche curve composite, sono delle curve composte da altre curve e sono suddivise in tre differenti categorie: B-Spline uniformi, non uniformi e NURBS. Le B-Spline uniformi sono parametrizzate su intervalli di lunghezza unitaria. Le B-Spline non uniformi sono invece parametrizzate su intervalli di tipo differente. Nella terza categoria, oltre ad essere parametrizzate su intervalli differenti, le funzioni utilizzate sono razionali, ossia sono definite come rapporto di funzioni polinomiali.

insistono su forme convenzionali come parabole o iperboli in modo da avere punti noti nello spazio controllabili anche in fase di produzione, grazie all'agile interfaccia con le macchine a controllo numerico.<sup>157</sup>

Tra le opere progettate grazie all'utilizzo di tali strumenti informatici vi è il *Kunsthhaus*, architettura "bolliforme" concepita da P. Cook, C. Fourmer e realizzata a Graz nel 2004. Qui la scelta morfologica definitiva scaturiva dall'attento confronto tra il modello fisico in plastilina e il modello virtuale realizzato con microstation 3d mentre, per quanto riguarda il progetto strutturale, a opera di Bollinger e Grahmann, un sistema informatico evoluto, consentiva di distorcere forme elementari come la sfera fino ad avvicinarsi al modello progettato.<sup>158</sup>

Ampiamente utilizzato per la progettazione di architetture complesse è anche il *software* tridimensionale parametrico CATIA<sup>159</sup> (Computer Aided Three dimensional Interactive Application) che, creato nella fine degli [anni 70](#) per sviluppare l'aereo da combattimento Mirage, fu adottato nelle industrie aerospaziali, autoveicolistiche, navali e oggi è spesso usato in architettura per controllare geometrie simili ma tutte differenti. Un esempio è rappresentato dal Museo Mercedes di Stoccarda (2006) la cui forma complessa, derivata dalla fusione di due ellissi creanti un vuoto triangolare centrale sul quale si articolano gli spazi museali, ha richiesto l'utilizzo del software per ottimizzare il processo di sviluppo delle singole cellule costituenti l'involucro e il loro aggancio alla struttura portante. I progettisti UN Studio hanno realizzato disegni in 3d Rhino dai quali i fornitori hanno

<sup>157</sup> Cfr. Paoletti Ingrid, "Costruire le forme complesse. Innovazione, industrializzazione e trasferimento per il progetto di architettura", CLUP, Milano 2006.

<sup>158</sup> La struttura era inscrivibile in un rettangolo e la sua forma finale fu ottenuta attraverso 15 variazioni sul modello di distribuzione degli sforzi. (Cfr. Paoletti Ingrid, "Costruire le forme complesse. Innovazione, industrializzazione e trasferimento per il progetto di architettura", CLUP, Milano 2006).

<sup>159</sup> Il software costituisce un [CAD/CAE/CAM](#) multipiattaforma ed è stato sviluppato dalla azienda francese [Dassault Systemes](#) e venduto tramite l'[IBM](#). Il programma, scritto nel linguaggio C++, è la pietra angolare della suite di Dassault Systemes per la [gestione del ciclo di vita del prodotto](#). (Cfr. [www.wikipedia.it](http://www.wikipedia.it))

estratto le informazioni necessarie poi si passa al modello realizzato con il software CATIA.<sup>160</sup>

L'importanza che la modellazione informatica ha assunto nel progetto d'architettura è testimoniata anche dalle *Flux Structures*: teorizzate e sviluppate dall'ingegnere giapponese Mutsuro Sasaki e applicate per la prima volta nel Centro culturale di Kitagata di Arata Isozaki, esse rappresentano un utile esempio di applicazione di funzioni parametriche per il progetto di forma architettonica e struttura portante, grazie all'ausilio di complessi sistemi informatici. Le *Flux Structures* derivano dalla ricerca di strutture fluide e organiche realizzate attraverso modelli virtuali che il software è in grado di generare rapidamente con superfici a curvatura libera in cui è garantita la massima razionalizzazione degli sforzi strutturali; questa modalità progettuale rappresenta l'avanzamento in ambito virtuale dei metodi sperimentali tradizionali, concettualmente ancora simili a quelli utilizzati, ad esempio, da Gaudi. La prassi tradizionale impone, come sopra descritto, una prima fase di progettazione per tentativi successivi, durante la quale la superficie immaginata viene espressa utilizzando funzioni curvilinee, per poi procedere all'analisi degli sforzi e delle deformazioni con i metodi classici. Una volta stabilito l'algoritmo in grado di generare la struttura, invece, il computer è in grado di calcolare e visualizzare in pochi minuti numerose varianti formali, ottenute modificando i parametri di progettazione: a questo punto è possibile selezionare la forma più interessante fra quelle ottenute.<sup>161</sup>

Nel campo delle *gridshell* la questione della forma si complica ulteriormente: la configurazione finale del manufatto non dipende solo dal

---

<sup>160</sup> Cfr. Paoletti Ingrid, "Costruire le forme complesse. Innovazione, industrializzazione e trasferimento per il progetto di architettura", CLUP, Milano 2006.

<sup>161</sup> Cfr. <http://albertopugnale.wordpress.com/2007/05/17/flux-structure> e cfr. Colabella Sofia, *Gridshell ,tecnologia delle forme complesse*, in Perriccioli Massimo, (a cura di), *L'officina del pensiero tecnologico*, Alinea, Firenze, 2010.

“taglio e cucito” del graticcio piano ma anche da una sua deformazione e, pertanto, non è liberamente conformabile secondo l'intenzione estetica del creatore ma deve necessariamente seguire le regole precise connesse alla natura stessa del materiale e alla capacità di deformazione del “tessuto strutturale” di partenza.<sup>162</sup> *“In presenza di configurazioni architettoniche dalla geometria complessa come le organiche superfici delle gridshell, il passaggio da uno schizzo di progetto (bidimensionale) al modello digitale che concretizza nello spazio virtuale (tridimensionale) l'idea della forma, costituisce una delle tappe basilari dell'iter progettuale: la configurazione ideata affronta infatti un momento di importante verifica attraverso la comprensione di quei valori spaziali spesso celati dalla riduzione al piano della rappresentazione su supporto cartaceo. Le nuove tecnologie al servizio del disegno assistito al computer permettono infatti di affrontare i problemi spaziali di immaginare, definire e controllare forme e configurazioni architettoniche complesse in uno spazio pluridimensionale equivalente, anch'esso tridimensionale sebbene virtuale. Tuttavia, la simulazione solo geometrica offerta dai software di modellazione di solidi e superfici non permette di confrontare le forme definite con i problemi reali della resistenza del materiale, che dovrà subire spesso sforzi e deformazioni al limite delle proprie capacità per assumere le configurazioni previste.”*<sup>163</sup>

Ci si orienta, pertanto, verso l'utilizzo di un software di calcolo strutturale che, tenendo conto delle proprietà del materiale, fornisce un modello tridimensionale in grado di restituire il reale comportamento della struttura durante tutte le fasi del processo deformativo.

Il ricorso a tali programmi di calcolo permette, infatti, di simulare l'intero processo costruttivo individuando le tecniche più efficaci per trasformare il

<sup>162</sup>Cfr. Pone Sergio, *Gridshell: forma e tipologia strutturale*, in corso di pubblicazione

<sup>163</sup> Programma redatto per il Progetto Fit, team: Holzbau Sud Spa, Canobio Spa, Università degli Studi di Napoli Federico II, Dipartimento di Progettazione Urbana e di Urbanistica, Dipartimento di Costruzioni e Metodi Matematici in Architettura, Dipartimento di Configurazione e Attuazione dell'Architettura.

graticcio strutturale piano in una superficie a doppia curvatura (es. individuare i nodi da caricare, la direzione dei carichi, ecc..).

La necessità di analisi non-lineari complesse per grandi spostamenti, la complessità geometrica e condizioni di carico richiedenti trattamenti più sofisticati, fanno sì che, nella pluralità dei casi, i protocolli informatizzati di ricerca della forma delle strutture dalla forma complessa, si basino sull'utilizzo di programmi di calcolo agli elementi finiti.

In un'analisi statica lineare si assume che gli spostamenti indotti siano piccoli, che le variazioni delle rigidità strutturali causate dai carichi siano trascurabili e che la direzione e l'intensità dei carichi siano costanti durante la deformazione della struttura. Si assume, inoltre, un andamento lineare tra i carichi e gli spostamenti. Tali condizioni semplificate non sono accettabili in riferimento alle gridshell per le quali, dati gli elevati spostamenti e rotazioni, necessari affinché la deformazione della griglia dalla configurazione piana a quella a doppia curvatura avvenga, va costruito un modello che tenga conto delle non linearità geometriche.<sup>164</sup>

Va considerato anche l'eventuale comportamento non lineare del materiale, derivato dal fatto che il rapporto tra lo stress e le deformazioni dipende dalla storia e dalla durata del carico.

---

<sup>164</sup> Cfr. Ramalingam R., Redaelli D., *Analisi agli elementi finiti non lineari*, Progettare n. 284, Dicembre, 2004.

### 3.4.2 Definizione di una procedura informatizzata di ricerca della forma attraverso la simulazione del processo costruttivo.

In un primo momento ci si è posti l'obiettivo di mettere a punto un metodo informatizzato di ricerca della forma che, a partire dalla definizione delle condizioni al contorno (corrispondenti al perimetro della struttura nella configurazione finale), consentisse di ottenere la geometria della superficie a doppia curvatura strutturalmente più efficiente. Tale metodo si basa sull'assunto che le coperture la cui forma contribuisce alla resistenza sono generalmente in uno stato di sforzo e deformazione minime. Come afferma l'ingegnere Mutsuro Sasaki, inventore delle *flux structure*<sup>165</sup>, <<(…) la minima energia di deformazione della struttura è una condizione meccanicamente ottimale. E, ugualmente, le strutture meccanicamente ottimali sono ottenute ricercando le superfici curve che generino il minimo sforzo nella struttura.>><sup>166</sup>

Proprio su tale principio l'ingegnere giapponese fonda il suo metodo di ottimizzazione strutturale denominato *Sensitivity Analysis* che, attraverso il confronto tra energia di deformazione e parametri di progetto, tende ad affinare la forma della struttura fino al raggiungimento della configurazione più efficiente, cui corrisponde il valore minimo di energia interna.

Il metodo informatizzato di ricerca della forma risulta articolato in varie fasi. In primo luogo, si esegue la modellazione del sistema strutturale considerato, attraverso la definizione della geometria e la successiva creazione di una *mesh* ad elementi finiti<sup>167</sup>. Dopo aver inserito tali informazioni di natura geometrica, si procede alla definizione delle sezioni di progetto attraverso la scelta del *profilo* (forma e dimensioni della sezione) e delle proprietà del materiale (determinate attraverso il modulo di Yang , e

<sup>165</sup>

Cfr. Sasaki M., *Flux Structure*, TOTO, Tokyo, 2005.

<sup>166</sup> <http://www.newitalianblood.com/showt.pl?id=1217>

<sup>167</sup> Ciascun elemento strutturale è discretizzato attraverso la creazione di una griglia (*mesh*) composta da primitive (*elementi finiti*) di forma codificata. (Cfr. <http://it.wikipedia.org>)

la massa volumica). Stabiliti tipologia e posizionamento dei vincoli nodali, la creazione del modello matematico si conclude con la definizione delle forze esterne che agiscono sulla struttura. Si ipotizza che il sistema strutturale sia sottoposto a un carico uniformemente distribuito pari, in prima istanza, alla forza di gravità. Caricata con il solo peso proprio, la struttura subisce una deformazione molto lieve. Si introduce, dunque, un coefficiente *alpha* di amplificazione della forza di gravità e si sottopone la struttura a un carico uniformemente distribuito pari al peso proprio moltiplicato per il coefficiente considerato. Modificando di volta in volta *alpha* si raggiungono diverse configurazioni deformate, costituenti forme geometriche omotetiche.<sup>168</sup> Le superfici deformate ottenute si reimportano all'interno del programma di calcolo come nuovi modelli; in questo modo si considera la geometria individuata, senza tenere conto dello stato tensionale che, in seguito alla deformazione, si è generato nel modello di calcolo. I modelli meccanici, caratterizzati dalle geometrie deformate ricavate con il metodo descritto, sono sottoposti a peso proprio in modo da calcolare lo stato tensionale prodotto in fase di esercizio e l'energia interna generata.

A questo punto si traccia un diagramma *alpha*/energia interna e si considera la forma cui corrisponde il valore minimo di energia di deformazione. Individuata la geometria più efficiente è possibile importarla in un *software* di disegno per acquisire immediatamente le informazioni geometriche utili al progetto.

Una prima verifica del protocollo messo a punto è stata effettuata attraverso una semplice applicazione. Il sistema meccanico modellato all'interno dello spazio virtuale del programma è costituito da un'unica asta in legno con sezione trasversale di dimensioni pari a 45 x 15 mm. A tale elemento strutturale sono attribuite le proprietà fisiche e meccaniche del larice/Nord S1, ricavate dall'Eurocodice 5 (UNI EN 11035). Si considera, dunque, un

---

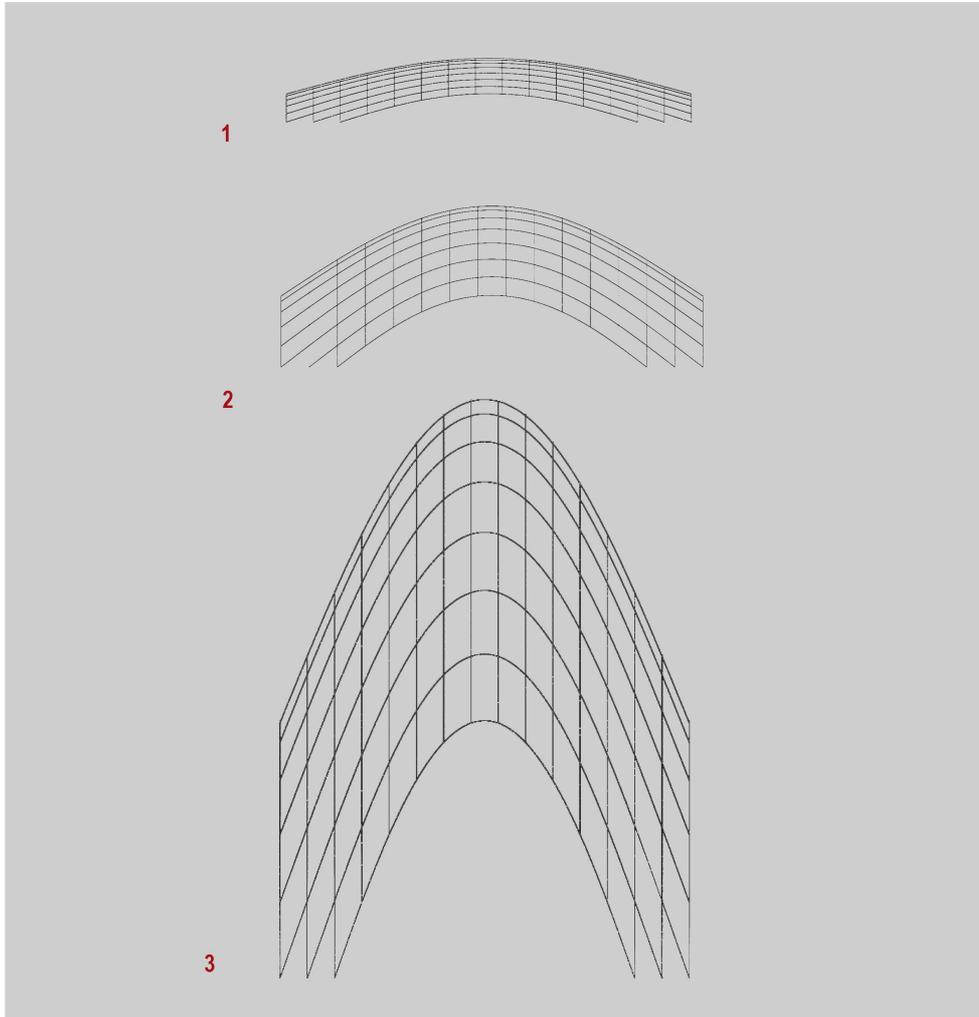
<sup>168</sup> La modellazione è eseguita in campo elastico lineare e ciò rappresenta un requisito indispensabile affinché le superfici risultino omotetiche.

modulo di elasticità (medio) parallelo alle fibre pari a  $13\,000\text{ [N/mm}^2\text{]}$  e una massa volumica (media) di  $600\text{ [kg/m}^3\text{]}$ . Si inseriscono vincoli cerniera alle due estremità dell'elemento strutturale e si applica un carico uniformemente distribuito pari alla forza di gravità moltiplicata per il coefficiente di amplificazione *alpha*. Facendo variare quest'ultimo l'asta si deforma per l'elasticità del materiale e si ottengono differenti configurazioni. Si traccia il diagramma *alpha*/energia interna e si considera la deformata cui corrisponde la quantità minima di energia di deformazione. Dall'analisi delle caratteristiche geometriche della curva ottenuta si è constatato che essa è simile a una catenaria; i risultati si considerano, pertanto, attendibili e si procede all'applicazione del metodo informatizzato per l'individuazione della superficie della *shell* più resistente.

La prima operazione da effettuare riguarda la definizione geometrica della griglia strutturale piana. Il perimetro del graticcio di partenza coincide con quello corrispondente alla configurazione finale a doppia curvatura. Vincoli cerniera posti in corrispondenza dei 12 nodi che, alla fine del processo deformativo, resteranno adiacenti al suolo, impediscono agli stessi di traslare. La griglia, sottoposta a carichi uniformemente distribuiti, può soltanto deformarsi per l'elasticità del materiale. Essa è trattata alla stregua di una superficie membranale continua e, pertanto, le modalità di discretizzazione sono soltanto indicative e non influenzano in alcun modo il perseguimento dell'obiettivo finale che, come già detto, riguarda la definizione della geometria della superficie (continua) a doppia curvatura più efficiente. Modellato il sistema meccanico, si crea una *mesh* ad elementi finiti e si assegna a ciascun asta una sezione trasversale di dimensioni pari a  $45 \times 15\text{ mm}$  e le proprietà fisiche e meccaniche del larice/Nord S1<sup>169</sup>.

---

<sup>169</sup> Si considera, dunque, un modulo di elasticità (medio) parallelo alle fibre pari a  $13\,000\text{ [N/mm}^2\text{]}$  e una massa volumica (media) di  $600\text{ [kg/m}^3\text{]}$ . (Eurocodice 5 UNI EN 11035).

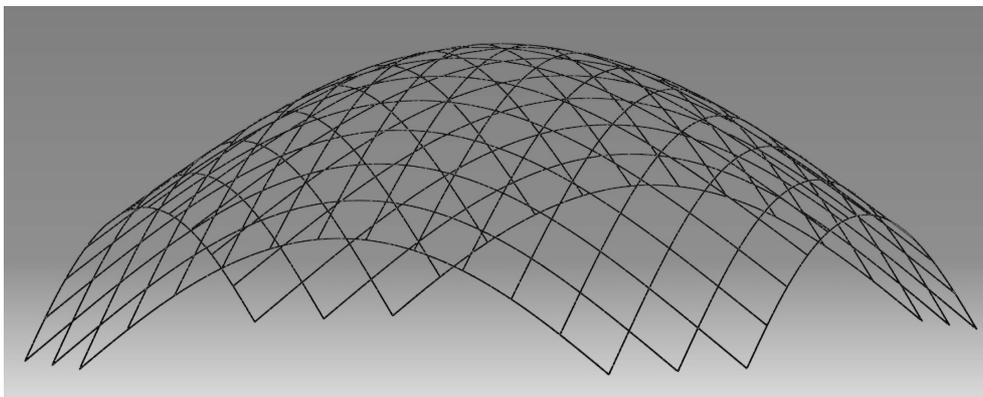


*Fig.41 Configurazioni tridimensionali ottenute facendo variare il coefficiente di amplificazione  $\alpha$ .*

Si applica un carico uniformemente distribuito pari alla forza di gravità moltiplicata per il coefficiente di amplificazione  $\alpha$  e la variazione di quest'ultimo dà origine a differenti configurazioni. Si traccia il diagramma  $\alpha$ /energia interna e si considera la deformata cui corrisponde la quantità minima di energia di deformazione, corrispondente a un valore di  $\alpha$  pari a 2,7.

La geometria ottenuta costituisce una forma strutturale ottimale ma non è soddisfacente da un punto di vista architettonico: gli archi di ingresso presentano un'altezza in chiave di circa 120 cm e la massima altezza della

volta è pari a 250 m.<sup>170</sup> Ciò impone una scelta: modificare la forma del graticcio bidimensionale di partenza per poter ottenere una configurazione tridimensionale "corretta" o discostarsi dalla geometria individuata e mettere a punto un nuovo strumento informatizzato per la ricerca e il controllo della forma architettonica della *gridshell*?



*Fig.42- Configurazioni tridimensionale cui corrisponde il valore minimo di energia interna (per alpha 2,7).*

La prima ipotesi è stata scartata perché apportare modifiche al graticcio piano significava dare origine a una struttura totalmente differente da quella oggetto della prima sperimentazione: ciò avrebbe reso impossibile un confronto tra le due esperienze costruttive, necessario per valutare l'efficacia delle innovazioni introdotte nell'ambito del processo costruttivo. Come sappiamo, inoltre, la forma funicolare rappresenta un punto di riferimento solo iniziale dal quale far partire la ricerca della forma. A ciascuna condizione di carico è possibile associare una particolare configurazione per cui la struttura, sottoposta al solo peso proprio, è in uno stato di pura compressione. Ciò rappresenta una condizione ideale poiché nella realtà i carichi imposti sono superiori al peso proprio e non

<sup>170</sup> la configurazione tridimensionale individuata può essere presa in considerazione soltanto per strutture coprenti una superficie superiore a 100 mq : in questo caso l'altezza degli arconi di ingresso sarebbe sufficiente a garantirne l'accessibilità.

uniformemente distribuiti e, mentre nelle strutture "pesanti" la massa riesce a contrastare eventuali carichi addizionali, nel caso di strutture leggere come le *gridshell*, il peso proprio è irrisorio e carichi dissimmetrici dovuti a neve e vento generano flessione.

Si procede, dunque, alla definizione di una nuova procedura informatizzata di ricerca della forma basata sulla simulazione del processo costruttivo. Ciò consente di controllare in maniera accurata il comportamento della struttura durante tutte le fasi di deformazione e di definire le strategie costruttive più efficaci (i nodi da caricare, la direzione e l'intensità delle forze necessarie alla deformazione del reticolo bidimensionale, ecc.), prevedendo le ricadute che determinate scelte di carattere tecnologico avrebbero sulla configurazione tridimensionale finale. Il metodo di montaggio messo a punto in occasione della prima esperienza costruttiva non includeva, tra le operazioni di costruzione, la messa in opera della cerchiatura al di sopra degli archi di ingresso all'area coperta. Attraverso i plastici di studio realizzati, totalmente estranei alle reali proprietà del materiale, non era stato possibile prevedere la rilevante difformità tra la configurazione ottenuta mettendo in coazione gli elementi strutturali in cantiere e quella di progetto. Questo spiacevole "imprevisto" verificatosi durante la prima esperienza costruttiva, ha reso necessaria una modifica del metodo di montaggio considerato, causando una dilatazione dei tempi di montaggio. Tale fenomeno di schiacciamento dovuto al peso proprio della griglia strutturale è stato immediatamente messo in evidenza durante la simulazione del processo.

In prima istanza si realizza il modello geometrico riguardo al quale occorre fare alcune precisazioni.

Il progetto prevede la realizzazione di un graticcio piano costituito da due fasci ortogonali di aste parallele tra loro e poste a una distanza di 50 cm l'una dall'altra. Ciascuna di queste è modellata come un unico elemento

strutturale di tipo *beam*<sup>171</sup> che corre per tutta la lunghezza del reticolo, senza considerare le giunzioni per sovrapposizione dei macromoduli. Si ritiene che la scomposizione della griglia piana in macromoduli prefabbricati e dispiegabili influisca in maniera sostanziale sulle strategie di messa in opera del sistema di copertura, senza avere rilevanti ricadute sulle prestazioni statico-resistenti della struttura. Si può affermare, dunque, che l'accuratezza dei risultati ottenuti attraverso la simulazione del processo costruttivo del modulo di *gridshell* non dipende in alcun modo da tale schematizzazione del modello geometrico.

Il reticolo strutturale, ricreato nello spazio virtuale del programma, è caratterizzato da sole due schiere di aste ed è composto da fasci ortogonali posti ad una distanza tra loro di 15 mm, pari all'altezza della sezione dell'elemento strutturale.

La schematizzazione del reticolo in un unico *layer* di aste ha reso indispensabili alcune riflessioni riguardo la sezione degli elementi strutturali. Come già detto, in fase di deformazione, le sezioni trasversali delle due schiere di aste risultano indipendenti mentre, terminato il processo costruttivo, i nodi strutturali sono serrati e le sezioni cominciano a collaborare. A questo punto, la struttura acquista rigidità perché il momento di inerzia risultante è paragonabile al momento di un elemento strutturale la cui sezione trasversale risulta composta da due masse poste ad una distanza pari a quella tra le due schiere. Durante la simulazione del processo deformativo si attribuiscono agli elementi strutturali sezioni trasversali di dimensioni pari a 90x15mm, corrispondenti al doppio delle sezioni di progetto. In questo modo, durante la simulazione della messa in forma, il momento di inerzia della sezione è paragonabile alla somma dei due momenti delle sezioni delle aste appartenenti alle due schiere sovrapposte ma ancora indipendenti tra loro. Pur essendo composto da un unico *layer*, il modello realizzato in *Abaqus* presenta, così, lo stesso peso

---

<sup>171</sup> Elemento strutturale bidimensionale.

della costruzione reale e ciò consente di prevedere in maniera corretta le forze necessarie affinché la struttura venga deformata fino a raggiungere la configurazione tridimensionale.

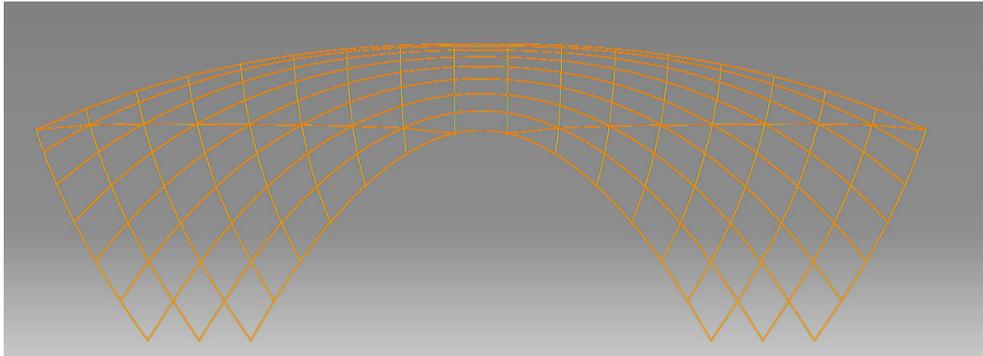
Il progetto considera un sistema di connessione tra gli elementi strutturali costituito da un perno passante; ciò consente la rotazione relativa delle aste lungo il suo asse, impedendo le traslazioni relative. L'asolatura dei fori lungo le aste poste rispettivamente all'estremità superiore e inferiore del reticolo consente una traslazione relativa di circa 5cm (pari alla lunghezza dell'asolatura), al fine di assecondare il processo deformativo. La simulazione di tale fenomeno è consentita attraverso l'inserimento, in corrispondenza dell'intersezione tra le aste, di vincoli cerniera (*hinge*) che consentono la rotazione relativa soltanto attorno ad un asse (in questo caso l'asse del perno) e impediscono tutti gli altri gradi di libertà, garantendo in questo modo la "rombizzazione" dei moduli in fase di deformazione.

Si procede alla discretizzazione di ciascun elemento beam attraverso la creazione di una mesh a elementi finiti e all'assegnazione delle proprietà fisiche e meccaniche del larice/Nord S1, ricavate dall'Eurocodice 5 (UNI EN 11035). Si considera, dunque, un modulo di elasticità (medio) parallelo alle fibre pari a 13 000 [N/mm<sup>2</sup>] e una massa volumica (media) di 600 [kg/m<sup>3</sup>].

I vincoli esterni, applicati in corrispondenza dei 12 nodi adiacenti al suolo, sono modellati come dei carrelli che permettono le rotazioni ma limitano le traslazioni al solo piano orizzontale (x, y).

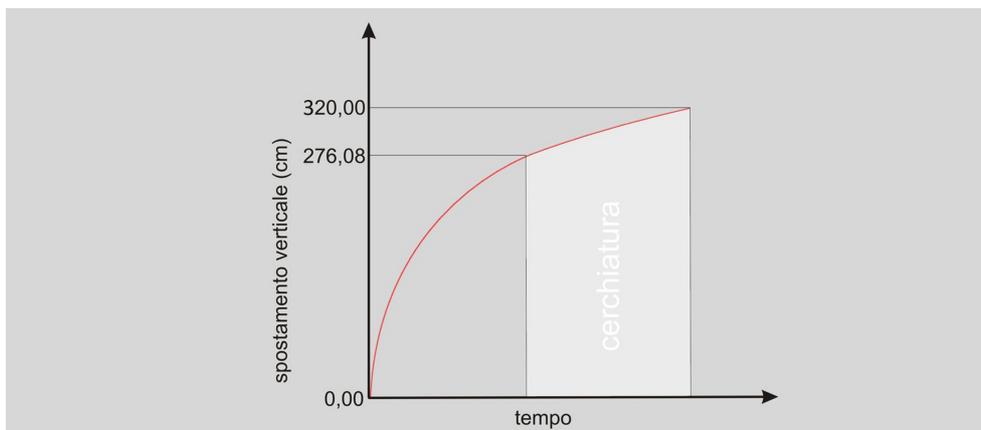
Una volta definito il modello, si è passati alla simulazione della deformazione la quale si innesca per effetto di spostamenti imposti ai nodi suddetti. Questi generano deformazioni graduali fino a quando la distanza tra le porzioni di griglia adiacenti al suolo coincide con le misure di progetto relative alla configurazione deformata; per uno spostamento pari a circa 1,10 m, le diagonali raggiungono le dimensioni finali ma l'altezza in chiave

degli archi (2,00m) e l'altezza massima in chiave di volta (2,76 m) sono inferiori a quelle di progetto.

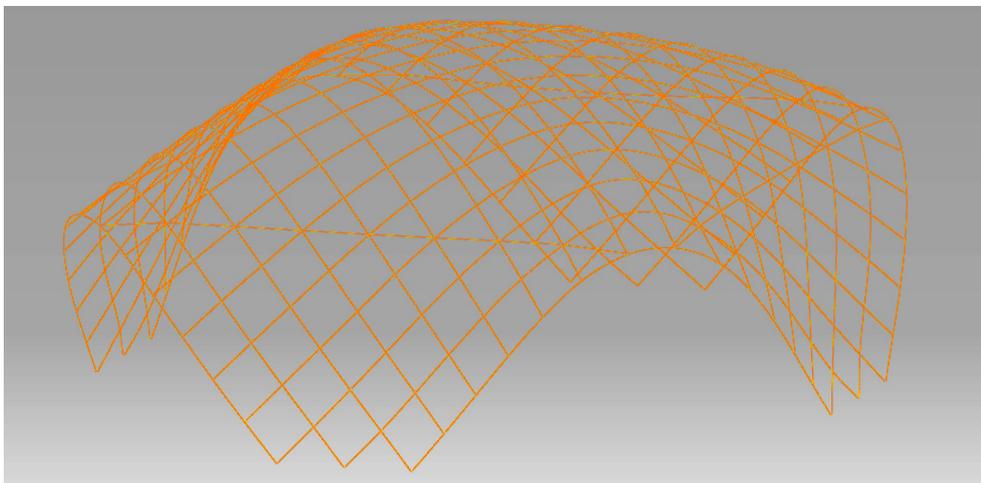


*Fig.43 - Configurazione tridimensionale raggiunta al termine della prima fase di simulazione del processo de formativo.*

Si procede, dunque, alla simulazione della seconda fase del processo costruttivo durante la quale il pre-tensionamento di elementi beam formanti un anello cerchiante posto laddove il progetto prevede la successiva posa in opera degli elementi di irrigidimento, fa crescere la curvatura della *gridshell* fino al raggiungimento della configurazione finale di progetto (altezza in chiave degli archi pari a 2,20 m e altezza in chiave di volta pari a 3,20 m).



*Fig. 44- Schema riassuntivo delle due fasi del processo costruttivo.*



*Fig.45- Configurazione tridimensionale raggiunta al termine della simulazione del processo costruttivo.*

### *3.5 Definizione di un nuovo metodo di montaggio*

A differenza della prima esperienza costruttiva in cui le operazioni di messa in forma hanno richiesto l'istallazione di cristi in più punti del reticolo strutturale, il nuovo metodo di montaggio esclude il ricorso a ponteggi fissi o mobili e ad altri tipi di supporti telescopici; questi, solitamente utilizzati per condurre alcuni punti del graticcio nella posizione finale, possono causare la plasticizzazione o la rottura delle aste, nonché influenzare la configurazione tridimensionale di progetto.<sup>172</sup>

Attraverso l'ottimizzazione delle operazioni di cantiere si intende ottenere una riduzione dei tempi di montaggio rispetto a quelli impiegati per la costruzione del primo prototipo.

Per assicurare che la "messa in forma" della gridshell possa avvenire in condizioni di sicurezza, le operazioni costruttive non devono essere eseguite al di sotto del graticcio ma all'esterno dell'area coperta.

Il sistema di montaggio deve consentire l'applicazione di deformazioni anche molto piccole in modo da rendere possibile il controllo preciso degli spostamenti dei nodi del graticcio strutturale durante l'acquisizione della forma.

La prima sperimentazione ha mostrato la possibilità di contribuire al raggiungimento della configurazione tridimensionale finale mediante l'inserimento degli elementi di irrigidimento diagonali. Nell'ambito delle strategie esecutive messe a punto nei casi noti, la posa in opera delle controventature è eseguita al termine del processo deformativo, con il solo

---

<sup>172</sup> Rilevante criticità delle strategie di cantiere messe a punto nei casi noti riguarda la difficoltà di sollecitare contemporaneamente tutti i nodi, oppure sovraccaricare alcune aree lasciando che quelle vicine siano "trascinate". Il ricorso a strutture provvisorie di supporto consente di portare alcuni punti del graticcio esattamente nella posizione ipotizzata in fase di progetto, ma alla fine del processo le pre-sollecitazioni esercitate vanno rimosse, parte dello stato tensionale nelle aste tende a dissiparsi e solo allora la struttura assume la configurazione definitiva.

scopo di attribuire rigidità alla struttura. Il metodo di montaggio proposto intende realizzare uno o più anelli di trazione laddove il progetto prevede la posa in opera di elementi di irrigidimento diagonali. Tale cerchiatura fa convergere alcuni nodi del graticcio verso il centro, generando un incremento della curvatura dell'intera struttura: la posa in opera delle diagonali contribuisce al raggiungimento della forma tridimensionale di progetto.

La formatura avviene dunque attraverso la successione di due fasi: la prima determina gran parte della deformazione mediante l'applicazione di un sistema di forze nei punti d'attacco a terra della struttura; la seconda genera un ulteriore avvicinamento alla forma finale mediante la messa in trazione di uno o più anelli cerchiati. Tali operazioni costruttive possono essere eseguite anche in maniera alternata. Al termine del processo costruttivo le pre-sollecitazioni impresse alla struttura non vengono dissipate ma assorbite dalle particolari condizioni di vincolo che interessano rispettivamente i nodi ancorati al terreno e quelli ai quali vengono fissati gli elementi di irrigidimento. Se la successione di tali azioni è stata eseguita casualmente durante la costruzione del primo prototipo<sup>173</sup>, risulta programmata in questo nuovo metodo di montaggio.

Mentre il metodo di montaggio messo a punto nell'ambito della prima sperimentazione si fondava sulla sollecitazione dei nodi adiacenti al suolo mediante la trazione esercitata da due paranchi a leva, fissati con altrettante cime ai lati minori della griglia, il nuovo metodo si basa sull'utilizzo di un paranco appositamente progettato che, nel demoltiplicare la forza

---

<sup>173</sup> L'ipotesi costruttiva alla base della prima sperimentazione si fondava sull'idea di esercitare le forze necessarie alla deformazione soltanto in corrispondenza dei nodi d'attacco a terra. A formatura ultimata le dimensioni dei lati e delle diagonali coincidevano con quelle di progetto ma l'altezza degli archi di ingresso e quella in chiave risultava inferiore a quella attesa: ciò era causato dalla tendenza deformativa della struttura che, per il peso del materiale (se pur limitato), tendeva ad abbassarsi in chiave accentuando l'eccentricità dei quattro archi. Per ovviare a tale problema è stata realizzata una cerchiatura al di sopra degli archi, laddove il progetto prevedeva l'installazione delle diagonali di irrigidimento e si è notato come tale operazione garantisse un sostanziale aumento della curvatura nella parte alta della struttura.

necessaria a deformare la griglia dalla configurazione iniziale a quella a doppia curvatura, rende la costruzione rapida ed eseguibile manualmente da soli quattro uomini.

Il paranco è una macchina semplice adatta al sollevamento o allo spostamento di carichi, costituita, nella sua forma più elementare, da due carrucole, di cui una fissa e l'altra mobile. L'efficienza di paranchi che utilizzano due carrucole contrapposte, ad una o più pulegge, dipende dal numero  $n$  delle tratte di corda che entrano ed escono dalla carrucola mobile.

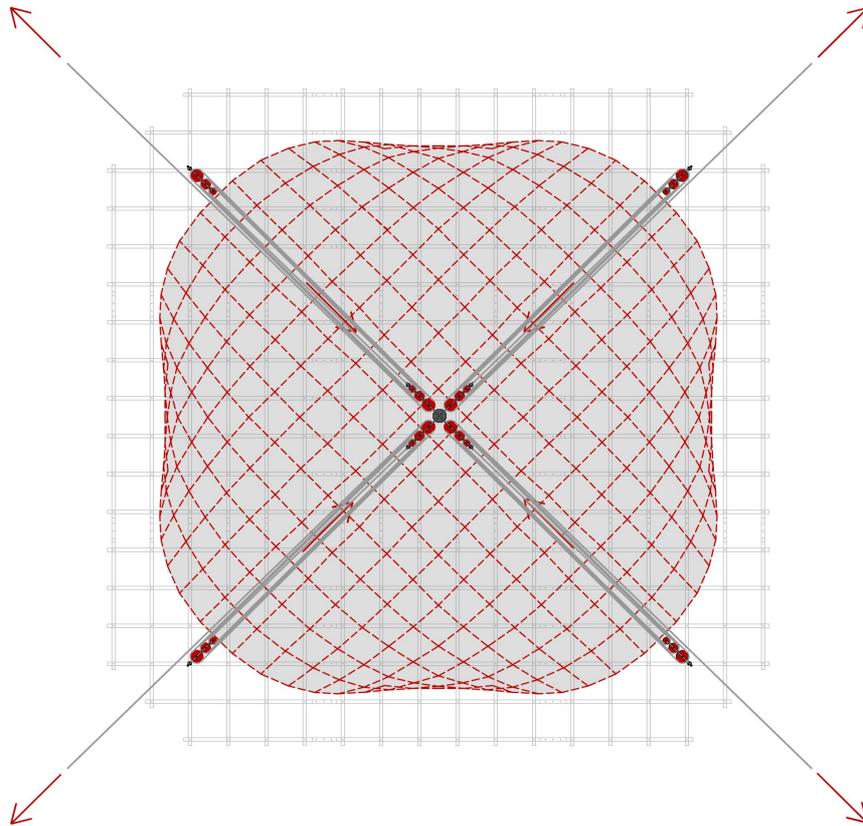
174

La prima operazione da compiere consiste nell'individuazione dell'intensità della forza da esercitare sul reticolo strutturale piano, affinché esso assuma la configurazione tridimensionale desiderata.

Essa è ricavata dal modello matematico realizzato in ABAQUS: quando la struttura nella sua configurazione tridimensionale è sottoposta a un carico uniformemente distribuito pari al proprio peso, si sviluppano alla base reazioni vincolari equivalenti alla forza necessaria alla deformazione, ma con verso opposto. La simulazione del processo costruttivo è articolata in step successivi di deformazione al termine dei quali si calcola il vettore forza, pari a:  $\sqrt{(xa + xb + xc)^2 + (ya + yb + yc)^2}$ , con  $a$ ,  $b$  e  $c$  corrispondenti ai nodi d'attacco a terra. Possiamo affermare che per la "messa in forma" della *gridshell* è necessario imprimere una forza con intensità sicuramente inferiore o uguale al valore massimo (pari a 180kg) riscontrato, nel nostro caso, durante la prima fase del processo deformativo. Affinché il modulo di *gridshell* sia realmente "automontante" tale forza deve essere demoltiplicata in modo che le operazioni di montaggio possano essere eseguite manualmente da soli quattro operai.

---

<sup>174</sup> In particolare, la forza  $F$  necessaria a sollevare un peso  $P$ , risulta pari a:  $P = F + F/m$   
Se consideriamo un sistema ideale in cui l'attrito  $m$  è 1, otteniamo che  $F = P/n$ , con  $n$  pari al numero di tratte. ([www.cnss-ssi.it/3livello/Paranchi.pdf](http://www.cnss-ssi.it/3livello/Paranchi.pdf))



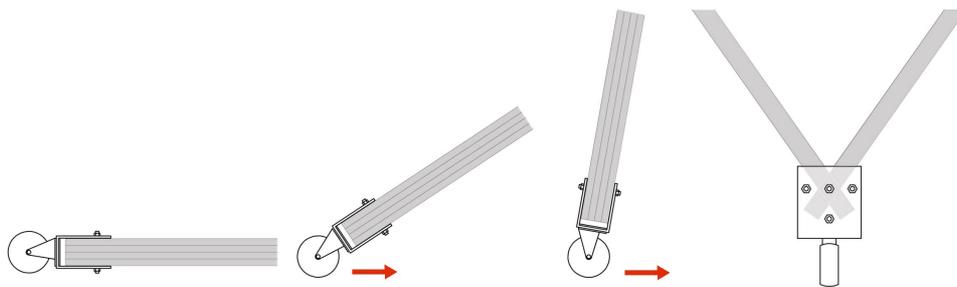
*Fig. 46 - Schema del sistema di montaggio*

Tra i punti medi dei lati minori del reticolo piano e il punto d'intersezione delle diagonali che li collegano, si fissano quattro paranchi. Ciascun di questi è composto da due carrucole di cui una fissa (a due punti d'attacco) e l'altra mobile (a un punto d'attacco), entrambe a puleggia tripla.<sup>175</sup> Le quattro carrucole fisse sono tenute insieme attraverso l'inserimento di un piatto in acciaio posto in corrispondenza del centro del graticcio. Le giunzioni bullonate dei 12 nodi che, a formatura ultimata, risultano adiacenti

<sup>175</sup> Considerando che la forza media esercitata da un uomo equivale a circa 50 kg (Cfr. <http://books.google.com/books?id=ZBIJAAAIAAJ&oe=UTF-8>), basterebbe un paranco con numero di tratte pari a 4, composto, dunque da due carrucole contrapposte, caratterizzate, ciascuna, da due pulegge. La volontà di assicurarsi il buon esito dell'operazione anche in caso di condizioni sfavorevoli (forte attrito) ha spinto ad utilizzare un paranco caratterizzato da 6 tratte.

al suolo, terminano con dei golfari in modo da garantire il passaggio di una cima che collega le 4 carrucole mobili alla struttura.

A differenza del metodo costruttivo messo a punto in occasione della prima sperimentazione, è possibile eseguire le operazioni di montaggio esternamente all'area coperta dal reticolo strutturale: lo spostamento dei 12 nodi appartenenti ai quattro lati minori del reticolo (cui sono fissate le carrucole mobili) è generato tirando l'estremità libere delle cime. Al fine di ridurre al minimo l'attrito con il terreno durante le fasi di montaggio, si fissano, a tali nodi, profili a C in acciaio cui sono saldate delle ruote.

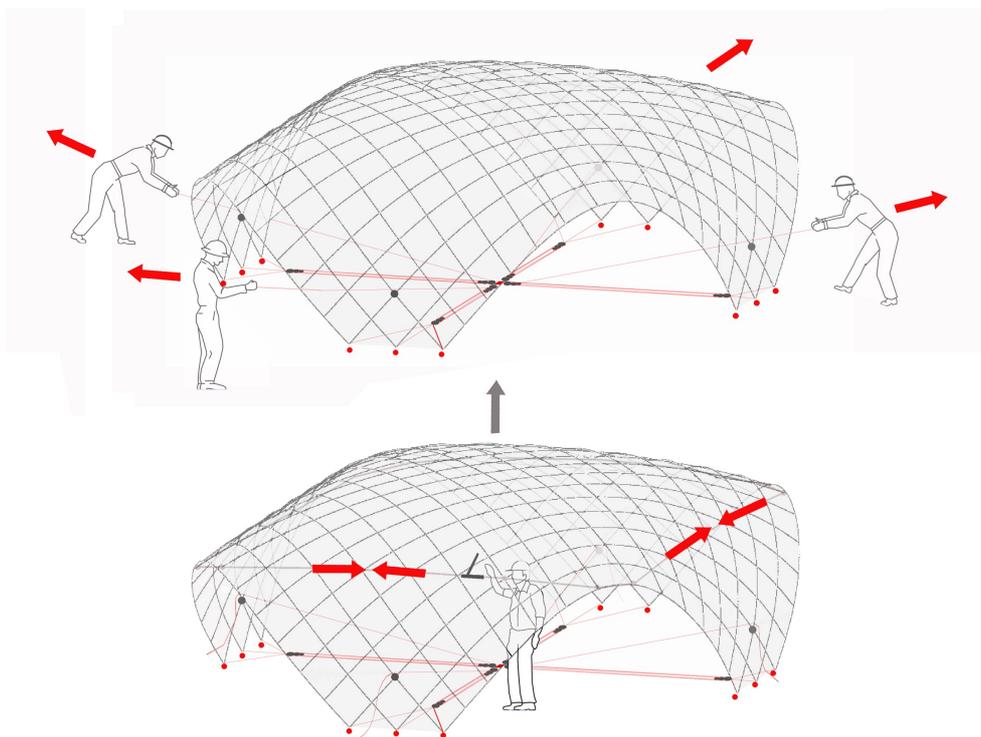


*Fig.47 - Nodo d'attacco a terra durante la fase di deformazione della gridshell*

Le sollecitazioni imposte alla struttura devono essere graduali e non eccessivamente brusche, al fine di evitare fenomeni di rottura nella griglia o in parti di essa. Il passaggio dalla configurazione piana a quella finale a doppia curvatura deve avvenire attraverso *step* successivi al termine dei quali è necessario che i quattro uomini cui è affidato il montaggio della struttura possano cessare di esercitare la propria forza senza che la forma della struttura (fino a quel momento raggiunta) subisca variazioni. In corrispondenza di quattro nodi strutturali posti in prossimità delle quattro carrucole mobili, si fissano altrettanti strozzascotte che, per attrito, equilibrano le tensioni generate all'interno della struttura, evitando che questa si "stenda" tendendo a riassumere la configurazione iniziale piana.

Il graticcio strutturale, già nella configurazione tridimensionale, è condotto nella forma finale di progetto attraverso la messa in trazione di un anello

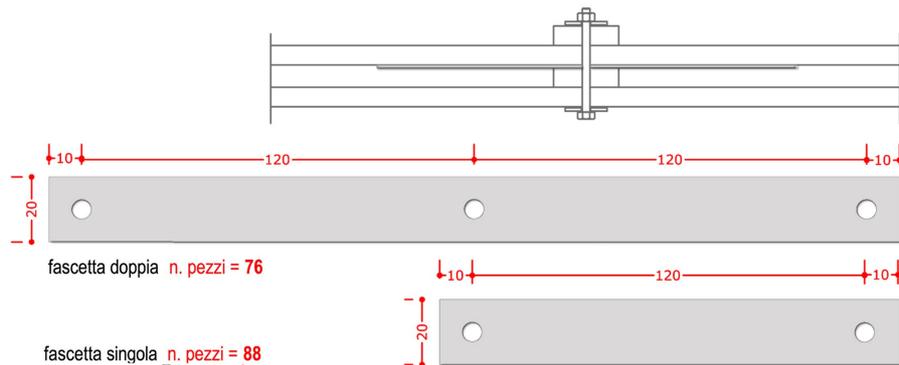
cerchiante realizzato nel punto in cui è prevista la successiva installazione di diagonali di irrigidimento. La cima costituente tale anello è messa in trazione mediante il ricorso a un paranco manuale a leva, in modo da far convergere i nodi verso il centro così da incrementare la curvatura dell'intera struttura.



*Fig.48- Fasi del processo costruttivo.*

Raggiunta la configurazione finale è prevista l'installazione delle diagonali, questa volta non costituite da cavi metallici bensì da due aste in legno sovrapposte e collegate ai nodi strutturali mediante un'interposta fascetta

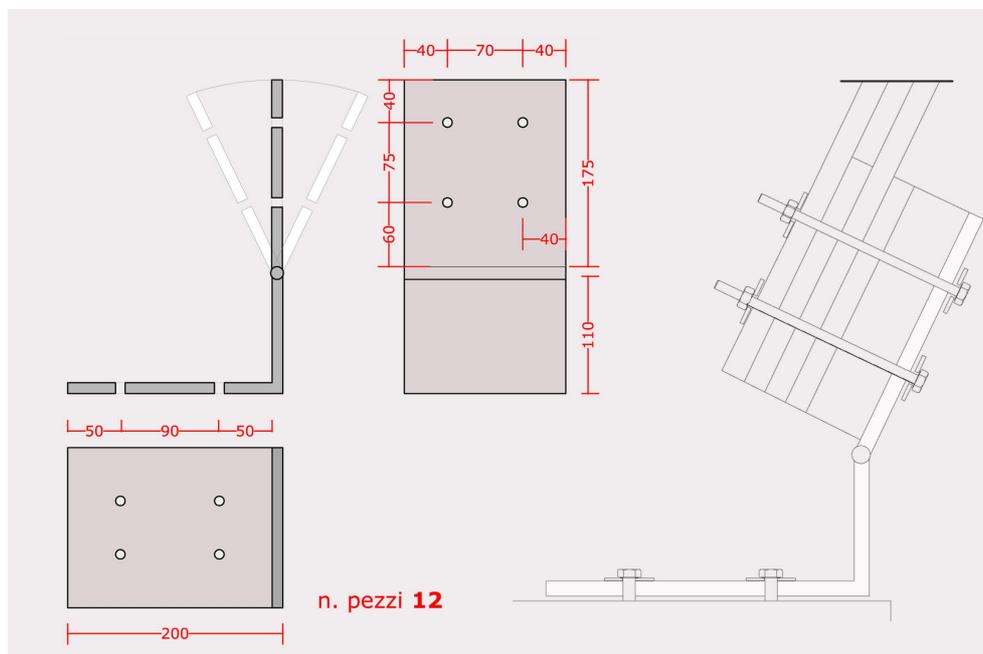
metallica.<sup>176</sup>



*Fig.49- Dettaglio fascette metalliche per l'ancoraggio degli elementi di irrigidimento diagonali*

Soltanto in seguito a questa azione costruttiva, al serraggio dei giunti di connessione e all'ancoraggio al suolo della gridshell, vanno rimossi la cima collegata al paranco a leva e il sistema di carrucole utilizzato nella prima fase di montaggio; in questo modo le sollecitazioni impresse alla struttura durante il processo deformativo non vengono dissipate ma compensate dall'azione esercitata dagli elementi di irrigidimento e dai vincoli esterni caratterizzanti i nodi d'attacco a terra.

<sup>176</sup> oggetto di una domanda di brevetto *Elemento strutturale per una costruzione gridshell, costruzione gridshell includente detto elemento e procedimento per realizzare tale costruzione impiegando detto elemento*, n. RM2009A000227



*Fig.50- nodo d'attacco a terra al termine del processo di messa in forma*

### 3.6 Costruzione di un sistema di copertura "automontante"

#### 3.6.1 Story-board della sperimentazione

Il secondo prototipo è stato realizzato presso lo stabilimento dell'azienda produttrice di strutture in legno *Holzbau sud s.p.a.*, con sede a Calitri.

La fornitura del legname (larice) e la produzione delle aste (incluso taglio, foratura e asolatura) è stata a carico del partner industriale.



*Fig.51- Per la costruzione della gridshell è richiesta la produzione di aste lignee per un totale di 648,5 ml di lunghezza e 0,44 mc di volume. I fori circolari presentano un diametro di 7mm mentre i fori asolati hanno lunghezza 4 cm e spessore 7mm.*

Gli elementi strutturali sono stati assemblati per formare i macromoduli costituenti il graticcio piano di partenza: le aste asolate sono state poste all'estremità della griglia e le fascette metalliche sono state aggiunte al normale giunto di connessione nei punti in cui il progetto prevedeva la successiva integrazione di elementi di irrigidimento diagonali.



*Fig.52- Fascette metalliche per l'integrazione di elementi di irrigidimento diagonali (sinistra) e giunzione bullonata tra le aste (destra)*



*Fig.53- i macromoduli nella configurazione chiusa*

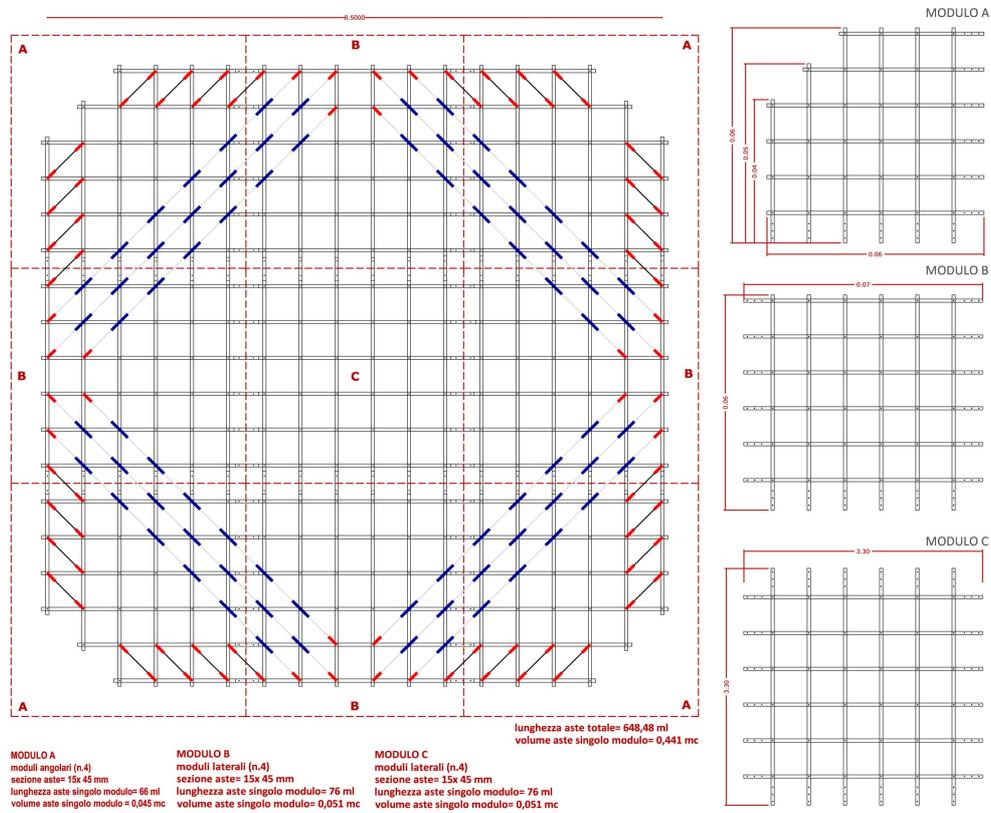


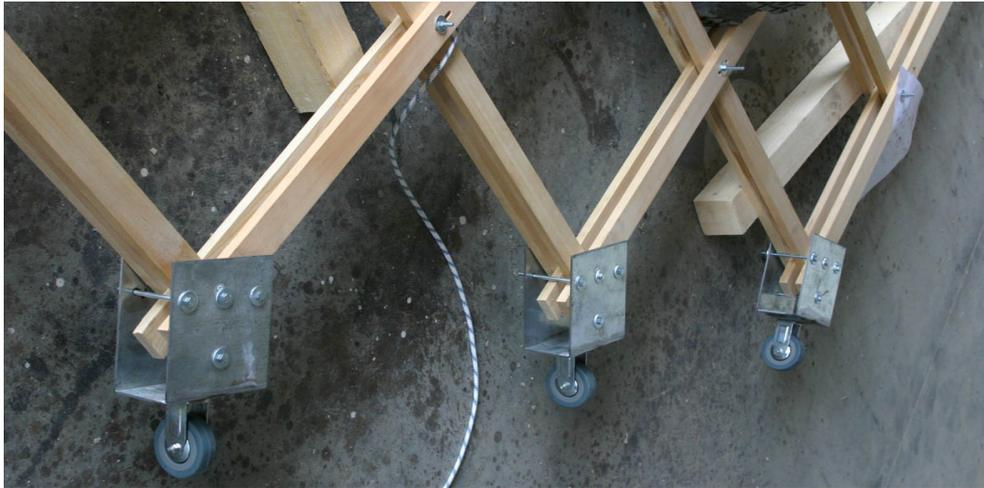
Fig.54- schema di assemblaggio del graticcio strutturale attraverso il collegamento dei nove macromoduli prefabbricati

I macromoduli così conformati sono stati poi trasportati, nella configurazione chiusa, al sito di costruzione, per poi essere dispiegati e collegati tra loro mediante sovrapposizione bullonata.



Fig.55- macromodulo in fase di apertura (sinistra) e assemblaggio di macromoduli contigui attraverso sovrapposizione bullonata (destra)

Ai 12 nodi che, a formatura ultimata, risultano adiacenti al terreno, sono stati fissati i profili a C in acciaio cui erano state precedentemente saldate delle ruote.



*Fig.56- profili a C fissati ai nodi d'attacco a terra*

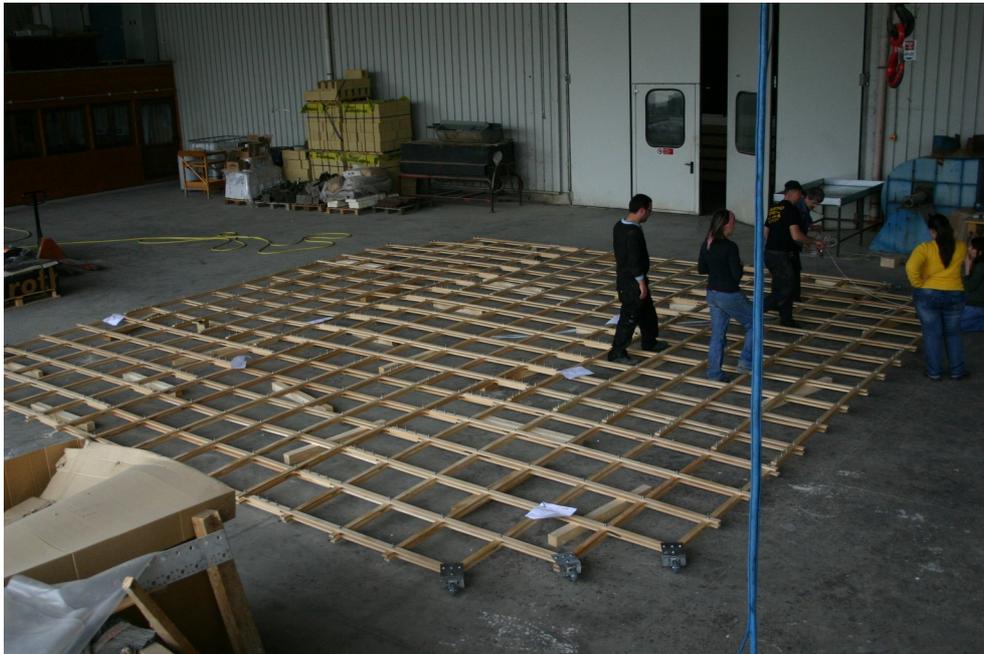
Le quattro carrucole fisse sono state collegate al piatto in acciaio posto in corrispondenza del centro del graticcio mentre quelle mobili sono state connesse alla struttura mediante cime passanti per i nodi adiacenti al terreno.



*Fig.57- carrucole fisse poste in corrispondenza del centro del graticcio strutturale*

La prima fase di messa in forma ha finalmente inizio. Quattro persone, poste in corrispondenza dei lati minori del graticcio, cominciano a tirare

contemporaneamente le estremità libere delle cime e la gridshell inizia a "montare". Ciascuno *step* di deformazione è seguito da un rapido monitoraggio che consiste nella verifica degli spostamenti dei nodi sollecitati<sup>177</sup>; in questa fase gli operai cessano di esercitare la propria forza e le cime vengono fissate agli strozzascotte posti in prossimità delle quattro carrucole mobili. Man mano che la *gridshell* prende forma, si effettua un confronto tra i dati dimensionali rilevati alla fine delle diverse fasi di montaggio e quelli ricavati dalla simulazione virtuale del processo costruttivo<sup>178</sup>.



*Fig.58- produzione del graticcio strutturale attraverso l'assemblaggio dei 9 macromoduli*

<sup>177</sup> Si verifica che le lunghezze delle diagonali e le ampiezze degli archi di ingresso siano uguali ; in caso contrario ciascuna cima può essere tirata singolarmente in modo da garantire la perfetta simmetria della struttura.

<sup>178</sup> Il confronto tra il modello virtuale e la costruzione reale si fonda sulla verifica della corrispondenza, a parità di spostamento orizzontale, dell'altezza massima degli archi di ingresso e della volta.

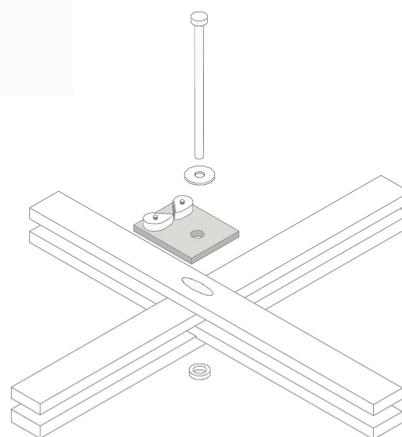
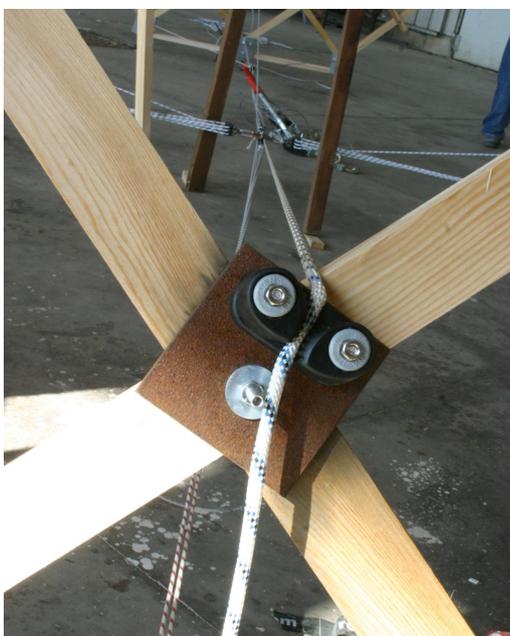


*Fig. 59-prima fase di messa in forma del graticcio strutturale*

La prima operazione costruttiva termina quando la struttura raggiunge un'altezza in chiave di volta pari a 2,75 m.



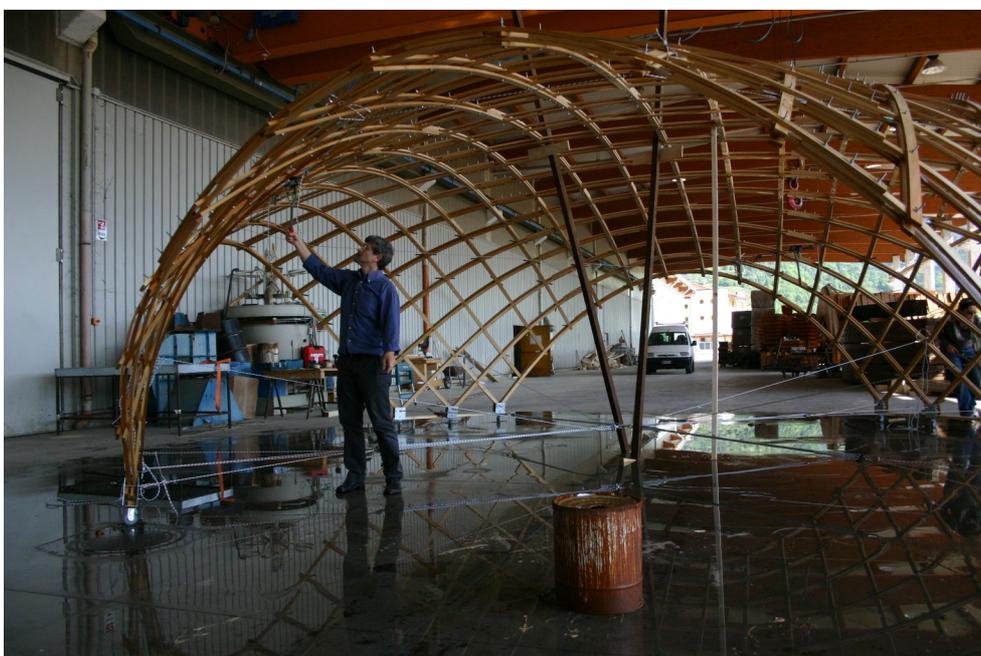
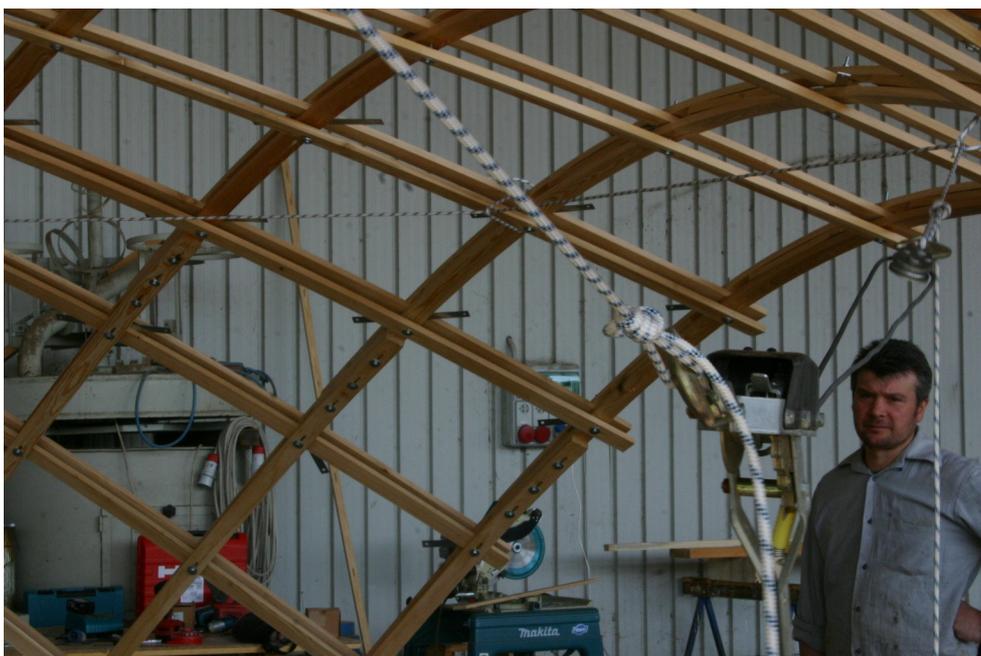
*Fig. 60- Configurazione raggiunta al termine della prima fase del processo costruttivo.*



*Fig.61- Dettaglio dello strozzascotte posto in prossimità di ciascuna delle carrucole mobili.*

Inizia, dunque, la seconda fase di montaggio basata sull'incremento della curvatura dell'intera struttura attraverso la messa in trazione di una cima,

posta al di sopra degli archi (laddove il progetto prevede la posa in opera delle controventature), mediante il ricorso a un paranco a leva.



*Fig. 62-Seconda fase del processo costruttivo.*

Una volta raggiunta l'altezza di progetto si provvede alla posa in opera dei diagonali e alla successiva rimozione dell'anello di trazione.



*Fig.63- Copertura al termine del processo deformativo.*

Dal momento che il prototipo è stato costruito all'interno dello stabilimento dell'Holzbau, non è stato possibile realizzare il sistema di ancoraggio al terreno progettato e, una volta rimosso il sistema costituito dai 4 paranchi, le tensioni sono state assorbite da cime diagonali fissate ai nodi d'attacco a terra mediante golfari.

### 3.6.2 Scheda tecnica del sistema di copertura

La redazione della scheda tecnica del sistema di copertura oggetto della sperimentazione si fonda sull'articolazione in "blocchi" funzionali di aggregazione delle informazioni suggerita dalla Norma Uni 8690/3.<sup>179</sup>

Il *blocco 1* contiene informazioni sull'origine del sistema, ovvero i dati anagrafici relativi alla ditta produttrice.

Il *blocco 2* fornisce indicazioni morfologico-descrittive sul sistema e sulle sue principali caratteristiche tecniche, ne identifica i materiali costituenti e analizza le modalità con cui esso viene commercializzato.

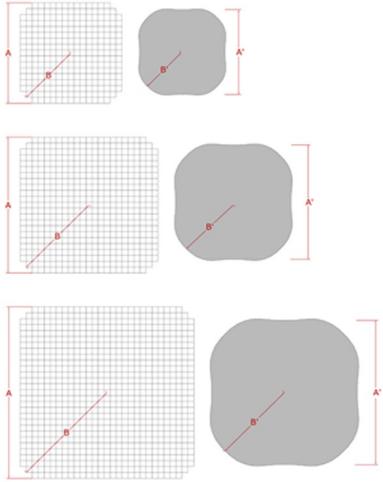
Il *blocco 3* approfondisce i requisiti connotanti la costruzione e le informazioni relative al processo costruttivo.

Il *blocco 4* fornisce istruzioni per il montaggio del sistema di copertura, dando anche indicazioni sui materiali e gli attrezzi necessari per la costruzione.<sup>180</sup>

---

<sup>179</sup> Gottfried Arie, *Manuale di progettazione edilizia. Fondamenti, strumenti, norme, vol. III, Progetto tecnico e qualità*, Hoepli, Milano, 2006, pp.166-167.

<sup>180</sup> La Norma Uni 8690/3 suggerisce anche la redazione di un *blocco 5*, che contiene informazioni descrittive su avvenuti impieghi del prodotto e il *blocco 6*, finalizzato a fornire informazioni sugli aspetti economico-commerciali del sistema. Si è scelto di non approfondire tali informazioni nell'ambito della scheda relativa al sistema di copertura.

<b>DEFINIZIONE DEL SISTEMA</b>																									
	Sistema di copertura costituito da graticcio ligneo piano realizzato mediante sovrapposizione bullonata di n moduli prefabbricati per la costruzione di <i>gridshell</i> , e successivamente deformato fino al raggiungimento della configurazione tridimensionale di progetto.																								
<b>ANAGRAFICA</b>																									
	<b>Denominazione prodotto:</b> <i>Woodome</i> <b>Azienda produttrice:</b> <i>Holzbau Sud Spa</i> Zona Industriale di Calitri - 83045 Calitri (AV)																								
<b>DIMENSIONAMENTO</b>																									
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>A (m)</th> <th>H (m)</th> <th>Area Stesa (mq)</th> <th>Area coperta (mq)</th> <th>n.moduli n</th> <th>n.nodi n</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>8</td> <td>3</td> <td>72</td> <td>50</td> <td>9</td> <td>312</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>3,75</td> <td>131</td> <td>78</td> <td>16</td> <td>536</td> </tr> <tr> <td>12</td> <td>4,60</td> <td>200</td> <td>113</td> <td>25</td> <td>816</td> </tr> </tbody> </table>	A (m)	H (m)	Area Stesa (mq)	Area coperta (mq)	n.moduli n	n.nodi n	8	3	72	50	9	312	10	3,75	131	78	16	536	12	4,60	200	113	25	816
A (m)	H (m)	Area Stesa (mq)	Area coperta (mq)	n.moduli n	n.nodi n																				
8	3	72	50	9	312																				
10	3,75	131	78	16	536																				
12	4,60	200	113	25	816																				
<b>INFORMAZIONI TECNICHE DESCRITTIVE</b>																									
<p>Il Sistema di copertura <i>Woodome</i> è realizzato a partire da macromoduli prefabbricati composti da quattro schiere sovrapposte di aste in legno di larice con sezione trasversale pari a 15 x 45 mm, assemblate a secco a formare una griglia a maglia quadrata con modulo 50 cm, iscrivibile in un quadrato 3x3 mt. I giunti cerniera tra le aste sono formati da una barra filettata, doppia rondella, bulloni e predisposizione per la successiva integrazione degli elementi di irrigidimento diagonali. Ciascun modulo pre-assemblato con i giunti non serrati può essere piegato in forma di parallelepipedo di lunghezza non superiore a 6 metri e rapidamente dispiegato in cantiere dove assume di nuovo la forma quadrata. I moduli sono di agevole movimentazione, trasportabili con mezzi ordinari, rapidamente montabili in cantiere, facilmente manutenibili (grazie anche alla possibilità di sostituire un'asta per volta) e riciclabili. Assemblato il graticcio strutturale attraverso la sovrapposizione bullonata di macromoduli contigui, si procede alla "messa in forma" fino al raggiungimento della configurazione tridimensionale finale.</p>																									

## REQUISITI CONNOTANTI

### **Demolibilità (NORMA UNI 7867)**

*Attitudine all'abbattimento parziale o totale ed alla rimozione.*

Il sistema di assemblaggio a secco risulta totalmente reversibile: la costruzione può essere demolita attraverso il semplice smontaggio delle giunzioni bullonate, eseguibile manualmente o con il ricorso a un avvitatore/ svitatore elettrico, da manodopera scarsamente qualificata e senza il ricorso a mezzi meccanici speciali.

### **Recuperabilità (NORMA UNI 8290)**

*Attitudine alla riutilizzazione di materiali o di elementi tecnici dopo demolizione e rimozione.*

Al termine del ciclo di vita della costruzione è possibile prevedere un reimpiego delle aste lignee per la realizzazione di un prodotto diverso e il riutilizzo dell'acciaio, o la sua reintroduzione diretta nel ciclo di produzione da cui è stato generato, sotto forma di rottame ferroso. La quantità di materiale da trasportare a discarica è, in ogni caso, nulla.

**Separabilità delle componenti** ( Ernesto Antonini, Giovanni Mucelli, Nicola Sinopoli, *Sostenibile come un rifiuto*, Costruire n. 207, settembre 2000)

La costruzione è costituita da parti in materiali disomogenei ma la reversibilità del giunto di connessione tra le aste rende possibile e agevole separare tali componenti al fine di facilitare la loro immissione in processi di trattamento – riciclo.

### **Sostituibilità (NORMA UNI 8290)**

*Attitudine a consentire la collocazione di elementi tecnici al posto di altri.*

I giunti cerniera tra le aste, formati da una barra filettata, doppia rondella e bullone, consentono la semplice sostituzione delle stesse qualora dovessero verificarsi fenomeni di rottura o per scopi manutentivi.

### **Utilizzo di materiali, elementi e componenti a ridotto carico ambientale (NORMA UNI 11277)**

*I materiali, gli elementi e i componenti devono avere un ridotto carico energetico, durante tutto il ciclo di vita, e ridotte emissioni inquinanti.*

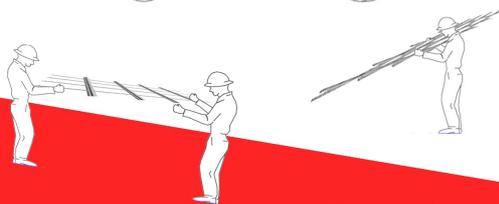
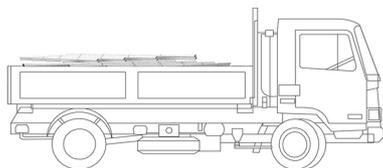
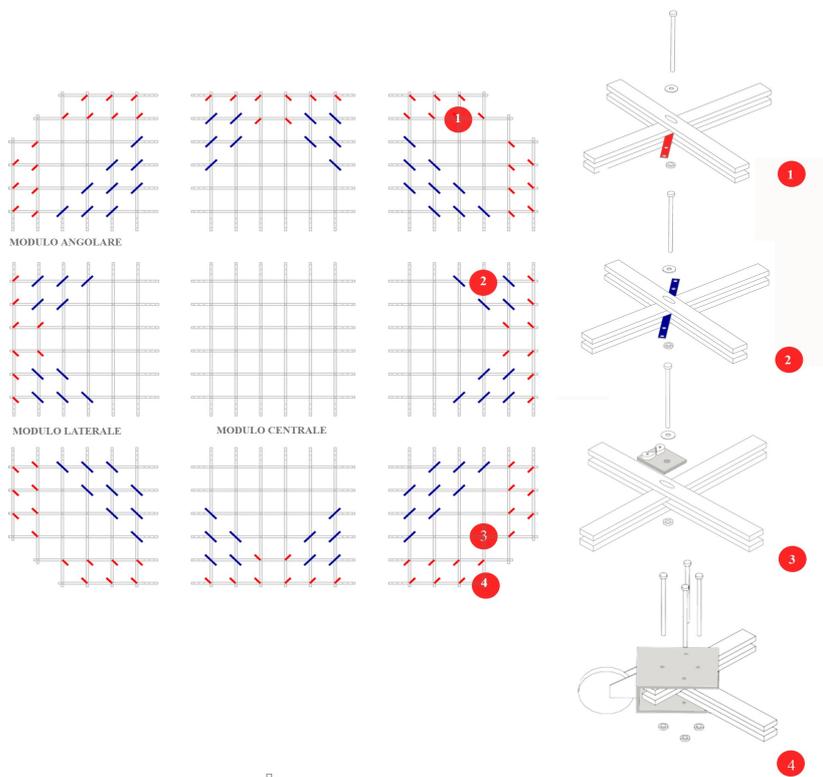
Il sistema di copertura è realizzato a partire da semilavorati in legno di piccole dimensioni provenienti da bosco ceduo. I processi lavorativi del legno sono caratterizzati dalla semplicità di esecuzione, dalla brevità dei tempi di lavorazione e da un ridotto consumo energetico nella produzione ( la riproduzione avviene continuamente per mezzo dell'energia solare) e nella fase di trasformazione ( la quantità maggiore di energia spesa nella lavorazione del legno è assorbita dalla segazione).

## INFORMAZIONI RELATIVE AL PROCESSO COSTRUTTIVO<sup>181</sup>

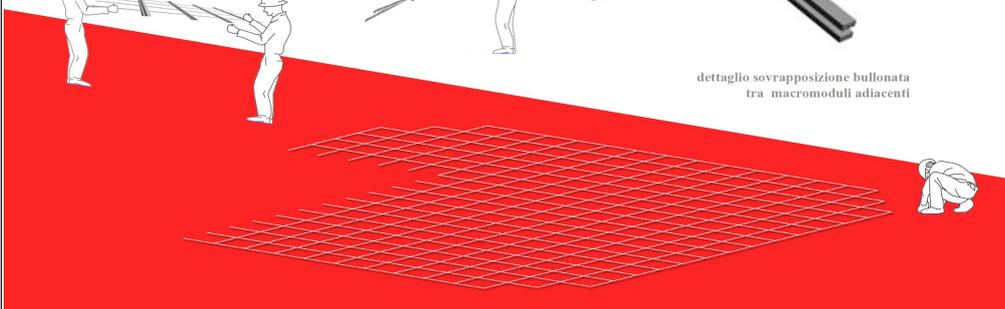
- Tempo necessario al montaggio del sistema di copertura: **7,5 ore**
- Quantità di manodopera: **4**
- Grado di qualificazione della manodopera: **basso**
- Strutture provvisorie utilizzate: **assenti**

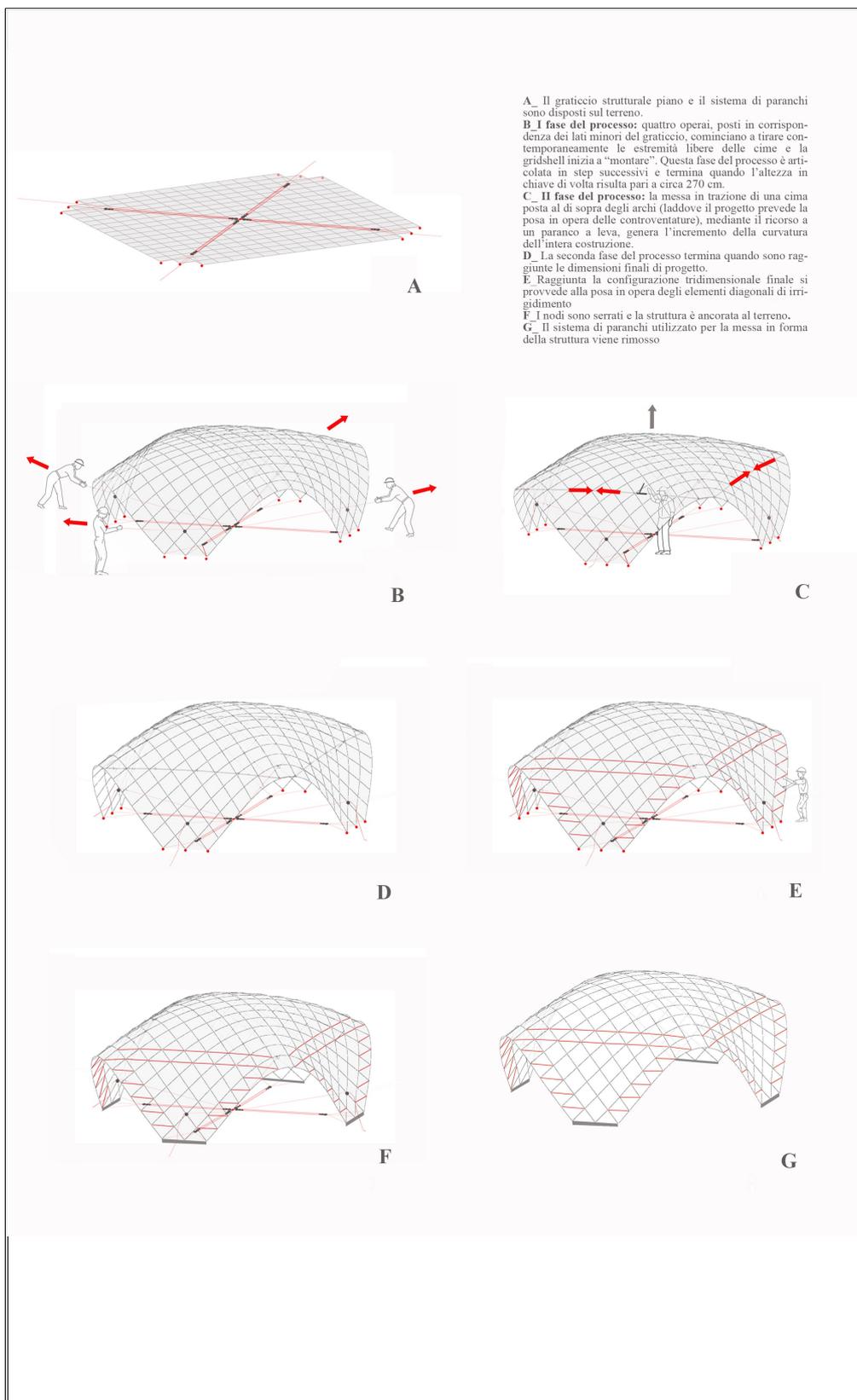
<sup>181</sup> I dati sono relativi al sistema di copertura *Woodome small*.

## MONTAGGIO



dettaglio sovrapposizione bullonata tra macromoduli adiacenti





### 3.5.3 Premialità e criticità emerse dalla seconda sperimentazione

La realizzazione del secondo prototipo è stata eseguita senza il ricorso a strutture provvisorie di supporto e ha richiesto tempi di montaggio inferiori rispetto a quelli impiegati durante la prima esperienza costruttiva.

	tempo totale (ore)	manodopera (n)	tempo di lavoro (ore)	per ogni modulo (ore)
assemblaggio grid in piano	1,5	4	0,166666667	0,2
messa in forma	2	4	0,222222222	0,25
montaggio controventatura	2	4	0,222222222	0,25
serraggio bulloni	2	4	0,222222222	0,25
	<b>7,5</b>			<b>0,95</b>

Fig. 64- scheda riassuntiva tempi di lavorazioni impiegati per la costruzione del secondo prototipo.

La configurazione tridimensionale finale è raggiunta in sole due ore attraverso la successione delle due fasi del processo deformativo, fondate rispettivamente sull'applicazione di un sistema di forze nei punti d'attacco a terra della struttura e sulla messa in trazione di un anello cerchiante laddove il progetto prevede la successiva integrazione degli elementi diagonali di irrigidimento.

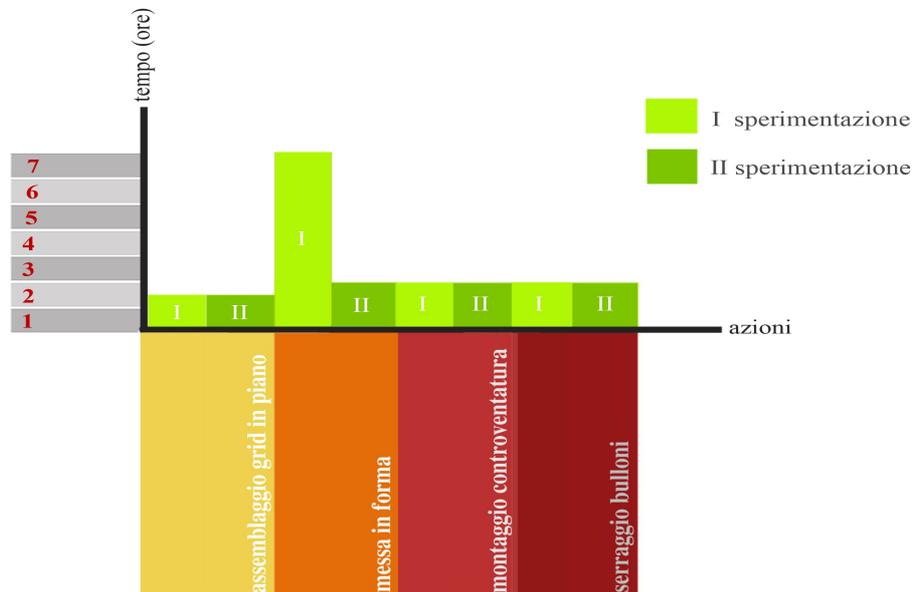
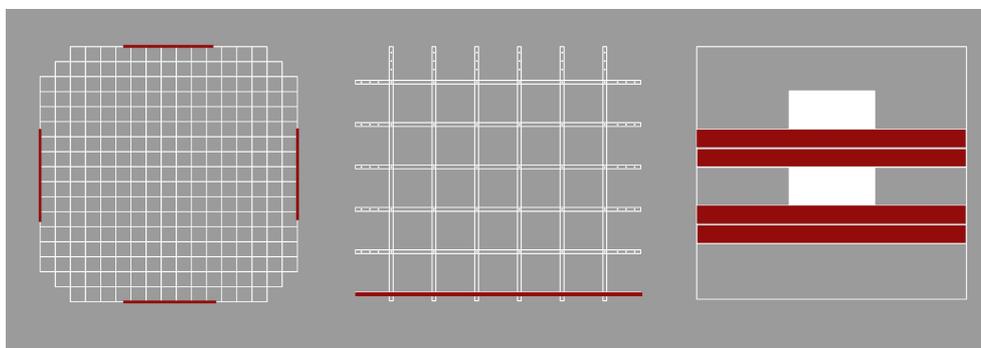


Fig. 65- Confronto tra i tempi di lavorazione impiegati nelle due sperimentazioni

La “messa in forma” della *gridshell* è avvenuta in condizioni di sicurezza: tutte le azioni costruttive sono state eseguite esternamente all’area coperta ad eccezione della messa in trazione dell’anello cerchiante e della posa in opera delle diagonali di irrigidimento, realizzate al di sotto del graticcio, ma soltanto quando la struttura aveva raggiunto un’altezza tale da renderne agevole l’esecuzione.

Il continuo monitoraggio della copertura durante le differenti fasi del processo deformativo ha evidenziato la congruenza tra i dati dimensionali ricavati dalla simulazione virtuale del processo costruttivo e quelli reali.

Durante la graduale deformazione del graticcio strutturale si è verificato un fenomeno di rottura in chiave di uno degli archi d’ingresso, imputabile all’eccessiva curvatura assunta dalla struttura in quel punto. Per ovviare a tale problema si è effettuata una parzializzazione della sezione trasversale delle aste poste in corrispondenza dei quattro macromoduli laterali.



*Fig.66- Ipotesi di miglioramento del sistema di copertura attraverso la parzializzazione della sezione trasversale delle aste poste in corrispondenza dei quattro macromoduli laterali.*

## *Conclusioni*

La scarsa diffusione delle *gridshell post-configurate* è ascrivibile alla difficoltà di determinare e rappresentare la forma tridimensionale in fase di progetto e, soprattutto, all'alto grado di complessità del particolare processo costruttivo, dovuto principalmente ai tempi lunghi di produzione del graticcio piano, all'eccessiva pre-sollecitazione dei nodi in fase di deformazione e alla necessità di utilizzo di mezzi di cantiere appositamente progettati o costosi. La ricerca si è posta l'obiettivo di superare i limiti riscontrati nell'ambito delle strategie esecutive messe a punto nei casi noti attraverso la definizione di un metodo costruttivo innovativo, basato sull'applicazione di un sistema di scomposizione del graticcio strutturale in macromoduli prefabbricati e dispiegabili e sulla sollecitazione, in fase di montaggio, esclusivamente dei nodi che in fase di esercizio saranno sottoposti a condizioni particolari di vincolo.

La fattibilità della strategia esecutiva individuata è verificata attraverso due sperimentazioni: l'ipotesi intuitiva di partenza, verificata mediante la costruzione di un primo prototipo del sistema di copertura *gridshell*, appositamente progettato, ha consentito di acquisire nuove conoscenze che si sono concretizzate nella seconda esperienza costruttiva, condotta con il supporto dell'azienda produttrice di strutture in legno *Holzbau sud s.p.a.*

La prima sperimentazione ha costituito, pertanto, un importantissimo strumento cognitivo che ha reso possibile un sensibile affinamento dell'ipotesi di partenza. In primo luogo, le rilevanti incongruenze riscontrate tra il modello in scala realizzato in fase di progetto e la struttura reale hanno messo in evidenza i limiti dei metodi empirici di ricerca della forma: i modelli fisici, prescindendo dalle proprietà effettive del materiale, non riescono a prevedere eventuali fattori che possano alterare, in fase di costruzione, le curvature in gioco. Per questo motivo la ricerca si è orientata verso l'utilizzo di un software di calcolo agli elementi finiti con lo scopo di

definire un protocollo informatizzato di ricerca della forma basato sulla simulazione del processo costruttivo.

La volontà di escludere, in fase di montaggio, il ricorso a ponteggi fissi o mobili e ad altri tipi di supporti telescopici, di ottenere una riduzione dei tempi di costruzione attraverso l'ottimizzazione delle operazioni di cantiere e di garantire che la "messa in forma" della *gridshell* potesse avvenire in condizioni di sicurezza, attraverso la successione di operazioni costruttive eseguite all'esterno dell'area coperta, ha poi portato alla modifica del protocollo di montaggio.

I dati ottenuti dalla simulazione virtuale del processo costruttivo, nonché l'efficacia delle modifiche apportate al sistema di montaggio, sono stati verificati attraverso la costruzione del secondo prototipo.

I risultati raggiunti sono destinati in primo luogo all'industria: l'applicazione del sistema modulare per la prefabbricazione del graticcio strutturale e la definizione di un protocollo di montaggio fondato sulla successione di operazioni semplici e rapide, consentono di intraprendere la strada di una progressiva industrializzazione di tale tipologia costruttiva. La tesi è rivolta anche ai progettisti del settore cui potrà risultare più facile la valutazione delle strategie esecutive da adottare, perché potranno avvalersi di un metodo informatizzato di simulazione del processo costruttivo che consente di individuare in maniera esatta le ricadute che determinate scelte di progetto possono avere sulla forma finale della struttura.

Si ritiene che la validità dei principi su cui si fonda la strategia esecutiva proposta possa prescindere dalle caratteristiche morfologiche e dimensionali del manufatto che si progetta, mentre il metodo di montaggio utilizzato potrebbe aver bisogno di alcune modifiche e implementazioni nel caso di una costruzione *gridshell* di maggiori dimensioni. In sostanza, l'ipotesi di articolare il processo costruttivo nelle due fasi consistenti rispettivamente nell'applicazione di un sistema di forze nei punti d'attacco a terra della struttura e nella messa in trazione di uno o più anelli cerchianti

posti laddove il progetto prevede la posa in opera di controventature, rappresenta una strategia costruttiva certamente vantaggiosa; per contro, le modalità di sollecitazione dei nodi suddetti possono variare di caso in caso: il ricorso a un sistema di pulegge appositamente progettato, in grado di demoltiplicare la forza necessaria a deformare la struttura dalla configurazione piana a quella a doppia curvatura, rendendo il processo costruttivo rapido e totalmente a carico di pochi uomini, potrebbe non essere adatto alla costruzione di *gridshell* con diverse caratteristiche formali.

Nel caso di costruzioni *gridshell* di uguale forma ma maggiori dimensioni rispetto al sistema di copertura oggetto della sperimentazione, sarebbe sufficiente aumentare il numero di macromoduli prefabbricati e, eventualmente, incrementare il numero di pulegge costituenti il paranco. Più in generale, si ipotizza che il sistema di montaggio utilizzato si adatti bene alla costruzione di *gridshell* con forme caratterizzate da superfici di rivoluzione, dove, cioè, è possibile individuare anelli cerchianti lungo i quali imprimere le sollecitazioni necessarie al montaggio. La costruzione di strutture con configurazioni prive di assi di simmetria, in cui risulta estremamente complessa la creazione di cerchiature in corrispondenza dei nodi d'attacco a terra e delle controventature, potrebbero richiedere la ricerca di differenti modalità d'applicazione delle sollecitazioni necessarie alla messa in forma della *gridshell*.

Possibile e auspicabile sviluppo di questa tesi è un doppio tipo di industrializzazione per la parziale prefabbricazione di *gridshell*. Il primo tipo discende dagli approfondimenti della prima sperimentazione effettuata, il cui aspetto veramente innovativo è il pre-assemblaggio in officina dei moduli che compongono il graticcio piano, qualunque sia la sua dimensione; ciò significa accelerare in modo significativo le operazioni di montaggio senza gravare sui costi di trasporto perché il modulo 3x3 metri pre-assemblato con i giunti non serrati può essere piegato in forma di parallelepipedo di lunghezza non superiore a 6 metri e rapidamente

dispiegato in cantiere dove assume di nuovo la forma quadrata. I moduli sono leggeri (quindi di facile movimentazione), facilmente trasportabili con mezzi ordinari, rapidamente montabili in cantiere, facilmente manutenibili (grazie anche alla possibilità di sostituire un'assicella per volta) e riciclabili. Non si esclude la possibilità che, attraverso la collaborazione con la Holzbau Sud, il modello sperimentato e oggetto della tesi, nel suo insieme, possa diventare, attraverso ulteriori accorgimenti e miglioramenti, un prodotto seriale disponibile a entrare nel mercato dei gazebo o dei pergolati (il secondo tipo di industrializzazione). La struttura progettata, composta dai moduli pre-assemblati suddetti, grazie al procedimento costruttivo proposto è leggera, facilmente manutenibile e soprattutto molto rapidamente montabile.

A queste considerazioni va aggiunta quella più generale relativa alle peculiarità del legno che già in sé è materiale di eccellenza nel settore della prefabbricazione, come afferma Paolo Lavischi, infatti, *«le possibilità di prefabbricazione che il legno offre sono coerenti con l'obiettivo di ridurre tempi e rischi in cantiere, migliorando al tempo stesso le prestazioni e la durabilità dell'edificio. Il legno si presta molto bene alla prefabbricazione in virtù di alcune intrinseche caratteristiche: leggerezza (...), ciclo di lavorazione interamente a secco (...), elevata adattabilità in cantiere.»*<sup>182</sup>

---

<sup>182</sup> Lavischi Paolo, *Legno strutturale*, in *Pre-fabbricazione*, "Arketipo" supplemento 7/2010.

## *Bibliografia*

### **Testi di carattere generale**

Campioli Andrea, *Il contesto del progetto*, FrancoAngeli, Milano, 1984.

Campioli Andrea, Nardi Guido, Anna Mangiarotti, *Frammenti di coscienza tecnica*, FrancoAngeli, Milano, 1986.

Gangemi Virginia, *Architettura e tecnologia appropriata*, FrancoAngeli, Milano, 1985.

Guazzo Giovanni, Prefazione in Guazzo Giovanni et al., *Eduardo Vittoria*, Gangemi editore, Roma, 1995.

La Creta Rosalba (a cura di), *L'architetto tra cultura e progetto*, FrancoAngeli, Milano, 1994.

Losasso Mario (a cura di), *Progetto e innovazione*, Clean, Napoli, 2005.

Losasso Mario (a cura di), *La casa che cambia*, Clean, Napoli, 1997.

Nardi Guido, *Le nuove radici antiche*, FrancoAngeli, Milano, 1986.

Nardi Guido, *Innovazione. Sue caratteristiche nell'architettura*, in Zanelli Alessandra (a cura di), *Ricerche di tecnologia dell'architettura*, Clup, Milano, 2000.

Nardi Guido, *Percorsi di un pensiero progettuale*, Clup, Milano, 2003.

F. Neumeyer, *Mies van der Rohe. Le architetture e gli scritti*, Skira, Milano 1997.

Vitale Augusto et al., *Argomenti del costruire contemporaneo*, FrancoAngeli, Milano, 1996.

### **Gusci a graticcio (Gridshell)**

#### Testi

De Gotzen, Laner F., *La chiglia rovesciata*, Franco Angeli, 1989.

Deming Mark K., *Halle au blé (coupole de la )*, s.v. in Aa.vv., *L'art de l'ingénieur*, cit., p.220.

Roland Conrad, *Frei otto: Structures*, Longman, 1970.

Mc Quaid M., *Shigeru Ban*, Phaidon, New York, 2003.

## Articoli

Bulenda Th., Knippers J., Stability of grid shells, Computers Structures n.79, 2001.

Colabella Sofia, Drappeggio strutturale, in "Costruire", n.300, maggio 2008.

Colabella Sofia, *Gridshell, tecnologia delle forme complesse*, in Perriccioli Massimo, (a cura di), *L'officina del pensiero tecnologico*, Alinea, Firenze, 2010.

Colabella Sofia, *Gridshell post- formate in legno*, in Eurau '10, Atti del Convegno, 2010.

Dickson M., Harris R., *The Downland Grid Shell Innovative timber design*, The Royal Academy of Engineering publications, Imgenia Issue 18, Febbraio/Marzo 2004.

Dickson M., *Frei Otto' s life's work: an inspiration for all*, The Structural Engineers, Maggio 2005.

Happold Edmund, Liddell Ian, *Timber lattice roof for the Mannheim Bundesgartenschau*, ed. The structural Engineers, n.3, vol.53, 1975.

Happold Edmund, Liddell Ian, *Timber lattice roof for the Mannheim Bundesgartenschau*, ed. The structural Engineers, n.7, vol.54, 1976.

Pone Sergio, *Costruire con il legno in Italia*, in "Detail" n.11, 2008.

Pone Sergio, *Gridshell: esperienze di una costruzione*, in Perriccioli Massimo, (a cura di), *L'officina del pensiero tecnologico*, Alinea, Firenze, 2010.

Pone Sergio, *Gridshell: forma e tipologia strutturale*, in corso di pubblicazione

Harris Richard, Romer Jhon, Kelly Oliver, Johnson Stephen, *Design and construction of the Downland Grid Shell*, Building Research & Information n. 31 vol. 6, Novembre/Dicembre 2003.

Kelly O.J., Harris R., Dickson M.G.T., Rowe J.A., *Construction of the Downland Gridshell*, The Structural Engineer, Vol. 79, n.17, Settembre 2001

Laner Franco, *Mettere in forza, la chiesa della Compagnia di Gesù a Cordoba*, Argentina, Adrastea, 18, 2001

Zappa A., *L'albero della cuccagna*, Costruire n. 257, Ottobre 2004

*Savill Building: a new landmark for Windsor Great Park*, The Structural Engineer, vol. 84, Issue 47, September 2006.

## Sitografia

*Weald and Downland Open air Museum*

[www.burohappold.com](http://www.burohappold.com)

<http://www.edwardcullinanarchitects.com/projects/wd.html>

<http://staff.bath.ac.uk/absckw/OrganicForms/HistoryPictures/>

<http://www.wealddown.co.uk/downland-gridshell.htm>

*Mannheim Multihalle*

<http://www.proholz.at/zuschnitt/19/gitterschale-mannheim.htm>

*Japan Pavilion*

<http://www.ashkeling.com/eu2000/hannover.html>

[http://www.designboom.com/history/ban\\_expo.htm](http://www.designboom.com/history/ban_expo.htm)

*Helsinki Zoo Tower*

[http://www.lusas.com/case/civil/wooden\\_tower.html](http://www.lusas.com/case/civil/wooden_tower.html)

*Netlike Wooden Structures Research, Pook's Architects' Office*

[www.pook.fi](http://www.pook.fi)

Gridshell pre configurate

[www.sbp.de](http://www.sbp.de)

## Tesi di Master

Paoli Céline, *Past and future of Grid Shell structure*, Master of Engineering in civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2007.

## Ricerca della forma

### Testi

Giralt Miracle Daniel, *Gaudi, La ricerca della forma*, Jaca Book, 2003.

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

Otto Frei, Rasch Bodo, *Finding form*, AXEL MENGES, Stuttgart, 1995.

Paoletti Ingrid, *Costruire le forme complesse. Innovazione, industrializzazione e trasferimento per il progetto di architettura*, CLUP, Milano 2006

Thompson D'Arcy W., *Crescita e forma* (1961), tr. it. Bollati Boringhieri, Torino, 1969.

### Articoli

Colabella S., *Gridshell, tecnologia delle forme complesse*, in Perriccioli Massimo, (a cura di), *L'officina del pensiero tecnologico*, Alinea, Firenze, 2010.

Happold E., Liddell I., *Timber Lattice roof for the Mannheim Bundersgartenschau*, ed. The Structural Engineers, vol. 53, 1975.

Linkwitz K., *On Some Peculiarities Of Timber Shells Concerning Formfinding, Manufacturing, Building Physics*, Convegno Internazionale *Lightweight Structures in Civil Engineering*, Varsavia, Polonia, 24-28 giugno, 2002.

Kelly O.J., Harris R.J.L., Dickson M.G.T., Rowe J.A., *Construction of the Downland Gridshell*, The Structural Engineer, Vol. 79, n. 17, 2001, pp. 25-33.

Sitografia

[www.enhsa.net/downloads/publi/con2004/102\\_Williams.pdf](http://www.enhsa.net/downloads/publi/con2004/102_Williams.pdf).

<http://albertopugnale.wordpress.com/2007/05/17/flux-structure>.

[www.mediadigitali.polimi.it/ddd/ddd\\_004/art\\_pdf/ceccarelli.pdf](http://www.mediadigitali.polimi.it/ddd/ddd_004/art_pdf/ceccarelli.pdf).

## **Strutture prefabbricate, dispiegabili, "automontanti"**

Testi

Amirante I. e La Creta R., *Cupole per abitare, Quaderni dell'Istituto di Tecnologia dell'Architettura dell'Università degli Studi di Napoli*, Napoli, 1978.

Cetica P., R.B. Fuller: *uno spazio per la tecnologia*, Cedam, Padova 1979.

Chilton Jhon, *Atlante delle Strutture Reticolari*, UTET, Torino, 2000 pgg. 69-100.

Falasca C., *Architetture ad assetto variabile*, Editrice Alinea, Firenze 1997.

Falotico Antonella, *Cantiere e costruzione. Le strategie esecutive nella formazione del progetto di architettura*, Liguori Editore, 2003.

Gropius Walter, *Architettura integrata*, il Saggiatore, Milano, 1963.

Harrell S. Edmonds, *Mobile: The Art of Portable Architecture*, Princeton Architectural Pr, New York, 2002.

Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (a cura di), *Pabellón de Venezuela. Una aplicación de estructura transformable*, Ex libri, Caracas, 1993.

Petta Alfonso, *La Costruzione del Movimento – spazio, tempo e architettura nelle Macchine di Santiago Calatrava*, Maggioli Editore, 2008.

Zanelli A., *Trasportabile/trasformabile. Idee e tecniche per architetture in movimento*, Clup, Milano 2003.

## Articoli

Antonini Ernesto, Mucelli Giovanni, Sinopoli Nicola, Sostenibile come un rifiuto, *Costruire* n. 207, settembre 2000.

Pinero Emilio Perez, *Structures réticulées, L'architecture d'aujourd'hui*, n.141, 1969.

Pone Sergio, Colabella Sofia, Lavaggi Giampaolo, *Costruire rapido*, in *Costruire* n.228, maggio 2002.

## Tecnologia dei sistemi strutturali leggeri

### Testi

Abbate F., *La forma delle strutture*, Cuen, Napoli, 1997.

Argan Carlo Giulio, "Architettura" s.v. in *Dizionario Enciclopedico di Architettura e Urbanistica*, Istituto Editoriale Romano, 1968.

Berger H., *Light structures – Structures of light*, AuthorHouse, Bloomington 2005.

Beukers A. Van Hinte E., *Light- ness, the inevitable renaissance of minimum energy structures*, 010 Publishers, Rotterdam, 2001.

Capasso Aldo (a cura di), *Architettura e leggerezza*, Maggioli, Rimini 1999.

Capasso Aldo (a cura di), *Strutture tessili per l'architettura*, Cuen, Napoli 1991.

Capasso Aldo (a cura di), *Le tensostrutture a membrana per l'architettura*, Maggioli, Rimini 1993.

Cetica Pier Angelo, *R.B. Fuller: uno spazio per la tecnologia*, Cedam, Padova 1979.

De Fusco Renato, *Storia dell'architettura contemporanea vol. II*, Universale Laterza, Bari, 1977.

Drew P., *Frei Otto: form and structure*, Granada, Stoccarda 1976.

Emmerich David G., *Exercices de géometrie constructive*, Ecole Nationale Supérieure des Beaux-arts, Paris, p.VII.

Fuzio Giovanni, *Costruzioni pneumatiche*, Dedalo, Bari, 1968.

Giedion Sigfried, *Spazio tempo architettura* (1941), tr. it. Hoepli, Milano, 1981.

Glaeser L., *The work of Frei Otto*, MoMa, New York 1972.

Motro René, *Tenségrité (mat de)*, s.v. in Aa vv., *L'art de l'ingénieur*, cit., p.503.

Nervi Pierluigi, *Costruire correttamente*, Hoepli, Milano, 1965.

Nervi Pierluigi, *Scienza o arte del costruire?*, Città studi, Milano, 1997.

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

Perriccioli Massimo (a cura di), *Trasparenti leggerezze*, Libreria Rinascita, Ascoli Piceno 1998.

Panayotis A. Michelis, *Estetica del cemento armato (1963)*, tr. it. Vitali e Ghianda, Genova, 1968.

Pizzetti Giulio e Anna Maria Zorgno Trisciuglio, *Principi statici e forme strutturali*, Utet, Torino, 1980.

Pone Sergio, *L'idea di struttura*, FrancoAngeli, Milano, 2005.

Salvadori Mario, Heller Robert, *Le strutture in architettura*, Milano, ETASLIBRI, 1964.

Salvadori Mario, *Perché gli edifici stanno in piedi (1980)*, tr. it. Strumenti Bompiani, Milano, 1996.

Schodek D.L., *Strutture*, tr. it. a cura di Coronelli D. e Martinelli L., Pàtron Editore, Bologna, 2004, pp.19-21, 129-133, 407-417, 423-436.

Torroja Eduardo, *La concezione strutturale (1960)*, Città studi, Milano, 1995.

Vittoria Edoardo, *La natura maestra, la natura spettacolo, nella visione leggera della tecnologia*, in *Architettura delle vele*, in corso di pubblicazione.

Wachsmann Konrad, *Una svolta nelle costruzioni*, Il Saggiatore, Milano 1960.

Wachsmann Konrad, *Concetti di architettura*, conferenza tenuta l'11 aprile 1956 al Circolo artistico di Roma, cit. in Benevolo, *Storia dell'architettura moderna*, pag. 714.

Riviste

Zorgno Anna Maria, *Oltre la prigione cubica*, in "Rassegna" n.49, marzo 1992.

## Uso sostenibile del legno

### Testi

Barbisan Umberto e Roberto Masiero, *Il labirinto di Dedalo. Per una storia delle tecniche dell'architettura*, FrancoAngeli, Milano, 2000.

Capasso A., La Creta R. e Vitale A., (a cura di), *Edilizia a struttura in legno*, Roma, Prolegno e SEN, 1982.

Capasso A., *Il legno: un materiale tradizionale per nuove produzioni*, in Gangemi V. (a cura di), *Architettura e tecnologia appropriata*, Franco Angeli, Milano, 1985.

Cunningham W., *Fondamenti di ecologia*, McGraw- Hill, Milano, 2004.

Davoli P.M., *Costruire con il legno: Requisiti. Criteri progettuali. Esecuzioni. Prestazioni*, Hoepli, Milano, 2005.

Frampton Kenneth, *L'origine della tettonica: forma nucleo e forma artistica nell'Illuminismo tedesco, 1759-1870*, Tettonica e architettura. Poetica della forma architettonica nel XIX e XX secolo, (1995), tr. it. Skira, Milano, 1999.

Frontini F., (a cura di), *Tecniche e materiali. Il legno, masselli, compensati e truciolati, scelta e utilizzo*, Editoriale Europea srl, Milano, 1985.

Giacchetta A., Magliocco A., *Progettazione sostenibile. Dalla pianificazione territoriale all'ecodesign*, Carocci Editore, Roma, 2007.

Hegger M. et al., *Atlante della sostenibilità*, UTET, Torino 2008.

Nardi Guido, *Dal legno alla pietra: la cultura tecnica del legno tra oblio e rinascita*, Adrastea, 1995.

Natterer J., Herzog T., Volz M., *Atlante del legno*, UTET, Torino, 1998.

Pizzetti Giulio e Anna Maria Zorgno Trisciuglio, *Principi statici e forme strutturali*, Utet, Torino, 1980

Pone Sergio, *Utilizzi innovativi di materiali tradizionali: legno, cotto, pelle*, in Leucci Rejana (a cura di), *L'architettura dei paesaggi urbani*, Officina, Roma, 2008.

Semper Gottfried, (1977) *Der Stil in den technischen und tektonischen Künsten, oder praktische Aesthetik, ein Handbuch für Techniker, Künstler und Kunstfreunde*, 2 vols, Mittenwald: Maander Kunstverlag, tr. it. Augusto Romano Burelli, *Lo stile nelle arti tecniche e tettoniche, o Estetica pratica: manuale per tecnici, artisti e amatori*, Laterza, Bari, 1992.

Wiedemann Josef, *Il legno nella nostra vita*, in Natterer Julius, Thomas Herzog, Michael Volz, *Atlante del Legno*, UTET, Torino, 1998.

#### Articoli

Berti Stefano, Piazza Maurizio, Zanuttini Roberto, *Strutture in legno per un'edilizia sostenibile. Materie prime e prodotti, progettazione e realizzazione*, Il Sole 24 ore, Milano, 2002.

La Franca Giuseppe, *Niente colla sono sano*, in *Cantiere*, gennaio 2000.

Laner Franco, *Costruzioni in legno*, *Materia*, n. 36, settembre – dicembre 2001.

Laner Franco, *Vecchi morfemi per nuovi tecneni*, *Materia*, n.36, dicembre 2001.

Laner Franco, *Mettere in forza, la chiesa della Compagnia di Cordoba, Argentina*, *Adrastea*, 18,2001, p.4.

Laner Franco, *La cultura del legno, viverla non evocarla*, in «Detail» n. 11, 2008.

Masiero Roberto, *Nodi, giunti, rizomi e le astuzie della tecnica*, *Materia*, n. 34, gennaio- aprile 2001.

Nardi Guido, *Le nuove strutture in legno*, *l'Arca* n. 74, 1993.

Zappa Alfredo, *Legno e architettura. L'albero della cuccagna*, *Costruire*, n.257, ottobre 2004.

#### Sitografia

[www.forestindustries.fi](http://www.forestindustries.fi)

[www.cei-bois.org](http://www.cei-bois.org)

[www.durable-wood.com](http://www.durable-wood.com)

[www.cwc.ca](http://www.cwc.ca)

<http://www.demauparavia.it>

[www.holzbau.com](http://www.holzbau.com)

[www.fsc-italia.it](http://www.fsc-italia.it)

#### Tesi di Dottorato in Tecnologia dell'Architettura

Colabella Sofia, *Gli usi innovativi del legno di piccole dimensioni in architettura*, Università degli Studi di Napoli Federico II, 2006.

## Fonti delle illustrazioni

Fig.1 - Torres Ibanez Raùl, El vientre del arquitecto, [www.webpages.ull.es](http://www.webpages.ull.es);  
Torroja Eduardo, La Concezione strutturale, Città Studi, Milano, 1995, p.139.

Fig.2 - Torroja Eduardo, La Concezione strutturale, Città Studi, Milano, 1995,  
p.397; [www.ietcc.csic.es/](http://www.ietcc.csic.es/) centenario.

Fig.3 – Kolbitsch Andreas, Flachentrag werke, [www.hochbau.tuwien.ac.at](http://www.hochbau.tuwien.ac.at); Aa vv.,  
L'art de l'ingénieur, Editions du Centre Pompidou, Parigi, 1997, p.549.

Fig.4- Aa vv., L'art de l'ingénieur, Editions du Centre Pompidou, Parigi, 1997,  
p.313; [www.bfi.org/domes/geodesic\\_domes\\_slide](http://www.bfi.org/domes/geodesic_domes_slide).

Fig.5 -<http://www.federica.unina.it/architettura/laboratorio-di-costruzione-architettura/gridshell/>

Fig.6-

Fuller: <http://www.flickr.com/photos/jmr/4040390396/sizes/l/in/photostream/>

Otto: <http://www.federica.unina.it/architettura/laboratorio-di-costruzione-architettura/gridshell/>

Fig.7- Foto di Arja Lampinen; <http://www.pook.fi/en/netlike-wooden-structures/>

Fig.8-[http://podcast.federica.unina.it/mini/img.php?src=/files/\\_docenti/pone-sergio/img/pone-107-05-17.jpg&w=848&h=340&far=C](http://podcast.federica.unina.it/mini/img.php?src=/files/_docenti/pone-sergio/img/pone-107-05-17.jpg&w=848&h=340&far=C).

Fig.9- <http://www.wealddown.co.uk/Buildings%20and%20Exhibits/gridshell/downland-gridshell.htm>

Fig.10-

Foto in alto:

<http://www.flickr.com/photos/tobyhaskins/540539857/sizes/l/in/photostream/>

Foto in basso a sinistra: [http://www.e-](http://www.e-architect.co.uk/images/jpgs/awards/savill_building_2(c)warwicksweney_riba250907.jpg)

[architect.co.uk/images/jpgs/awards/savill\\_building\\_2\(c\)warwicksweney\\_riba250907.jpg](http://www.e-architect.co.uk/images/jpgs/awards/savill_building_2(c)warwicksweney_riba250907.jpg)

Foto in basso a destra:

<http://www.flickr.com/photos/tobyhaskins/541148139/sizes/l/in/photostream/>

Fig.11-

<http://www.flickr.com/photos/aleksipihkanen/342397404/sizes/o/in/photostream/>

Fig.12 - Happold Edmund, Liddell Ian, *Timber lattice roof for the Mannheim Bundesgartenschau*, ed. The structural Engineers, n.3, vol.53, 1975.

Fig.13- Grafico elaborato dall'autore.

Fig.14-<http://www.federica.unina.it/architettura/laboratorio-di-costruzione-architettura/grid-shell-doppia-curvatura/>

Fig.15 -Happold E., Liddell I., *Timber Lattice roof for the Mannheim Bundersgartenschau*, ed. The Structural Engineers, vol. 53, 1975.

Fig.16- Grafico elaborato dall'autore.

Fig.17- Happold E., Liddell I., *Timber Lattice roof for the Mannheim Bundersgartenschau*, ed. The Structural Engineers, vol. 53, 1975.

Fig.18 - Foto di Sofia Colabella.

Fig.19- Happold E., Liddell I., *Timber Lattice roof for the Mannheim Bundersgartenschau*, ed. The Structural Engineers, vol. 53, 1975.

Fig.20- Foto di Sofia Colabella.

Fig.21- Grafico elaborato dall'autore.

Fig.22 - <http://www.wealddown.co.uk>

Fig.23 - Grafico elaborato dall'autore.

Fig.24- Jensen Frank, *The Downland Gridshell*, The structural Engineer, vol.79/n.6, Marzo 2001.

Fig.25, 26, 27, 31, 32, 33, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47,48, 49, 50, 51, 54, 64, 65, 66 - Grafici elaborati dall'autore.

Fig. 28- *L'art del ingénieur*, Editions du Centre Pompidou, Parigi, 1997.

Fig. 29- Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (a cura di), *Pabellón de Venezuela. Una aplicación de estructura transformable*, Ex libri, Caracas, 1993.

Fig 30, 34,35, 36, 37, 38, 39, 52, 53, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63 - foto dell'autore.