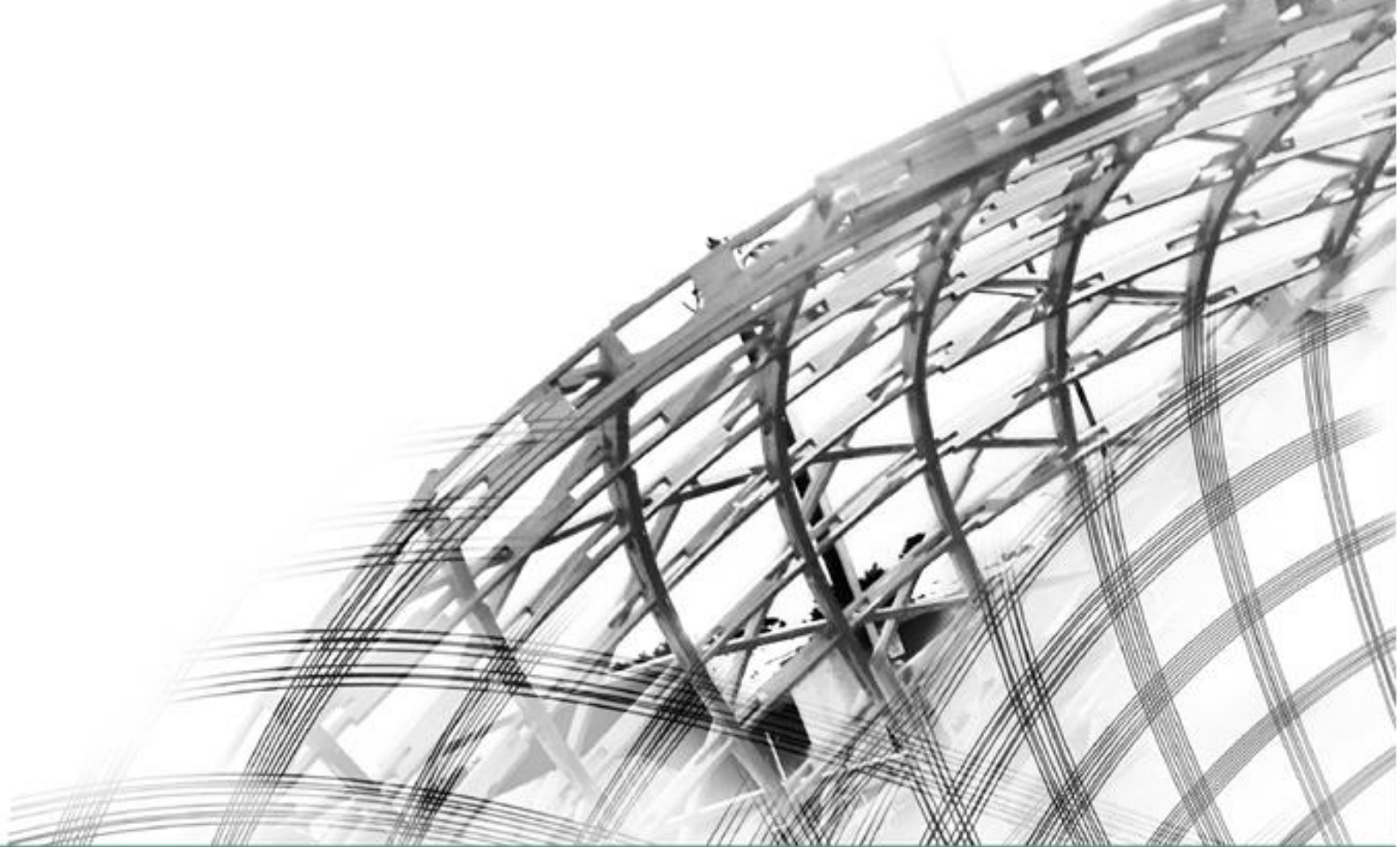




La progettazione computazionale delle gridshell derivanti da flessione attiva

Phd Student
Daniele Lancia

tutor: prof. arch. Sergio Pone

co-tutor: prof. arch. Bernardino D'Amico

LA PROGETTAZIONE COMPUTAZIONALE DELLE GRIDSHELL IN LEGNO DA FLESSIONE ATTIVA

Università degli Studi di Napoli Federico II

DiARC – Dipartimento di Architettura

Dottorato di Ricerca in Architettura XXXVI ciclo

Coordinatore: prof. Arch. Fabio Mangone

Area Tematica: Tecnologie sostenibili, recupero e rappresentazione dell'architettura e dell'ambiente

Settore Scientifico Disciplinare: Tecnologia dell'Architettura – SSD ICAR 12

PhD Student: **Daniele Lancia**

Tutor: prof. Arch. Sergio Pone

Co-tutor: prof. Arch. Bernardino D'Amico

Indice

Premesse	5
Domanda e obiettivi	8
Parte prima	11
1. Active bending structures	11
1.1. Innovazione tecnologica nelle coperture di grande luce	11
1.2. Gridshell: l'origine della tipologia strutturale	19
1.3. Mannheim	22
1.4. Il progetto delle Gridshell da flessione attiva	25
1.5. Da Frei Otto alle realizzazioni più recenti	30
2. Form-finding e progettazione	37
2.1. Metodi di progettazione delle ABG.....	38
2.2. Progettazione computazionale	41
2.2.1. Il ruolo del computazionale nella progettazione architettonica e i suoi sviluppi	42
2.2.2. I termini del computazionale in architettura	45
2.2.3. La progettazione computazionale delle ABTG	50
Parte 2	63
3. Sviluppo del tool.....	63
3.1. La geometria delle gridshell derivanti da flessione attiva	71
3.2. Metodi analitici per la simulazione dei corpi rigidi	78
3.3. Il workflow.....	86
3.3.1. Superficie di input	87
3.3.2. GridMaker	89
3.3.3. Gridshell Form Finding Tool, GFFT 3.0	93

3.3.4. Analisi FEM con Karamba3d.....	94
3.3.5. Divisione in moduli.....	95
Parte 3	98
4. Test del workflow e dei componenti implementati.....	98
4.1 Vinitaly 2023	99
5. Caso studio: Montevideo applicazione del tool e realizzazione	108
5.1. Il progetto scenario popolare.....	109
5.2. Il caso studio.....	111
5.3. Il progetto.....	113
5.4 La realizzazione	116
6. Conclusioni	122
Bibliografia	125
1. Active bending structures	125
2. Form-finding e progettazione	126
3. Sviluppo del tool.....	128
Appendice	130
Codice C# di GFFT 3.0.....	130
Codice C# GridMaker 3.0	135

Premesse

La progettazione delle strutture di grande luce è un affare complesso, e ancor di più lo è quella delle strutture leggere: la leggerezza non è un punto di partenza della progettazione o una semplice petizione di principio, ma un lento e, talvolta, faticoso percorso che si pone la sottrazione di materia come obiettivo chiaro e non deroga mai dal suo raggiungimento, magari perché distratto da altri, pur legittimi, obiettivi progettuali.

Nell'aspirazione alla leggerezza delle coperture di grande luce un ruolo importante, nella storia recente dell'architettura, è stato ricoperto dalla cosiddetta "resistenza per forma": quella tipica del guscio dell'uovo che ha una resistenza molto superiore a quella di una lamina piana fatta con lo stesso materiale proprio in virtù della sua particolare forma a doppia curvatura. Già dalla definizione (resistenza per forma) si capisce che il progettista che vuole usarne le potenzialità deve controllare le questioni connesse alla "resistenza", cioè deve avere confidenza con le discipline strutturali, e avere dimestichezza con quelle legate alla "forma" e, in particolare, con le materie che si occupano della forma in maniera scientifica e cioè con la Geometria perché questa, a differenza dell'arte, dialoga naturalmente con la Scienza delle Costruzioni con la quale condivide un'antica consonanza. Sergio Pone, in un suo scritto del 2005, scrive: «In una linea evolutiva che parte dall'opera di Gaspard Monge, ideatore della geometria descrittiva, e che attraversa quella di Karl Culmann, primo studioso di statica grafica, e di Wilhelm Ritter, autore del primo trattato generale della nuova disciplina, si struttura una vera e propria alleanza tra scienza delle costruzioni e geometria, legame ulteriormente rafforzato dall'opera di studiosi quali Otto Mohr, Heinrich Müller-Breslau fino al nostro Luigi Cremona»¹. Un'alleanza che porterà Eduardo Torroja a sostenere che «Linee e superfici sono sempre legate a leggi matematiche e fisiche che ne fissano le proprietà. Solo conoscendo profondamente queste leggi, e riflettendo sulle loro conseguenze, si possono realizzare opere perfette e valutare coscientemente virtù e difetti delle varie soluzioni. L'artista non deve mai dimenticare che l'estetica, con la sua innegabile componente soggettiva, è intimamente legata alle proprietà geometriche, analitiche, meccaniche e resistenti delle superfici e delle linee che delimitano la massa della costruzione. Ogni linea matematicamente definita possiede una verità intrinseca, esprime una legge, rappresenta un'idea, reca con sé il pregio di una virtù: negare queste cose significa

¹ S. Pone, *L'idea di struttura*, FrancoAngeli, Milano 2005, pp. 28, 29. Sull'argomento cfr. anche G. Pizzetti, A. M. Zorgno Triscuoglio, *Principi statici e forme strutturali*, Utet, Torino 1980.

rinchiudersi nel cieco ed egoista rifugio della pigrizia e dell'ignoranza»². Le linee e le superfici descritte dalla geometria sono dotate di virtù per Torroja di una verità intrinseca; ma alcune forme della natura hanno le stesse caratteristiche di forza e verità: «la progressiva liberazione dalla tirannia delle geometrie semplici – nota ancora Pone – consentirà di pensare le costruzioni a partire da una concezione strutturale che può finalmente imprimere nella materia il suo calco ... Questo avviene proprio per la magia che, in particolari condizioni la forma riesce a compiere sui comportamenti dei materiali, potenziandone le capacità di resistenza oltre i limiti dell'immaginazione; una magia in cui la natura è indiscussa maestra come dimostrano alcuni suoi capolavori strutturali quali il guscio dell'uovo, lo scheletro di alcuni radiolari, la sezione del fusto di certe piante e altre forme di esseri appartenenti tanto al regno animale quanto a quello vegetale»³. La natura è quindi capace di offrire al progettista suggerimenti validi per la forma resistente da attribuire a particolari tipi di strutture. Se si sospende in alcuni punti un oggetto non resistente a flessione (una corda, una catena, un tessuto) esso assume naturalmente una forma che è tutta tesa, cioè sottoposta a trazione in tutti i punti. Se si capovolge la forma ottenuta l'oggetto sarà sollecitato a compressione in tutti i punti e quindi disegnerà l'arco o la volta "perfetti". La gravità "conosce" la forma più resistente di un arco o di una volta e sa anche "disegnarne" la versione più resistente (a parità di materia usata). Questo è il metodo utilizzato dall'ingegnere svizzero Heinz Isler per disegnare i suoi gusci sottili in calcestruzzo armato, ma è anche la modalità attraverso la quale i primi costruttori delle cattedrali gotiche cercavano la forma migliore per le crociere delle loro volte o Antoni Gaudì disegnava la complessa geometria della Sagrada Família di Barcellona.

Ancora un interessante "suggerimento" che i progettisti di strutture leggere hanno accettato dalla natura è quello ispirato al comportamento delle superfici saponate (oppure alla forma che assume la tela del ragno). Se si costruisce una figura tridimensionale con un filo di ferro in modo che disegni una linea chiusa e si immerge in una soluzione di acqua saponata (quella delle bolle di sapone) si ottiene una lamina che assume naturalmente la superficie minima tra le infinite aventi come perimetro il frame di filo di ferro originario. Frei Otto conosceva bene questo comportamento delle superfici saponate, tanto da usarlo spesso per la progettazione delle sue tensostrutture o per le sue strutture a reti di cavi che, esattamente

² E. Torroja, *La concezione strutturale*, Città Studi, Milano 1995, p. 367.

³ S. Pone, *L'idea...* cit, p.30.

come l'acqua saponata, tendono ad assumere la forma corrispondente alla superficie minima possibile consentita dalla geometria dei vincoli esterni.

I due esempi citati sono solo alcuni dei casi in cui la forma resistente e la geometria di un elemento strutturale dialogano in modo preciso e univocamente determinabile; son casi in cui la scienza delle strutture e la geometria rivestono un ruolo fondamentale nella creazione della figura architettonica. E sono casi in cui la "ricerca di forma" diventa l'atteggiamento progettuale che sostituisce l'ordinaria "creazione della forma" richiesta al progettista di solito. Otto con Bodo Rasch definisce questo procedimento come "reverse path method"⁴ che permette di innescare artificialmente i procedimenti di "formatura" della natura (animata o inanimata) per comprendere meglio attraverso simulazioni tecniche i comportamenti non-tecnici dei fenomeni naturali. E al tempo stesso "cercare la forma" di un manufatto che vuole ispirarsi agli stessi paradigmi generativi.

Questi metodi empirici, che aiutano i progettisti a visualizzare e comprendere lo spazio, restituiscono una forma che approssima molto da vicino quella finale, e offrono uno strumento per controllare la possibile forma del manufatto prima di costruirlo. Otto e Rasch, ma come detto in precedenza anche altri progettisti, ne fanno un rilievo più esatto possibile e poi usano il risultato come punto di partenza per il progetto architettonico: da qui il metodo del percorso inverso.

Questi strumenti sono modelli fisici che non risentono della legge "quadrato-cubo" di Galileo Galilei, e riescono a supportare la fase euristica della progettazione architettonica. Per le tensostrutture di Frei Otto il tema è di particolare rilevanza perché il telo, come già accennato, tende ad assumere la forma che in qualche modo gli attribuisce univocamente il sistema vincoli esterni/tensioni che è ciò sul quale concretamente opera l'architetto. Una volta configurato il sistema si innesca l'esperimento (ad esempio quello delle superfici saponate) e si capisce, solo in quel momento, la vera forma che la struttura assumerà. In

⁴ "The "reverse path" method makes it possible to recognize formation processes in animate and inanimate nature to the extent that such processes are set in motion artificially. This is done by experiment and technical development of constructions. Technical developments driven forward at a high level of qualification permit better knowledge of nature's non-technical constructions. This is known as the reverse path". F. Otto, B. Rasch, *Finding Form*, Edition Axel Menges, Stuttgart (De) 1995.

sostanza la forma “dipende” dalla sollecitazione che si imprime al telo, originariamente scarico.

Sarà ancora Frei Otto a elaborare nel 1962, attraverso un prototipo realizzato nell’Università di Essen e poi nel 1975 attraverso la Multihalle di Mannheim, un secondo processo progettuale che necessita di questo tipo di analisi sperimentale in fase di progetto. Quello delle **Gridshell da flessione attiva** (oggetto principale di questa ricerca) che prevede la realizzazione di una griglia piana e poi l’applicazione di uno o più carichi di “formatura” che, attraverso la flessione delle bacchette e la deformazione delle maglie da quadrate in romboidali, attribuiscono alla griglia piana la sua forma curvilinea. Anche in questo caso la previsione esatta della forma che la griglia prenderà è oggetto di una sperimentazione condotta attraverso modelli sospesi e attraverso plastici in scala realizzati con materiali simili e quindi prevede il metodo del percorso inverso.

Questa articolata procedura ha fatto sì che le gridshell realizzate da Otto siano rimaste un caso isolato fino ai primi anni 2000. Ovviamente in epoca di rivoluzione digitale, con l’affermarsi dei metodi della progettazione computazionale, i modi per dedurre la forma di un manufatto per via sperimentale si sono allargati utilizzando i software di ottimizzazione, quelli di simulazione e i solutori di problemi matematici abbinati a processi fisici conosciuti.

Quindi questa ricerca punta a investigare il rapporto tra progettazione computazionale e progettazione architettonica e come queste possano collaborare nel campo delle gridshell in legno derivanti da flessione attiva.

Domanda e obiettivi

Il presente lavoro di ricerca si inserisce nel panorama globale degli studi sulle gridshell. Rispetto al numero totale di pubblicazioni notevoli, solo una piccola percentuale di queste riguardano i temi dell’architettura, la restante parte è spesso orientata allo sviluppo del sistema analitico più adeguato per analizzare e simulare il comportamento strutturale delle gridshell⁵. Quindi assunti gli sviluppi in campo strutturale e analitico, lo scopo di questa ricerca è quello di diffondere questa tecnologia costruttiva e renderla accessibile a un più vasto gruppo di utenti, questo grazie all’implementazione di un *workflow* di lavoro che ha fatto proprie le esperienze e i traguardi raggiunti dai vari gruppi di ricercatori, mettendoli a

⁵ Dyvik, Steinar & Manum, Bendik & Rønquist, Anders. (2021). Gridshells in Recent Research-A Systematic Mapping Study. Applied Sciences. 11. 10.3390/app112411731

sistema e creando un metodo per la progettazione di gridshell in legno derivanti da flessione attiva. Come vedremo nello sviluppo della ricerca, questa tecnologia costruttiva richiede una approfondita analisi e ricerca della “forma corretta”, tramite l’impiego di conoscenze avanzate di geometria, modelli strutturali e processi computazionali. L’intento del lavoro è quello di sviluppare un pacchetto di *tool* informatici che bypassano la necessità di avere nel proprio bagaglio culturale, o nel proprio gruppo di lavoro, queste competenze, racchiudendole in un *toolkit* una “collana di strumenti” che supportino il progettista nella trasformazione di uno spazio architettonico in un sistema strutturale, accompagnandolo dalla fase ideativa iniziale fino alla stesura dell’abaco degli elementi.

Per consentire ai progettisti di affrontare le complicate questioni legate alle gridshell in legno da flessione attiva, si è deciso di seguire la strada tracciata da Negroponte, che indicava nel rapporto uomo-macchina il futuro (ormai possiamo dire attuale) utilizzo del computer, in modo da avere un compagno di lavoro virtuale, col quale “dialogare”, in grado da amplificare le competenze del progettista. Costruire questi strumenti vuol dire racchiudere in algoritmi le conoscenze necessarie, ed esplicitarle in forma di codice di programmazione, in modo da far elaborare al computer le informazioni per ottenere quanto necessario al progettista. Si è deciso di operare in ambiente *Rhino/Grasshopper*, che a oggi rappresenta “l’ecosistema” più idoneo a creare questo tipo di algoritmi, in quanto offre la possibilità di implementare strumenti computazionali tramite un linguaggio di programmazione visuale a blocchi (VPL) in grado di concatenare operazioni matematico/geometriche al fine di ottenere i risultati ricercati. Quindi quello che si ritiene necessario sviluppare con questa ricerca è una serie di strumenti computazionali in grado di democratizzare l’approccio alla progettazione sistema strutturale così complesso, che non risponde solo alle logiche spaziali, ma anche alle logiche ferree della statica e a quelle intrinseche del materiale da costruzione.

La ricerca verrà effettuata analizzando lo stato dell’arte, dopodiché saranno messi a sistema gli studi e le ricerche svolte e si provvederà alla stesura del workflow idoneo.

Sviluppato il workflow saranno elaborati i tool computazionali; ossia piccoli programmi atti a risolvere i passaggi necessari alla progettazione delle gridshell in legno derivanti da flessione attiva. Questi tool saranno composti da definizioni di Grasshopper, oppure, dove necessario, saranno implementati nuovi componenti scritti appositamente ma in grado di girare nello stesso ambiente.

Terminata la fase di sviluppo dei tool sarà previsto una serie di test per verificarne la validità. Le prove saranno finalizzate a testare la rispondenza delle applicazioni a strutture già realizzate e progettate con metodi analogici e, in particolare, la congruenza tra le geometrie generali, le geometrie locali

E infine sarà attivata un'esperienza sul campo: sarà distribuito il toolkit a una classe di studenti o neo-laureati, non esperti nella progettazione di strutture complesse, dell'Università Fadu Udelar di Montevideo ai quali sarà chiesto di usarli per realizzare il progetto di una piccola gridshell da flessione attiva. Poi si procederà a costruire la struttura in scala reale e si controllerà lo scostamento dalle previsioni di progetto. La scelta dell'Uruguay come luogo per lo sviluppo di questa iniziativa discende dalla volontà di sperimentare il software in una realtà sociale in cui l'auto-costruzione rappresenti una tradizione consolidata e sia sostenuta da robuste motivazioni sociali ed economiche. Montevideo con la sua *Red de Escenarios Populares* rappresenta un caso ideale come racconterò in dettaglio nell'ultimo capitolo di questa tesi.

Per raggiungere la costruzione del toolkit sono necessari i seguenti passaggi:

- Stato dell'arte sulle Gridshell da active bending
- Studio dei metodi analitico/matematici per la ricerca della forma
- Studio dei metodi di progettazione computazionale
- Creazione dei componenti informatici
- Creazione del toolkit
- Sperimentazione e verifica del funzionamento
- Verifica sul campo del software attraverso la sperimentazione con persone non esperte

Parte prima

1. Active bending structures

1.1. Innovazione tecnologica nelle coperture di grande luce

Come accennato nella premessa, l'oggetto di questa ricerca sono le gridshell da flessione attiva e in particolare, la loro versione più diffusa che è quella in legno (*Active Bending Timber Gridshell* oppure ABGT). Con questa tipologia strutturale si realizzano prevalentemente coperture di grande luce e quindi è in quest'ambito che vanno ricercate e analizzate le premesse che ne hanno consentito la nascita e lo sviluppo. E in quest'ambito il Novecento ha lasciato una ricca eredità di esperienze in cui la forma architettonica, la tipologia strutturale e la tecnologia hanno avanzato di conserva e con continui rimbalzi per promuovere l'innovazione.

Nel corso della storia delle costruzioni, la concezione strutturale di un edificio ha spesso influenzato la sua forma: «L'edificio – afferma Mies Van der Rohe – 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»⁶. L'opera di architettura, si è sempre confrontata con gli elementi di cui è costituita e con il sistema costruttivo adottato, che spesso l'ha caratterizzata in maniera univoca secondo un procedimento circolare e osmotico dalla forma alle tecniche e da queste di nuovo alla forma.

La ricerca nel campo della tecnologia dell'architettura non è stata quasi mai finalizzata esclusivamente al miglioramento di una tecnica, bensì a creare una sinergia efficace tra le diverse competenze necessarie allo sviluppo di un progetto d'architettura. In questo senso, viene in rilievo quanto ha sottolineato Eduardo Vittoria nel 1988, il quale afferma che «Dobbiamo salvaguardare il principio di una integrazione tra architettura e tecnologia quale patrimonio originale e inedito della cultura progettuale contemporanea che investe proprio

⁶ F. Neumeyer, *Mies van der Rohe. Le architetture e gli scritti*. Skira. Milano 1997, p. 309

quei procedimenti inventivi connessi con la trasformazione dell'immaginario in paesaggio costruito. Il che significa restituire spessore allo sperimentalismo costruttivo ed eliminare quelle pastoie che attualmente avviliscono l'architettura e che possono essere tutte ricondotte a una concezione della modernità limitata alla salvaguardia, al riuso e al restauro delle preesistenze»⁷.

Per Vittoria bisogna "restituire spessore allo sperimentalismo costruttivo" perché, evidentemente, è esistita una fase della storia dell'architettura in cui questo atteggiamento sperimentale era più diffuso e proficuo.

Come già accennato in precedenza durante il XX secolo, la progettazione delle coperture di grande luce ha rappresentato un settore di grande interesse proprio per la diffusa tendenza allo sperimentalismo che, soprattutto in alcuni dei suoi protagonisti di spicco, ha proposto nuove tipologie costruttive e strutturali deducendo o provocando importanti innovazioni dalla contemporanea ricerca tecnologica in una commistione talvolta inestricabile. È proprio in questo periodo storico che si dà il via alla ricerca, all'innovazione e alla sperimentazione nel campo delle strutture leggere e, come nota ancora Pone⁸, si mettono a punto sette nuove tecnologie: quattro speculeranno sulle ragioni della forma resistente e tre sull'affermazione in edilizia di nuovi materiali. Nell'ambito delle "Nuove forme" il processo invenzione – innovazione coinvolgerà i gusci in calcestruzzo armato, le strutture reticolari, le grandi cupole e le strutture a reti di cavi mentre in quello dei "Nuovi materiali" verranno alla luce il calcestruzzo armato precompresso, il legno lamellare e le strutture pneumatiche.

Tra alcuni dei protagonisti di questa interessante stagione si consolida la convinzione che la resistenza di una struttura possa non dipendere solo dalla quantità di materiale utilizzato nella realizzazione degli elementi resistenti. A tal fine, alcune importanti ricerche tentano, sulla scorta dei grandi studi ingegneristici della fine dell'800 e dell'inizio del '900, di ribaltare il rapporto tra carico di rottura e peso proprio, arrivando a progettare strutture non ridondanti, "economiche" come definite da Robert Le Ricolais⁹. A partire da queste convinzioni la ricerca della leggerezza nel progetto per le architetture di grande luce, ha quindi portato avanti parallelamente l'aspirazione alla riduzione del materiale e la ricerca di forma, la "forma resistente".

⁷ E. Vittoria, *Le tecnologie devianti dell'architettura*, in M. Fabbri, D. Pastore, *Fondazione Adriano Olivetti. Architetture per il terzo millennio*, Fondazione Adriano Olivetti, Roma 1988, p. 60

⁸ Cfr. S. Pone, *L'idea ...* cit.

⁹ R. La Creta (2005). *Prefazione* in S. Pone, op. cit., p. 10.

Tra i primi studi sulle strutture resistenti per forma furono quelli che videro impiegati materiali già noti che potessero generare un **guscio** continuo. Una struttura a guscio viene definita da Chris John Kenneth Williams: «una struttura definita da una superficie curva. È sottile nella direzione ortogonale alla superficie, ma non c'è una regola assoluta su quanto sottile debba essere. Può essere curva in due direzioni come una cupola o una torre di raffreddamento, oppure può essere cilindrica e curva in un'unica direzione»¹⁰ **Il guscio, a singola o a doppia curvatura, ha la caratteristica di trasformare tutti gli sforzi ortogonali alla superficie in sforzi membranali**; ciò si realizza in funzione del rapporto luce libera/spessore: come spiega Andrea Campioli «Le strutture resistenti per forma sono pertanto l'espressione materica del percorso delle forze»¹¹.

I grandi interpreti novecenteschi dei gusci in calcestruzzo armato sono stati l'iniziatore Eduardo Torroja, autore tra l'altro del Fronton Recoletos (Fig.1) e dell'Ippodromo della Zarzuela (Fig.2), Felix Candela, emigrato in Messico con l'intento di rivendicare la massima agibilità per le sue audaci sperimentazioni seguiti da Heinz Isler (Fig.3) negli anni '60 e dai suoi straordinari *hanging models* (plastici sospesi) messi a punto per studiare forme sottoposte solo a carichi di compressione, e l'innovatore Dante Bini che progetta il sistema per realizzare i gusci in cemento armato con cassaforma pneumatica. Ancor prima dei gusci in calcestruzzo armato, forse i primi consapevoli tentativi di riduzione del materiale, per rendere l'elemento portante più leggero, sono quelli che si basano sul noto effetto **reticolare**, teorizzato compiutamente sul finire del XIX secolo, tramite sistematica parzializzazione della parete dell'elemento trave, che viene suddivisa in aste verticali, orizzontali e diagonali collegate da nodi. **La scomposizione degli sforzi flessionali agenti sull'elemento in azioni di compressione e trazione pura consente la possibilità di realizzare questi elementi con componenti molto esili** rispetto a quelli necessari se si usano travi piene. Sapienti pionieri di questa tecnica si trovano in tutta la storia delle strutture in legno e, in particolare, delle capriate, ma la sperimentazione diventa sicuramente più interessante quando si afferma l'acciaio come materiale strutturale e quando il principio reticolare viene esteso alla terza dimensione e si sperimentano dei veri e propri reticoli spaziali in grado di offrire prestazioni notevolmente migliori.

¹⁰ S. Adriaenssens, P. Block, D. Veenendaal, C. Williams, (Eds.), *Shell structures for architecture: Form finding and optimization*. Routledge, 2013 London (UK), p.21.

¹¹ A. Campioli, M. Lavagna, *Tecniche e Architettura*. De Agostini Scuola, Novara 2013, p.169.

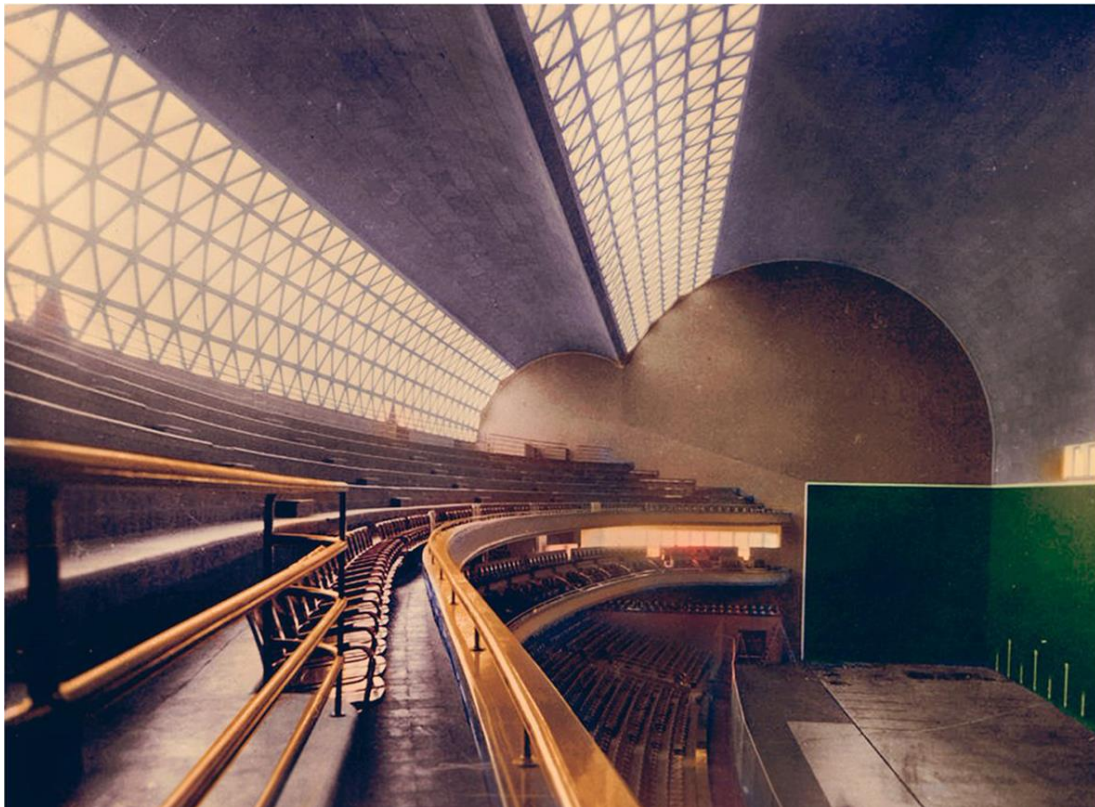


Fig. 1 Fronton de Recoletos, E. Torroja



Fig. 2 Zarzuela, E. Torroja

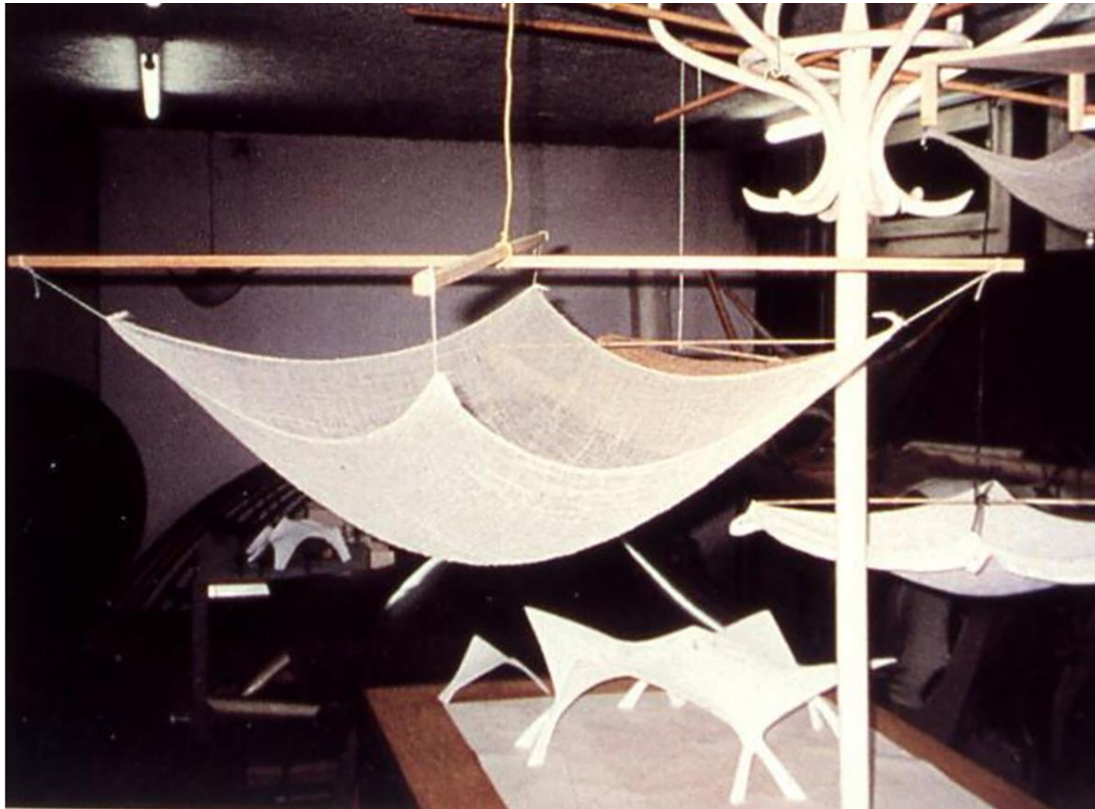


Fig. 1 Modelli sospesi di H. Isler

Sul punto, Zigmunt Stanislaw Makowski afferma che: «La struttura spaziale può, fino ad un certo punto, essere considerata come un'estensione nello spazio dei sistemi a traliccio tradizionali. Mentre, per questi ultimi, le linee d'azione delle forze giacciono tutte in uno stesso piano, in una struttura spaziale, invece, queste linee d'azione si ripartiscono, si diramano nello spazio. La maggior parte delle tensioni si eguaglia e costituisce un campo di forze omogeneo, senza punte di carico troppo marcate, conferendo alla struttura una grande resistenza alle sollecitazioni esterne. Le tensioni interne diminuiscono e, insieme a queste, le sezioni necessarie degli elementi tesi e compressi; si realizza in tal modo un'apprezzabile economia di materiale»¹². Primo interprete di questa innovazione fu sicuramente Alexander Graham Bell che utilizzò tale sistema per la prima volta nel 1907, in Canada, per la costruzione di una torre di avvistamento alta trenta metri¹³. È in questo periodo storico che iniziano ad emergere i primi interessi dei progettisti verso gli studi di biologia e di cristallografia, che analizzano le strutture ossee di alcuni esseri viventi e la conformazione cristallina di alcuni minerali. Il primo a proporre questo tipo di collegamento interdisciplinare è ancora Le

¹² Z. S. Makoski, *Strutture spaziali in acciaio*, tr. It Cisia, Milano 1963, p.5.

¹³ T. Barucki, *Stéphane du Château*, Salix Alba Press, Varsavia 2013, p. 26.

Ricolais; come sostiene Paolo Nepoti «L' interesse per la struttura della materia è un motivo centrale della ricerca di Le Ricolais (Fig. 4). Materia organica e inorganica, biologia e fisica. C'è un punto di riferimento d'obbligo, tra le fonti che Le Ricolais cita a questo proposito: al di là di D'Arcy Thompson e Monod Herzen per la biologia, Kelvin per la cristallografia, esce in

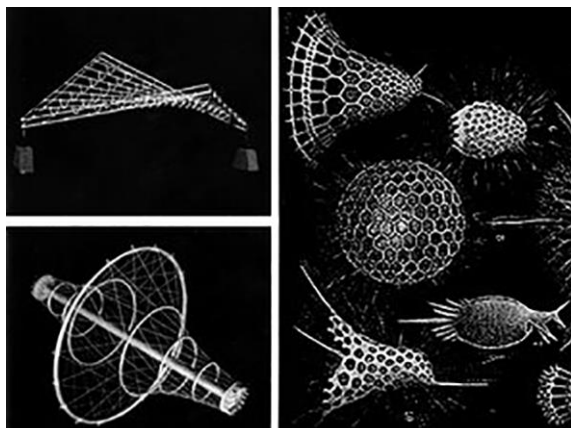


Fig. 2 Studi di Le Ricolais. Forme resistenti e Forme naturali

primo piano il biologo tedesco Ernst Haeckel. Nella sua *Morfologia Generale* (1866) Haeckel afferma che lo scopo della morfologia è di trovare una spiegazione causale di quelle strutture degli organismi che sono 'monistiche', e cioè vere per tutti i gradi della natura, e corrispondenti tanto al mondo inorganico che a quello organico»¹⁴. Saranno questi passaggi trasversali di conoscenza che

influenzeranno l'opera e gli studi dei progettisti ispirando per esempio le "strutture infinite" di Konrad Wachsmann (Fig.5.), il geniale sistema "Mero" di Max Mengerhausen, e le incredibili strutture geodetiche di Richard Buckminster Fuller (fig.6).

Un altro sottoinsieme delle strutture resistenti per forma riguarda lo studio delle **strutture a**

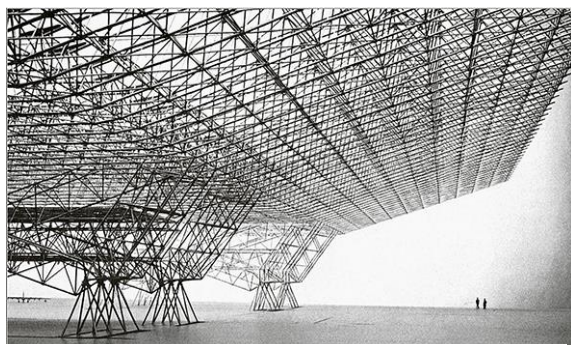


Fig. 3 Progetto Hangar, K. Wachsmann

rete di cavi, o tensostrutture. Geometricamente definibili come una superficie minima all'interno un perimetro dato, le cui tensioni superficiali sono in equilibrio, sono una tipologia strutturale che **prevede la messa in tensione del sistema strutturale per assumere la sua forma definitiva e per entrare in fase di esercizio.**

¹⁴ P. Nepoti, *Premessa a Le Ricolais*, in "Zodiac", n. 22, 1973.

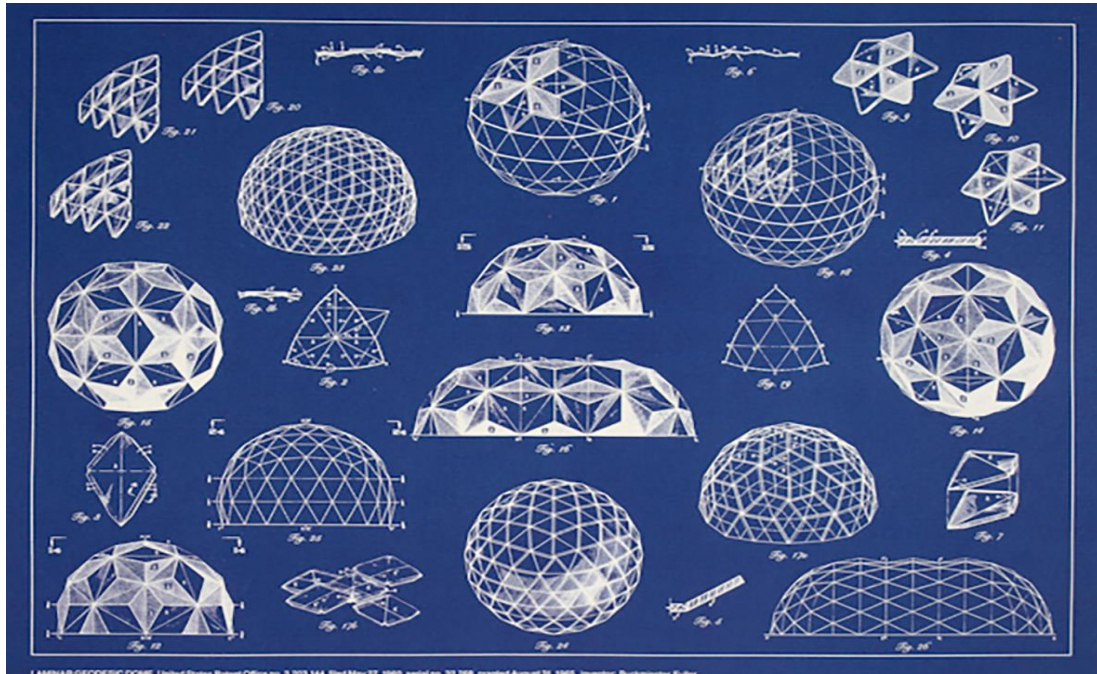


Fig. 6 Brevetto per le cupole Geodetiche

Grande precursore delle strutture a rete di cavi fu sicuramente Vladimir Shukhov che con gli edifici realizzati per All-Russia Exhibition in Nizhny Novgorod of 1896,¹⁵ sperimenta, utilizzando piattine metalliche rivettate, sia le prime strutture a rete di cavi sia la prima gridshell della storia (fig. 7).

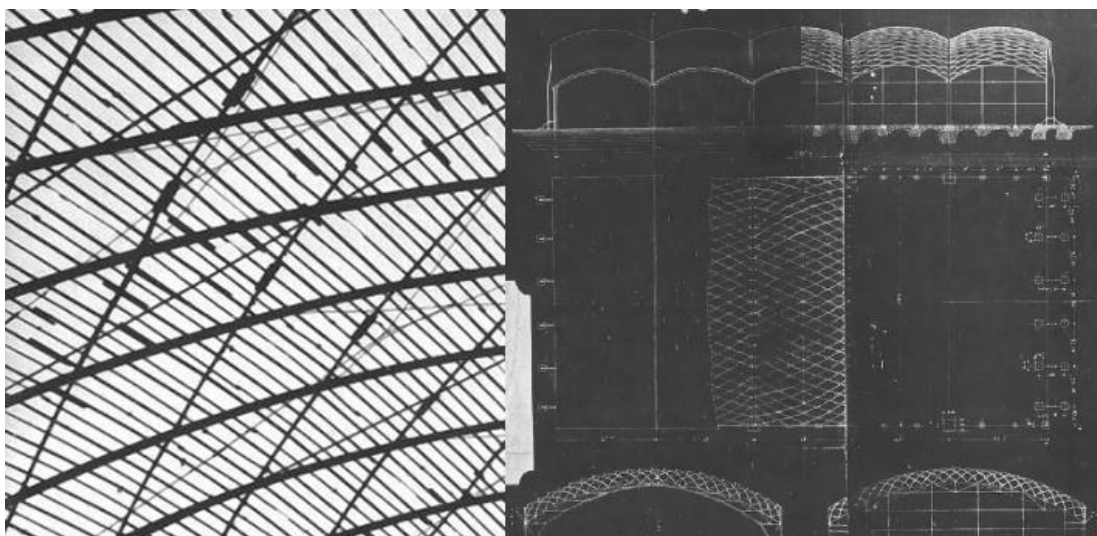


Fig. 7 Gridshell in acciaio di Vladimir Shukov a Nizhny Novgorod, 1897. Intradosso della copertura a sinistra, disegni esecutivi a destra.

¹⁵ Cfr. "Casabella" n.573, 1990

Circa 60 anni dopo Matthew Nowicki, in collaborazione con Fred Severud, progetta con un sistema simile la copertura della Raleigh Arena (1953) copertura a sella con struttura realizzata con cavi di acciaio tesi, poi rivestiti con cemento. Senza dubbio il massimo esponente di questa tecnologia è stato il tedesco Frei Otto, il quale ne venne a conoscenza dopo aver visto un modello della Raleigh Arena nello studio dell'ingegner Fred Severud a New York nel 1950. Le prime sperimentazioni di Otto sono realizzate con un tessuto che sostituisce il sistema del cavo di acciaio teso, come ad esempio per il Musikpavilion per la Federal Garden Exhibition Kassel del 1955, ma è prima con il padiglione della Germania per l'expo di Montreal del 1967 e poi con il Parco Olimpico di Monaco nel 1972, che l'opera del genio tedesco si diffonde nel mondo, l'architetto sostituisce il cemento di copertura, utilizzato dai suoi predecessori, con materiali plastici sintetici, dando alle strutture un forte senso di leggerezza amplificato dalla trasparenza della copertura (Fig.8).



Fig. 8 Tensostrutture del Parco Olimpico di Monaco del 1972

Le **grandi cupole geodetiche**, brevettate nel 1954 da Richard Buckminster Fuller e costruite in molte diverse declinazioni nel corso della sua carriera di progettista/costruttore, fondavano la propria resistenza sulla **forma a doppia curvatura** (in questo caso generalmente sferica), sulla **ridotta sezione trasversale** e sulla **grande rigidità nel piano dovuta alle maglie triangolari**. In pratica gli stessi concetti sui quali si basa la moderna concezione di *gridshell* con l'unica, non secondaria, differenza derivante dalla ricerca accanita che il progettista statunitense fece per tutta la vita sui sistemi di parzializzazione e approssimazione della sfera (e delle sue porzioni) usando solidi platonici o archimedei. In sostanza un diverso e più rigido repertorio formale per una concezione strutturale in definitiva molto simile.

1.2. Gridshell: l'origine della tipologia strutturale

Alle tipologie sopra descritte, il Novecento ne aggiunge una ottava: le **Gridshell**. Nate negli ultimi decenni del secolo, dovranno aspettare i primi anni del terzo millennio per iniziare a trovare un minimo di diffusione e per entrare tra i sistemi strutturali oggetto di trattazione specifica da parte della comunità scientifica.

Si può definire gridshell una struttura che partecipa della natura della volta sottile (shell) e di quella del graticcio (grid) e per questo, nel corso della sua breve storia, è stata definita anche come guscio discontinuo. La forma curva delle gridshell può derivare o dalla particolare geometria del sistema che, attraverso l'assemblaggio di elementi pre-formati curvi o segmentati e attraverso particolari proprietà dei nodi, si configura direttamente con la forma curvilinea oppure può derivare da un procedimento di "formatura" in cantiere esercitato su elementi rettilinei o piani: questa variante è rappresentata dalle strutture a flessione attiva (active bending). Le due sottocategorie, tranne rare (e spesso interessanti) eccezioni, si identificano con l'acciaio e con il legno e hanno avuto due protagonisti particolarmente significativi nei primi anni del nostro secolo: gli ingegneri della Schlaich Bergermann & Partner di Stoccarda e quelli della BuroHappold Engineering di Londra, società fondata nel 1976 da Ted Happold.

I primi hanno assicurato l'ingegnerizzazione della Nuova Fiera Milano Rho (con progetto architettonico di Massimiliano Fuksas), della gridshell dello Yas Hotel di Abu Dhabi (con progetto architettonico di Asymptote Architecture) e della copertura della Stazione Ferroviaria a Berlino (con progetto architettonico di Architekten von Gerkan, Marg und Partner) per citare solo i più noti.

BuroHappold ha progettato e ingegnerizzato nel 2004 la seconda importante active bent gridshell dopo la Multihalle di Mannheim, che è la copertura del Weald and Downland Living Museum a Chichester (con progetto architettonico di Edward Cullinan) e nel 2006 la terza che è quella del Savill Building Visitor Centre al Windsor Great Park (con progetto architettonico di Glen Howells Architects).

Questa ricerca si occupa essenzialmente di questa seconda categoria di strutture sulla cui singolarità conviene spendere ancora qualche rigo.

La flessione attiva è, come accennato in precedenza, una metodologia di costruzione che prevede la flessione di un elemento rettilineo affinché questo assuma la forma desiderata, che spesso è anche più resistente oltre a essere più facile da produrre, da trasportare e da

movimentare in cantiere. Questa strategia si può applicare a una griglia pre-assemblata, che si forza in un secondo momento ad assumere la forma curvilinea, oppure a elementi rettilinei singoli che nell'assemblarsi l'uno con l'altro assumono la forma desiderata.

Diversi sono gli esempi di applicazione di questa tecnica nell'architettura tradizionale o in quella vernacolare nelle quali sebbene si facesse un utilizzo spesso "inconsapevole" dei principi scientifici su cui si basa, era sempre presente un'assoluta consapevolezza degli aspetti di praticità ed economicità che oggi connettiamo anche al grande tema della eco-compatibilità. A titolo puramente esemplificativo, in Europa il trasferimento di tecniche dai cantieri navali a quelli edili porta alla nascita di tipologie come quelle delle coperture a chiglia rovesciata dove, a somiglianza di quanto avviene nella costruzione delle imbarcazioni in legno, sottili tavole di legno erano "curvate a forza" per aderire a una struttura sagomata che imita il sistema chiglia/ordinate.

Ma anche in altri tipi di manufatti, appartenenti alle tradizioni costruttive di alcuni popoli di altri continenti, la flessione attiva ricopre un ruolo significativo; in Sudamerica, in Africa, nel Sud-est asiatico, etc. si trovano costruzioni realizzate con elementi rettilinei di materiali elastici, di solito di origine vegetale, inflessi in opera per ottenere forme concave o convesse. Gli elementi lineari curvati si trovano anche intrecciati per formare vere e proprie griglie che, a loro volta, individuano superfici che in certi casi sono ricoperte con vari tipi di conglomerati (ad esempio con la terra cruda) per formare volte o vere e proprie cupole leggere e molto resistenti. O, infine, i cinematismi propri delle strutture grigliate e inflesse si rivelano particolarmente adatti alle necessità dell'architettura nomadica come dimostra la struttura verticale della Yurta mongola.

Nella storia dell'architettura del XX secolo le prime realizzazioni sono riconducibili al genio dell'architetto/ingegnere russo Vladimir Šhuchov, che già nel 1890 sperimentò la variante da flessione attiva della nuova tipologia strutturale prima in due volte a botte che coprono altrettante stazioni di pompaggio nella cittadina cecena di Groznyj e poi in un padiglione ancora per l'Esposizione "All-Russian" tenutasi a Nizhny Novgorod nel 1896. Ma, forse anche a causa del lungo isolamento della cultura sovietica, le opere del progettista/inventore russo, e con loro le sue straordinarie intuizioni strutturali, sono state conosciute molto dopo.

Un altro piccolo ma significativo passo verso la definizione dei principi che saranno alla base delle moderne *gridshell* lo compì lo stesso Torroja nella progettazione del Frontón Recoletos, costruito a Madrid nel 1935 e distrutto dai bombardamenti durante la guerra civile. Nella

copertura dell'edificio, composta dall'intersezione di due volte a botte realizzate con due gusci in calcestruzzo armato, per illuminare il campo da gioco e la platea Torroja praticò una serie di fori triangolari che realizzavano due ampi lucernari. La successione e il disegno delle aperture alludevano alla forma delle *gridshell* e si ispiravano allo stesso comportamento strutturale inaugurando, in qualche modo, la stagione dei gusci discontinui.

Ancora nel campo delle costruzioni antesignane delle moderne *gridshell* si possono far rientrare, come accennato in precedenza, alcune delle cupole geodetiche di Richard Buckminster Fuller, che utilizza preferenzialmente le aste metalliche rettilinee assemblate secondo complesse geometrie quasi tutte basate sulla ripetizione della figura del triangolo.

Come racconta Ian Liddell (uno dei soci fondatori della Buro Happold) Frei Otto fa il suo ingresso da protagonista in questa vicenda con un prototipo simile per concezione a quelli di Šhuchov: «Nel 1962 egli costruì, con un gruppo di studenti di Berkeley, il prototipo della struttura di una cupola appoggiata su quattro punti usando barre metalliche. In seguito, nello stesso anno, fece un'altra struttura sperimentale in legno a Essen su una pianta ellittica di circa 15 x 15 m»¹⁶. E poi nel 1972 realizza una parte del complesso sportivo di Monaco di Baviera in cui sperimentava ancora il graticcio di legno formato in opera, questa volta quasi completamente sollecitato a trazione.

Infine nel 1975 Otto collabora con gli architetti della Carl Mutschler & Partners per il progetto e la costruzione della Multihalle di Mannheim, costruita per la *Bundesgartenschau (Federal Garden Exhibition)* con il gruppo multidisciplinare che annoverava tra i suoi membri Ted Happold, allora capo del gruppo Structure 3 della Ove Arup & Partners in cui militavano anche Ian Liddell, e Klaus Linkwitz, docente di geodesia all'Università di Stoccarda, che studiava i modi per passare dai complessi plastici in scala ai disegni esecutivi della struttura da realizzare. Questa è la prima costruzione non sperimentale che si può definire una **Active Bent Timber Gridshell** ed è quella che traghetta questa tipologia strutturale nel tempo della sua maturità.

¹⁶ I. Liddell, *Frei Otto and the development of gridshells*, Case Studies in "Structural Engineering", n. 4, 2015.

1.3. Mannheim

L'Atelier Mutschler & partners, vincitore del concorso bandito nel 1971 per il disegno di un parco da realizzare in occasione del Bundesgartenschau del 1972, propose per l'area coperta una struttura pneumatica che non piacque agli enti organizzatori della manifestazione. I progettisti si rivolsero allora a Frei Otto che alcuni anni prima aveva realizzato una copertura tesa per la stessa manifestazione. Il primo modello in scala realizzato presso l'atelier Warmbronn, utilizzava la tipologia strutturale delle ABTG ed era adattata puntualmente al disegno del parco come fosse un'opera sartoriale; la proposta fu subito approvata dalla committenza

«La Multisala – racconta Sofia Colabella in un suo scritto del 2010 – 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, copre una superficie complessiva di 4.700 m² ed è stata progettata a partire dai cosiddetti “hanging models”(fig. 9) , plastici di studio realizzati “a testa in giù” in modo da sfruttare la forza di gravità come elemento determinante la forma

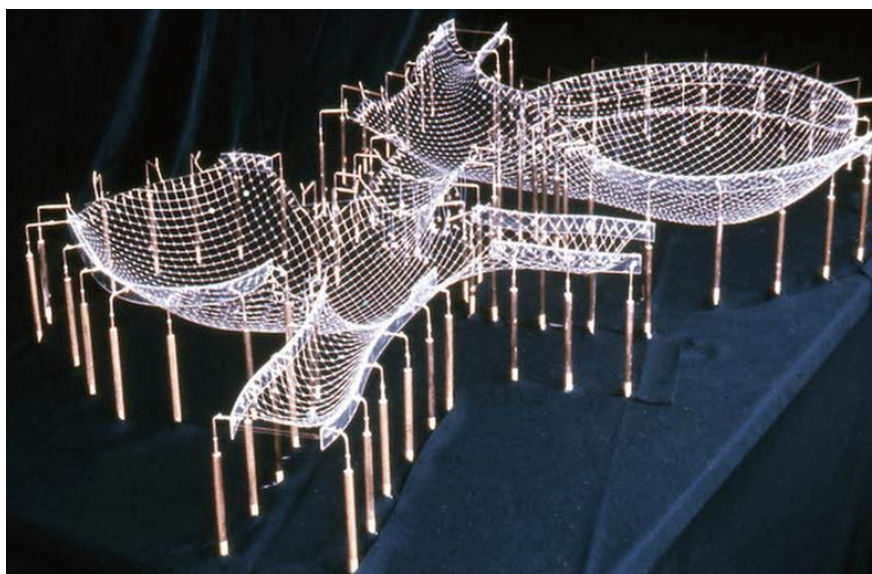


Fig. 9 hanging model della multihalle di Mannheim

strutturale. Frei Otto utilizzava questo tipo di modello già dal 1946 per definire quali forme strutturali potessero essere sottoposte a trazione o a compressione pura»¹⁷.

¹⁷ S. Colabella, *Gridshell, tecnologia delle forme complesse*, in M. Perriccioli (a cura di), *L'officina del pensiero tecnologico*, Alinea Editrice, Firenze 2010, pp.74, 75. Il testo di Colabella contiene una esauriente descrizione della Multihalle e della complessa vicenda che portò alla sua costruzione.

Il modello sospeso fu realizzato con una rete metallica costruita ad hoc con una successione di piccole aste agganciate a minuscoli anelli in cui ogni campo del plastico rappresentava tre campi della griglia reale. Interamente fatto a mano l'hanging model fu usato dal prof. Klaus Linkwitz, con il supporto dell'Institut für Anwendung und Geodäsie im Bauwesen dell'Università di Stoccarda, per ricostruire la geometria che avrebbe assunto la Multihalle una volta costruita usando metodi matematici e fotografici già usati dalla "squadra" di Otto per il Padiglione tedesco all'Expo di Montreal e per le grandi coperture tese del complesso costruito in occasione delle Olimpiadi del 1972 a Monaco di Baviera. Attraverso le complesse procedure elaborate da Linkwitz si poté ricostruire la complessa geometria della gridshell, sottoporla a verifica strutturale e elaborare il complesso progetto esecutivo con relativo programma produttivo delle assicelle di legno e della loro posa in opera. alla fine del 1973 i progettisti ottennero la collaborazione del gruppo di specialisti della Ove Arup noti come Structures 3, coordinato da Edmund "Ted" Happold e formato da Ian Liddel, Michael Dickson e Terry Easley. Attraverso questa esperienza Ted Happold in persona e poi lo studio tecnico da lui fondato Buro Happold diventerà il massimo interprete della progettazione di ABTG del secolo successivo.

«In attesa dei risultati del lavoro del prof. Linkwitz – nota ancora Colabella – si decise di guadagnare tempo studiando le proprietà del legno e lavorando sul modello dell'Essen Shell (gridshell a singolo layer realizzato nel 1962) già immediatamente disponibile presso lo studio di Otto. La prima bozza di calcolo mostrò che la sezione minima delle assicelle di legno doveva essere pari a 10x10 cm, dimensione inadatta a garantire la loro flessibilità e quindi la deformabilità secondo le curvature progettate, a meno di non raddoppiare il numero di assicelle e dimezzare la sezione. Inizia così la sperimentazione della gridshell a doppio layer la cui maggiore complessità riguarda l'effettiva capacità di ciascun giunto di distribuire il carico a tutti gli strati per effetto dell'attrito, a formatura avvenuta, e di consentire slittamenti e rotazioni nella fase iniziale di deformazione»¹⁸.

Una volta ottenuto il "risponso" in termini geometrici dalla squadra di Linkwitz fu realizzato un secondo modello in scala maggiore in perspex che fu sottoposto alle prove di carico.

«La griglia a doppio strato di Mannheim – scrivono J. Chilton e G. Tang – è composta da due griglie ortogonali collegate di abete occidentale (*tsuga heterophylla*) di 50 x 50 mm, distanziate di 500 mm in ogni direzione della griglia ... L'abete occidentale è originario della

¹⁸ S. Colabella, cit. pp. 75, 76

costa pacifica dell'America del Nord, dove gli esemplari maturi raggiungono un'altezza di 50-70 m con un diametro del tronco fino a 2,7 m ... con una resistenza a flessione di 83,0 N/mm² e un modulo elastico di 10.400 N/mm²»¹⁹.

Per la produzione delle bacchette di legno fu scelta la Wilhelm Poppensieker GmbH di Löhne-Gohfeld che riuscì a produrle nelle ragguardevoli misure di 30/40 m di lunghezza, e in caso di necessità, a connetterle in testa attraverso un giunto a pettine (finger joint). In realtà la profondità del pettine fu mal dimensionata e molti giunti (circa 4.000) si ruppero durante la fase di "formatura" in cantiere. La soluzione scelta per ovviare a questo inconveniente fu quella di "steccare" le bacchette danneggiate come si fa con le ossa umane quando non si possono ingessare. Due bacchette di sezione minore erano affiancate a quella rotta e fissate insieme con coppie di bulloni passanti nella direzione ortogonale a quella del giunto strutturale ordinario. Per tutta la gridshell, di una superficie complessiva di 7400 m², furono usati circa 72 km di bacchette assemblate mediante 34.000 bulloni dotati di un ingegnoso sistema di doppia rondella conica per compensare l'inevitabile perdita di volume alla quale il legno sarebbe certamente andato incontro nei primi anni di esercizio, causando perdita di resistenza del giunto, dovuto al rilassamento "creep" del legno soggetto ad un carico costante. Come controventi furono utilizzati circa 7.150 m di cavi e la membrana di copertura è stata realizzata con grossi campi rettangolari fatti con un tessuto in Trevira spalmato di PVC, e prodotto dalla Sarna Kunststoff Holding AG.

«Un aspetto sorprendente dell'ipotesi progettuale di Otto – sostiene Colabella – riguarda la cantierizzazione; il guscio nella sua forma finale è il risultato della traslazione, rotazione e deformazione della griglia piana di partenza, con le due giaciture ortogonali e i nodi cerniera che configurano un meccanismo con un grado di libertà: nel passare dalla posizione orizzontale a quella "spaziale" le maglie, prima ortogonali, cambiano angolo relativo e, contemporaneamente le aste di legno cominciano a curvarsi. Giunti nella posizione finale, i nodi intermedi vengono bloccati e quelli perimetrali fissati alle travi di bordo; il carico è trasferito ai nodi per l'attrito indotto dai bulloni»²⁰. Klaus Linkwitz aveva dimostrato che affinché la gridshell conservi nel tempo le prestazioni strutturali per la quale è stata progettata, bisogna che le maglie quadrate, "rombizzate" dalle operazioni di formatura, non cambino geometria attraverso ulteriori rotazioni relative tra i due ordini di bacchette. Alla

¹⁹ J. Chilton, G. Tang, *Timber Gridshell. Architecture, structure and craft*, Routledge, London (Uk) 2017, pp. 30, 31.

²⁰ S. Colabella, cit. p. 78

eventuale rotazione relativa tra gli elementi della struttura corrisponderebbe un cambio della geometria complessiva della superficie con successivo cambio nel regime tensionale della shell; la rigidità nel piano viene raggiunta attraverso la già citata posa in opera dei

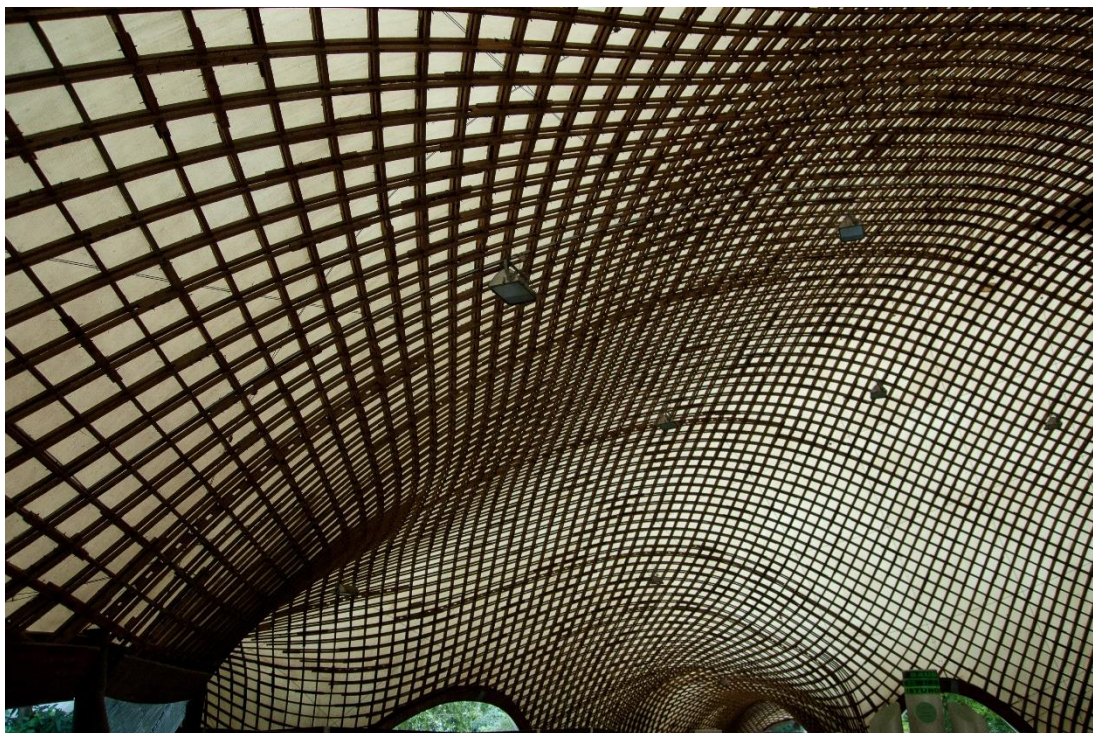


Fig. 4 interno della gridshell Multihalle di Mannheim

controventi diagonali in cavi di acciaio che trasformano i campi romboidali (deformabili) in campi triangolari (rigidi).

1.4. Il progetto delle Gridshell da flessione attiva

Si può quindi affermare che le gridshell in legno da flessione attiva si pongano come legittimo erede e, per certi aspetti, come un compendio delle principali tecniche del Novecento per la costruzione di coperture di grande luce, di cui si è scritto nel primo paragrafo di questo capitolo. Esse condividono con i Gusci in Calcestruzzo Armato le geometrie a doppia curvatura e la resistenza per forma, con le Strutture Reticolari la tecnica per attribuire al guscio discontinuo la necessaria rigidità nel suo piano, con le Grandi Cupole il simultaneo utilizzo dei due principi esposti prima, con le Strutture a Reti di Cavi il loro assumere la forma finale grazie all'esercizio di una sollecitazione esterna adeguatamente progettata. Ma condividono anche il materiale di base con le grandi strutture di Legno Lamellare, lo stato di coazione con il Calcestruzzo Armato Precompresso e la doppia fase con le Strutture

Pneumatiche che sono progettate stese con una geometria sostanzialmente planare e poi gonfiate per assumere la forma finale a doppia curvatura. Ma questa condivisione di aspetti tecnologico/strutturali, che consente di stabilire una sorta di albero genealogico di questa nuova tipologia strutturale, non deve nascondere e nemmeno attenuare la assoluta unicità delle gridshell come strutture leggere prevalentemente compresse la cui forma dipende dal processo costruttivo che si adotta per metterla in forma.

Sul metodo di progettazione delle ABTG non è sempre esistito un accordo pieno nella letteratura scientifica che ha trattato l'argomento e che spesso ha visto come protagonisti i progettisti dei pochi esempi costruiti che esistono.

Per esempio Jurgen Henricke (collaboratore di Otto nella progettazione della Multihalle) definisce così questa tipologia strutturale: «La gridshell è una struttura spaziale curva di aste e giunti rigidi. Le aste formano una griglia planare con maglie rettangolari e spaziatura costante tra i nodi. La forma di una gridshell è determinata invertendo la forma di un modello a rete sospeso. Se invertendo la catenaria otteniamo la linea di spinta di un arco privo di momenti, analogamente, invertendo la forma di una rete sospesa si ottiene la superficie di appoggio di una gridshell priva di momento»²¹.

²¹ J. Henricke, E. Schaur, *"IL" n. 10: Gitterschalen*, Universität Stuttgart (De), Institut für Leichte Flächentragwerke, Weitgespannte Flächentragwerke, Krämer, 1974.



Fig. 10 Frei Otto Atelier Warmbronn, costruzione del modello sospeso per il progetto della Multihalle di Mannheim, scale 1 : 100, ca. 1973. © Frei Otto Archives, Carlfried Mutschler + Partners Archives. © saai | Archive for Architecture and Engineering at Karlsruhe Institute of Technology (KIT)

Storicamente questa è la prima definizione che abbiamo di Gridshell, pubblicata sul numero 10 della rivista "IL" dal titolo: Gitterschalen – Grid Shells, edita dall'Istituto per le Strutture Leggere di Stoccarda²². Ma, nonostante l'indiscutibile autorevolezza del suo estensore, l'assunto secondo il quale il ricorso al metodo di progettazione fondato sull'uso dell'*hanging chain model*, e quindi il ricorso alla forma funicolare, sia necessario nella definizione delle gridshell non è del tutto condivisibile e non è stato condiviso da altri studiosi/sperimentatori.

Infatti come spiegano Ted Happold e Ian Liddel «La forma del guscio è ricavata mediante precise misurazioni del modello sospeso ed è funicolare. Se caricata solo con il peso proprio, non si genera momento flettente. 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

²² L'istituto è stato fondato nel 1964 da Frei Otto, in continuità con i suoi studi per la tesi di dottorato, riguardante il tema delle coperture sospese, ma soprattutto come evoluzione del Biology and Building Research Group, fondato nel 1961 con il biologo tedesco Gerhard Helmcke, un gruppo di ricerca formato da architetti e biologi, che studiando il rapporto architettura/natura, consente ai progettisti di lasciarsi ispirare dalla biologia per trarne forme resistenti, e al contempo le conoscenze strutturali degli architetti hanno permesso ai biologi di capire il funzionamento delle strutture naturali.

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»²³. La posizione espressa dai due ingegneri inglesi sembra più condivisibile rispetto a quella di Hennie anche per il motivo che le strutture leggere sono più frequentemente messe in crisi dai carichi asimmetrici che da quelli verticali uniformemente distribuiti (i.e. peso proprio) che danneggiano più di frequente le strutture massicce. Una grande copertura leggera teme il carico orizzontale del vento, quello del sisma, quello dissimetrico della neve quando si scioglie parzialmente perché non hanno una direzione definita nella quale si esercitano. La forma funicolare generata dalla gravità, e quindi “orientata” verso il suolo, nulla può contro sollecitazioni provenienti da direzioni orizzontali o contro sollecitazioni fortemente dissimetriche.

Nella natura, come d'altronde nel nome, delle gridshell il comportamento a guscio si ibrida con quello a graticcio e mentre il primo consente una grande rigidità in confronto alla scarsità di materiale resistente impiegato, il secondo consente di attribuire alla superficie, ove necessario, anche un minimo di resistenza flessionale che integra, o adeguatamente surroga, quella membranale tipica del guscio. Alcune delle più moderne ricerche sull'ottimizzazione strutturale delle gridshell prevedono la possibilità, peraltro tecnologicamente poco complessa, di modificare lo spessore della sezione resistente della lamina con l'obiettivo, una volta mappata la superficie, di aumentare, in certe zone particolarmente sollecitate, l'altezza della sezione per aumentare localmente l'inerzia e far prevalere la resistenza flessionale a quella membranale.

La natura ibrida delle ABTG le rende oggi particolarmente interessanti e, sicuramente, la tecnologia di punta nel campo dell'active-bending. Come sostengono Julian Lienhard e Christoph Gengnagel la ricerca sulle strutture a flessione attiva è incentrata sull'interazione tra forze imposte e forma. In questa inseparabile relazione, le discipline dell'architettura e dell'ingegneria strutturale sono equivalenti – e continua affermando che – le strutture a flessione attiva non costituiscono una tipologia strutturale, bensì un approccio metodologico. Ciò rende le strutture a flessione attiva molto diverse tra loro ... Rivedendo i recenti sviluppi

²³ E. Happold, I. Liddell, *Timber lattice roof for the Mannheim Bundesgartenschau*, “The Structural Engineers”, n. 3, vol. 53, 1975.

nel campo “strutture a flessione attiva” si può concludere che le gridshell sono l'unica applicazione di active-bending dove sono possibili strutture efficienti di grande luce²⁴.

Si può ipotizzare che l'ultima affermazione di Lienhard dipenda dalla possibilità che ci offre la gridshell di passare da struttura facilmente deformabile (quindi sostanzialmente labile come tutte le strutture da flessione attiva) durante la fase di formatura a un vero e proprio sistema iperstatico durante la fase di esercizio; questo passaggio avviene attraverso l'aggiunta di ulteriori elementi atti a impedire il progredire dei fenomeni flessionali e a bloccare la deformazione delle maglie nel piano della gridshell.

Per chiudere questo ragionamento sul progetto delle ABTG si deve notare che la principale difficoltà nella progettazione non risiede nella comprensione esatta del comportamento strutturale ma nella determinazione esatta della geometria che, come abbiamo visto, condiziona la resistenza in esercizio. Il progettista di gridshell non lavora imponendo una forma alla materia ma si limita a sollecitarla per studiarne le reazioni e, quindi, scegliere la forma che gli sembra migliore. La conformazione finale discende da una ragionevole mediazione tra ciò che il progettista desidera e il prodotto della flessione che alla fine attribuisce il suo disegno agli elementi di partenza. Il progettista di gridshell non dà una forma, la cerca.

L'altro sistema costruttivo che impone un ragionamento analogo, anche se non esattamente sovrapponibile, è quello delle tensostrutture e delle strutture a reti di cavi. In questo tipo di costruzioni la forma finale della superficie si deduce dalla dinamica che i cavi cosiddetti portanti instaurano con quelli stabilizzanti, in un equilibrio di tensioni contrastanti. Anche in questo caso il progettista determina le condizioni per le quali la forma viene generata ma non la disegna direttamente; ancora una volta sono le sollecitazioni a cui sono sottoposti gli elementi costruttivi, durante il processo di messa in opera, che ne determinano la geometria finale.

Tensostrutture e gridshell, quindi, hanno origine entrambe da una “ricerca di forma” e nascono dal genio limpido di Frei Otto, uno dei più grandi “cercatori di forma” che il Novecento abbia conosciuto. In epoca chiaramente pre-digitale Otto utilizza per progettare le sue strutture a reti di cavi (ricordiamo tra le altre il Padiglione Tedesco all'Expo di Montreal del 1967 e lo Stadio Olimpico a Monaco nel 1972) alcuni modelli fisici fondati sull'accertata

²⁴ J. Lienhard, C. Gengnagel, *Recent developments in bending-active structures*. Conference: *Creativity in Structural Design*, annual Symposium of the IASS – International Association for Shell and Spatial Structures, Boston 2018.

proprietà delle superfici “saponate” di assumere nello spazio la forma dotata dell’area minore. Questa caratteristica è comune alle tensostrutture che a parità di vincoli esterni assumono forme quasi sovrapponibili alle bolle di sapone. Per le ABTG invece Otto usa i modelli in scala ridotta realizzati con materiali elastici basandosi sulla certezza che se è vero che la simulazione in scala della resistenza strutturale di un elemento inflesso non è possibile, questo non vale per la forma che assume un elemento bidimensionale sottoposto a flessione. La linea elastica, infatti, tende ad attribuire alle aste deformate a flessione sempre esattamente la stessa sagoma.

1.5. Da Frei Otto alle realizzazioni più recenti

Dopo l’esperienza di Mannheim, Buro Happold sperimenta altre due gridshell, una scultura in legno a singolo layer per l’Earth Centre a Doncaster (1998), sollevata con una gru con l’ausilio di puntelli e una in tubi di cartone per il padiglione Giapponese all’Expò di Hannover (2000) progettata con Shigeru Ban.

Finalmente nell’aprile 2002 appare la prima vera erede degli studi di Frei Otto e Ted Happold sulla tipologia gridshell a doppio layer in legno, la struttura del nuovo edificio per il **Weald & Downland Open Air Museum**, a Singleton, vicino Chichester (West Sussex). (Fig.10)



Fig. 5 Interno della Downland grishell

In quest'area-museo, che attira una media di circa 140.000 visitatori all'anno, è esposta una collezione di edifici tradizionali inglesi in legno le cui tecniche costruttive e architettoniche risalgono fino al XIII secolo; la richiesta della committenza era che la nuova costruzione rappresentasse il manifesto dell'architettura in legno del XXI secolo, cui seguì la proposta del gruppo di progettazione composto da Edward Cullinan Architects e da Buro Happold di ripercorrere la strada segnata da Otto 25 anni prima. Nel 2003 questo edificio riceve dal Wood Awards due premi: Gold Award Winner e Structural Category Winner.

Come per la gridshell di Mannheim, il disegno e il calcolo di questa struttura è stato il frutto di continue correzioni e modifiche dai plastici di studio a quelli virtuali ai modelli di calcolo strutturale, ma a differenza di questa è significativamente più piccola e più semplice nella forma la cui definizione non è stata sviluppata a partire da un modello funicolare e quindi le aste che la compongono (50x35 mm di sezione in legno di quercia) non sono in regime di pura compressione sotto il solo peso proprio. Altre significative differenze riguardano il sistema di ancoraggio al suolo, la cantierizzazione, il giunto interno e i sistemi di chiusura. La forma a doppia clessidra dell'area workshop del museo (50x12 mt, alto 10 mt) è stata studiata a partire da un primo plastico di studio in scala 1:100 che, dopo l'approvazione da parte dei clienti, fu approfondita con un secondo plastico in scala 1:30 realizzato con bacchette di legno che consentissero una più convincente simulazione delle fasi di montaggio. La geometria del secondo plastico servì inoltre a determinare le condizioni di vincolo esterno da inserire nel programma di calcolo, mentre con il terzo modello, in metallo con piccoli carichi appesi per meglio definire le caratteristiche di resistenza delle assicelle rispetto al peso proprio, fu studiata la sequenza di costruzione del guscio²⁵.

Anche l'esperienza di Cullinan dimostra come la ricerca della forma della gridshell non sia diretta e lineare ma, al contrario, coinvolga molteplici fattori perché il risultato finale possa dirsi contemporaneamente il più efficiente sotto il profilo strutturale e architettonicamente compatibile; a ciò si aggiunga che la forma finale è strettamente connessa al modo in cui la gridshell viene deformata in fase di cantiere, dal sistema dei vincoli esterni, dalla rotazione della maglia rispetto ai bordi, dal tipo di controventi prescelti etc. Queste relazioni possono essere controllate in fase di progetto passando ricorsivamente dal modello fisico a quello di calcolo in modo che attraverso successive approssimazioni si raggiunga la soluzione più adatta in *Fabrica e Ratiocinatio* per dirla con Vitruvio. Frank Jensen racconta, infatti, che la

²⁵ Cfr. O. Kelly et al., *Construction of the Downland Gridshell*, in «The Structural Engineer» Vol. 79/n. 17, 4 September 2001.

forma finale della gridshell è stata ottenuta attraverso l'integrazione dei risultati dei modelli fisici con quelli computerizzati attraverso un metodo interattivo che parte da una forma funicolare approssimativa iniziale che viene trasformata fino a raggiungere la forma scelta e passo dopo passo se ne studia l'energia cinetica incorporata.

L'edificio su due livelli in cui insistono l'area Workshop e il laboratorio è per metà interrato nella collina di gesso; in questa zona la struttura è costituita da una scatola in muratura; il solaio intermedio, in travi in legno lamellare incollato che sbalzano oltre i muri dell'Archivio, forma la base di appoggio per la gridshell di copertura. La gridshell, lunga 50 mt, larga da 12 a 16 mt e alto da 7 a 10 mt, è composta da tre cupole convesse raccordate da due superfici a sella ed è bloccata sui lati corti da due grandi archi in legno lamellare di larice siberiano. La maglia è costituita da assicelle in legno di rovere giovane di 50x35 mm di spessore, incrociate in 4 strati a formare un doppio layer. La scelta dell'essenza legnosa deriva non solo dalle sue buone prestazioni ma anche dal fatto che molti degli edifici storici ricostruiti nel museo erano stati realizzati con lo stesso legno; che fosse "giovane" (con alto contenuto di umidità) ne consentiva una maggiore flessibilità durante la fase di formatura. In tutto sono stati impiegati 6.000 mt di assicelle ciascuna lunga circa 60 cm (per un totale di circa 10.000 giunti di testa incollati, quasi invisibili) in modo da ottenere un rovere migliorato (senza nodi, spaccature, conformazioni caotiche delle fibre, sacche di resina etc) senza sprecare troppo materiale e con qualsiasi tipo di rovere. Inoltre, per il Downland si decise di trarre vantaggio dalla flessibilità degli elementi e dalla forza di gravità, procedendo nella fase di deformazione dall'alto verso il basso: la griglia piana fu prima portata alla quota finale delle aree concave corrispondente al colmo degli arconi laterali e poi forzata a raggiungere le travi di bordo con un complesso sistema di impalcature della Peri e con accessori innovativi brevettati per l'occasione che consentissero di imprimere la deformazione trasformando le spinte verticali in spinte nel piano della superficie che cambia direzione a ogni step della deformazione.

A differenza della gridshell di Mannheim, il passo della griglia non è costante: i nodi sono posti ogni 50 cm dove i carichi sono più elevati e ogni metro nelle aree meno sollecitate. Il primo progetto era stato impostato su un passo costante di 50 cm, ma una più dettagliata analisi computerizzata dei carichi consentì di diradare la maglia dove le sollecitazioni risultavano più basse, in modo da risparmiare materia prima. Le aste diagonali, fissate nei nodi a formatura avvenuta, garantiscono resistenza a taglio e bloccano la forma²⁶.

²⁶ Cfr. F. Jensen, *The Downland grid shell*, in «The Structural Engineer», Vol. 79/n. 6, 20 March 2001.

La struttura è completamente rivestita in legno di cedro a meno di due fasce collocate subito sotto la fascia di copertura in sommità che consentono il passaggio della luce.

Un brevetto apposito fu depositato per il nodo, progettato a partire dal sistema di deformazione della griglia piana; Harris e Kelly lo descrivono così: «Consiste di 3 piatti in cui il centrale è dotato di uno spinotto per bloccare la posizione del secondo e terzo layer mentre i due più esterni servono per mantenere in posizione il primo e quarto strato durante la fase di deformazione. Due dei quattro bulloni che connettono i piatti sono utilizzati anche per collegare i diagonali che consentono di irrigidire la maglia una volta avvenuta la deformazione. Il connettore è stato poi brevettato»²⁷.

Durante il progetto della cantierizzazione si decise di non far subire all'asse longitudinale della struttura traslazioni orizzontali, il che significava imporre ai nodi centrali di ciascuna cupola disposti su quell'asse solo spostamenti verticali. Questo significò disporre le schiere della griglia piana non ortogonali tra di loro ma a 96° e 84°. La cantierizzazione è stata quindi caratterizzata dalla conoscenza esatta di tutti gli spostamenti dei nodi per incrementi successivi.

La modifica della forma del quadrilatero di partenza, con l'allungamento delle diagonali lungo l'asse longitudinale delle valli e l'accorciamento trasversale lungo il colmo di ciascuna cupola, comportava lo spostamento di materiale resistente dove maggiormente servisse. Questo risultato fu ottenuto grazie a cinghie e cricchetti che deformavano localmente gli assi attraverso la rotazione nella direzione progettata, in particolare nella zona delle valli. All'aumentare della deformazione e quindi dei raggi di curvatura, il processo di successiva deformazione diventava progressivamente più difficile, motivo per cui, a metà circa della formatura avvenuta, con i supporti verticali non più sufficienti, fu necessario installare un sistema a rastrello Multiprops connesso a ogni nodo e un argano. Il sistema di monitoraggio delle deformazioni meriterebbe un capitolo a parte; il modello virtuale, infatti, era stato sviluppato in modo da generare le coordinate di ciascun nodo da monitorarne con esattezza la posizione durante la cantierizzazione fino al raggiungimento della posizione finale, monitorata, per alcuni nodi, lasciando penzolare una corda dal nodo stesso e controllando che arrivasse al relativo punto segnalato sul calpestio in posizione perfettamente verticale. Nonostante le molte precauzioni, a deformazione avvenuta le cupole risultavano più basse

²⁷ R. Harris, O. Kelly, *The Structural Engineering of the Downland Gridshell*, in G. A. R. Parke, P. Disney *Space structures* 5, Vol. 1, MPG Books, Cornwall, 2002, p. 165

di 25 cm, ossia dotate di curvatura più lieve di quanto previsto. Il problema fu risolto ancora una volta con i Multiprops, sempre accompagnati dalle cinghie che dovevano evitare che l'innalzamento comportasse di conseguenza una variazione significativa nella lunghezza delle diagonali. A fine operazione le cupole esterne erano solo 10 cm più basse di quelle rilevate dal modello di calcolo.

Racconta ancora Kelly che per la sicurezza del cantiere si seguivano passo passo le indicazioni del Construction (Design and Management) Regulations; ma il vero rischio riguardava il sollevamento e quindi la possibile caduta di oggetti per cui tutti gli attrezzi erano legati a un cordino di sicurezza.

Una importante evoluzione del sistema costruttivo delle ABTG è quella sperimentata nella gridshell del **Savill Garden Building** (Fig.11) in Windsor Great Park, Berkshire (UK). L'edificio è stato progettato da Glenn Howells Architects con la consulenza strutturale di Buro Happold per il tetto e di HRW Engineers per l'intero edificio.



Fig. 6 Savill Garden Building Gridshell, G. Howells

Il tetto è 90 m x 25 m ed è la più grande gridshell da flessione attiva costruita nel Regno Unito. «Il ragionamento che sta alla base della costruzione della forma del reticolo di Savill – notano Harris e Roynon – è piuttosto semplice: in pianta, il perimetro viene definito utilizzando gli archi di due cerchi che si intersecano. La linea centrale curva in pianta è la linea mediana tra i cerchi. La linea centrale del tetto, in sezione, è generata da una curva sinusoidale, di

ampiezza variabile, con picchi e avvallamenti in corrispondenza delle sommità delle cupole e dei fondi delle valli. La sezione trasversale è quindi disposta lungo la linea centrale sinusoidale come una serie di curve catenarie di forma variabile. Su questa superficie viene generata una griglia di elementi di uguale lunghezza. Questo risultato è stato ottenuto con un programma scritto per definire la coordinata $z = f(x, y)$ con un'onda cosinusoidale smorzata nella direzione x e catenarie rovesciate in direzione y ²⁸.

Come abbiamo già accennato scrivendo sulla Multihalle di Mannheim, esistono limitazioni alla possibilità di curvare i listelli di una determinata sezione trasversale. Per questo motivo, lo spessore dei listelli, necessario in un reticolo a singolo strato per ottenere campate relativamente grandi, può risultare eccessivo per consentire la flessione del reticolo piatto in una forma finale che abbia raggi di curvatura molto stretti.

La soluzione a questo problema è l'utilizzo di un reticolo a doppio strato. Per un reticolo composto da quattro strati, due schiere a strato singolo sovrapposte una nella direzione delle x e una nella direzione delle y , i listelli sono di sezione sufficientemente piccola da consentire la flessione del reticolo nella geometria desiderata. Al termine della formatura, i “blocchi a taglio” (fig.12) in legno vengono posizionati tra gli strati di listelli e fissati con viti.

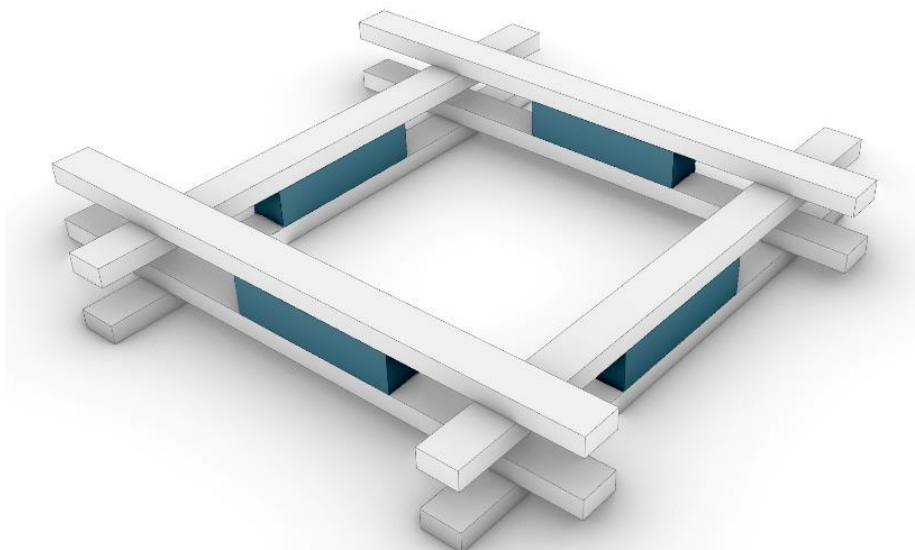


Fig. 7 Schema modulo con blocco a taglio in blu, questi impediscono lo scorrimento degli strati sovrapposti, migliorando la resistenza nel piano tangenziale della superficie

²⁸ R. Harris J. Roynon, *The Savill Garden Gridshell Design and Construction*, Paper presented at 10th World Conference of Timber Engineering, Miyazaki (Jp) 2008.

Questi trasferiscono le sollecitazioni orizzontali tra gli strati paralleli e conferiscono al traliccio le proprietà di una sezione più alta. Il potenziale di questo tipo di sistema è enorme; i tralicci a più strati possono essere utilizzati per ottenere campate sempre più ampie.

Per i reticoli della Multihalle e della Downland tutti e quattro i listelli sono stati piegati insieme, si nota come il sistema di fissaggio delle aste sovrapposte avvenga in corrispondenza del nodo cerniera della griglia (Fig. 13).

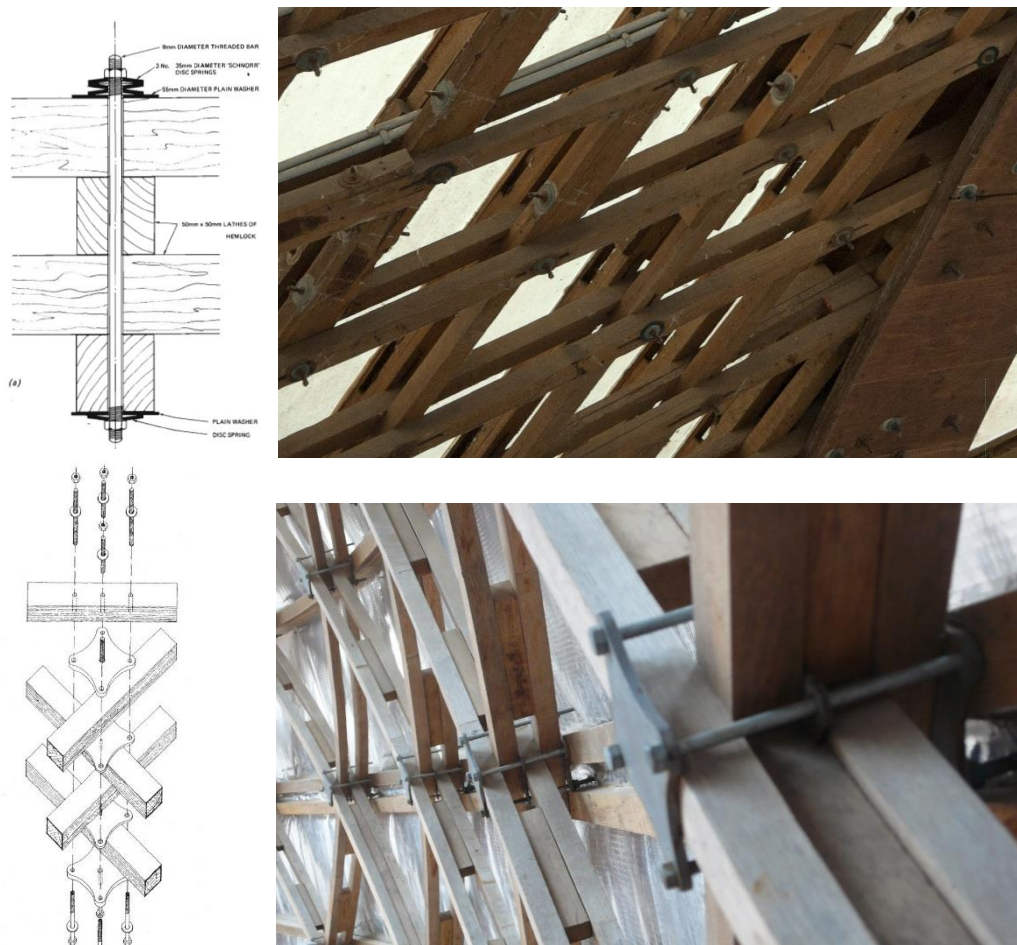


Fig. 8 In alto: Giunto di connessione layer della Multihalle realizzato con un perno passante che collega 4 aste. In basso: Giunto di connessione della Downland realizzato con un sistema brevettato composto da tre piastre collegate tramite 4 perni esterni

Per Savill (Fig.14), i due listelli inferiori sono stati messi in forma, poi sono stati messi in opera i blocchi di taglio e, infine sono stati montati, direttamente in opera, il terzo e il quarto layer di bacchette strutturali. Questo è il motivo per il quale Savill va considerato una pietra miliare nella storia delle gridshell. La tecnica di formare in opera una griglia costituita da singoli layer consente una formatura più semplice e consente di non dover porsi il problema di consentire lo scorrimento longitudinale delle bacchette durante la fase di formatura e consente anche di ottenere una maggiore distanza tra gli strati, rispetto a quella ottenuta con le precedenti gridshell, quindi di aumentare l'inerzia della sezione e valorizzare la capacità di resistenza flessionale delle gridshell.



Fig. 9 Maglia in fase di deformazione della Savill Gridshell, si nota la messa in forma solo dei primi due layer sui quali sono fissati i connettori a taglio, in attesa del 3 e 4 layer

2. Form-finding e progettazione

Forma, resistenza strutturale e strategia costruttiva: questi tre aspetti sono reciprocamente condizionati e non del tutto autonomamente definibili, in quanto strettamente interdipendenti; si intuisce quindi perché il progetto di una gridshell è vincolato alla pratica progettuale conosciuta come *Form-finding*. Quest'ultima, come si vedrà meglio in seguito (§ 3.1-3.2), è stata introdotta nel campo della progettazione nel corso del XVIII secolo, quando presentava la finalità esclusiva di *ricercare la forma* che consentiva il miglior funzionamento

strutturale di archi, volte e cupole, che si è dimostrata essere la forma funicolare. In tempi più recenti, invece, l'espressione *form – finding* ha assunto un significato ben più ampio, riferibile non soltanto all'ottenimento della forma generata dalla forza di gravità, bensì a qualsiasi pratica orientata verso l'individuazione delle forme che, a seconda della prestazione di volta in volta richiesta, rispondono al criterio prestabilito.

2.1. Metodi di progettazione delle ABG

Proviamo ora a ripercorrere le tappe fondamentali in cui si è articolata l'evoluzione del sistema di progettazione delle ABTG, per mostrare sulla base di quali presupposti è stato possibile pervenire ai risultati di oggi.

Come si è detto in precedenza (§1.3), la Multihalle di Mannheim è comunemente considerata la prima realizzazione di gridshell in legno derivante da flessione attiva in assoluto; tuttavia, essa non è stata certamente la prima sperimentazione in tale ambito effettuata da Frei Otto e dal suo team, tenuto conto che essi avevano già costruito, in precedenza, tre prototipi sperimentali, a partire dal 1962. Il primo in ordine di tempo è il padiglione realizzato a Essen, il quale è stato seguito, nello stesso anno, da quello costruito presso l'Università di Berkley e, infine, da una gridshell realizzata per l'Expo di Montreal nel 1967, in collaborazione con il Rolf Gutbrod²⁹. Queste sperimentazioni avevano consentito a Otto di consolidare i rapporti con alcuni studiosi e alcuni professionisti che, insieme a lui, misero a punto una serie di strumenti analogici e digitali per affrontare concretamente le difficoltà connesse alla progettazione delle ABTG.

Ben consapevoli, quindi, della elevata complessità del processo di progettazione, complessità aggravata dall'assenza di precedenti esperienze comparabili con questa, si compose un team di progettazione molto nutrito. Al fine di affrontare il *form-finding* della gridshell, i progettisti decisero di procedere alla produzione di modelli sospesi, i quali furono utilizzati per rappresentare la proposta progettuale; una volta approvata quest'ultima, detti modelli furono affidati al lavoro di Klaus Linkwitz.

²⁹ E. Happold, W.I. Liddel, *Timber lattice roof for the Mannheim Bundesgartenschau*, in *The Structural Engineer*, March 1975, No. 3, Volume 53

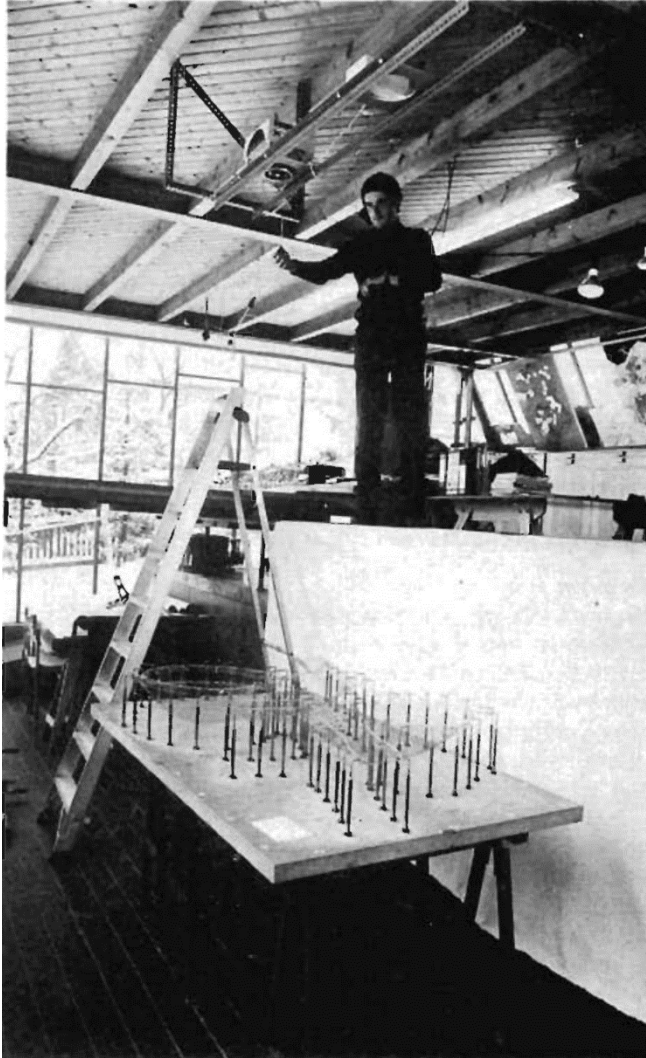


Fig. 10 Klaus Linkwitz fotografa il modello sospeso della gridshell di Mannheim

Nel dettaglio, attraverso foto stereometriche (Fig. 15), Linkwitz rilevò il modello sospeso, ma com'è intuibile la restituzione del dato presentava delle imprecisioni, derivanti da errori endemici del modello e dal rilievo strumentale. Si dovette quindi procedere a una correzione del rilievo, per ottenere le esatte coordinate spaziali, mediante l'utilizzo di un metodo sviluppato in collaborazione con l'*Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen* (IAGB): il *Force Density Method* (§3.2)³⁰. Il calcolo correttivo fu eseguito attraverso quello che era considerato il super-computer più potente disponibile all'epoca, il CDC 6600 (Fig.16). Ottenute finalmente le coordinate il team di strutturisti coordinato da Happold e Liddell passò a studiare in che modo sarebbe stato possibile valutare al meglio i carichi che agivano sulla struttura e allo studio

del carico di instabilità del guscio.

³⁰ Chilton, J., Tang, G., (2016). *Timber gridshells: architecture, structure and craft*. Oxon, UK, Routledge. p. 95-98



Fig. 11 il supercomputer CDC 6600

Nonostante l'efficacia della struttura, il metodo di generazione della forma che fu utilizzato in quella occasione si rivelò così lento e complesso che, nei 30 anni successivi circa, non si parlò più di gridshell derivanti da flessione attiva. Come è stato notato nel 2003 da Richard Harris et al.³¹, la scarsa diffusione del sistema gridshell derivante da flessione attiva era dipesa dalla complessa gestione dei calcoli e delle previsioni strutturali. Si comprende, allora, perché solo con l'avvento della "*Digital turn*" (§2.2.1) in architettura il tema progettuale delle gridshell riacquista interesse.

Fu solo intorno ai primi anni del 2000, infatti, che la sfida progettuale lanciata dalle gridshell venne colta di nuovo e a farlo furono prima Shigeru Ban³² e poi dopo due anni Edward Cullinan³³. Entrambi i progettisti vennero supportati, nei propri progetti, dal Buro Happold.

In particolare, il progetto elaborato da Cullinan e realizzato a Downland (§1.4) è stato articolato nella fase euristica attraverso la realizzazione di modelli in scala 1:100, poi 1:30 e infine di 1:43, al fine di studiare diversi comportamenti del guscio. Dopo l'approvazione della forma, si è realizzato il *form-finding* digitale, partendo dalle condizioni al contorno del modello e utilizzando un algoritmo basato sul *Dynamic Relaxation* (§3.2) appositamente scritto da Chris Williams³⁴. L'algoritmo tiene conto della resistenza a flessione delle aste e quindi configura soluzioni connesse alla forma della linea elastica che, come accennato in precedenza (§2.2.1), si distacca dalla forma funicolare.

³¹ R. Harris, J. Romer, O. Kelly and S. Johnson, *Design and construction of the Downland Gridshell*, Building Research & Information, 31:6, 427-454, 2003

³² Padiglione Giapponese dell'Expo 2000 di Hannover

³³ Museo di Downland 2002

³⁴ R. Harris, J. Romer, O. Kelly and S. Johnson, *Design and construction of the Downland Gridshell*, Building Research & Information, 31:6, 427-454, 2003 p.434-435

2.2. Progettazione computazionale

L'influenza sempre più forte degli strumenti informatici sulla vita quotidiana e sull'organizzazione economica del mondo intero ha portato alcuni studiosi, già qualche anno or sono, ad annunciare l'avvento di una Quarta Rivoluzione Industriale. Più di recente, stiamo assistendo all'affermazione dell'Intelligenza Artificiale che agisce sulla nostra quotidianità in modo ancora più pervasivo, talvolta oltre la nostra stessa consapevolezza.

Nel campo dell'Architettura e delle professioni del progetto, la diffusione dei nuovi strumenti digitali appare inevitabile: i tentativi di arginarla sembrano destinati a fallire. Come Reyner Banham scriveva, già sul finire degli anni '60: «L'architetto che si propone di utilizzare la tecnologia sa già che non lo farà per breve tempo e che, per tenere il passo, potrebbe dover emulare i futuristi e disfarsi di tutto il suo carico culturale, compresi gli abiti professionali con cui è riconosciuto come architetto. Se invece decide di non farlo, potrebbe scoprire che la cultura tecnologica ha deciso di andare avanti senza di lui»³⁵.

Banham pensava alle rapide e strutturali trasformazioni delle tecnologie industriali del suo tempo, destinate a incidere in maniera profonda non solo sulla figura dell'architetto-artigiano, ma anche su quella dell'architetto-intellettuale. La questione della complessità entrava in gioco e cambiava le carte in tavola: e nell'ambito di queste carte nuove l'informatica, fin da quegli anni, ha assunto il ruolo del jolly.

Da allora, l'architetto, chiamato a confrontarsi con la sempre più rapida mutevolezza della realtà che lo circonda, ha dovuto spesso compiere scelte metodologiche coraggiose, potenzialmente capaci di proiettarlo in territori d'azione non ben definiti. E, soprattutto a partire dagli anni '80, ha trovato nella cultura e negli strumenti dell'informatica una forma di supporto utile a facilitare il lavoro materiale e a potenziare quello "creativo". Una distinzione, quest'ultima, non irrilevante nel tempo dell'Intelligenza Artificiale. Le potenzialità dell'A.I. fanno infatti intravedere orizzonti nuovi: ma i discorsi che si intrecciano intorno a questa nuova frontiera non sempre tengono conto delle articolazioni della storia del *digital design*: una storia che, sebbene ancora breve, ha animato intensi dibattiti. Siamo convinti che il rapporto tra Intelligenza Artificiale e progettazione architettonica dovrà fare i conti con le acquisizioni di quei dibattiti e soprattutto con quella distinzione del ruolo del digitale – tra

³⁵ R. Banham, *Theory and Design of the First Machine Age*, Praeger, Westport, Connecticut (Usa) 1960, p. 330.

“supporto materiale” e “supporto creativo” – a cui abbiamo accennato. In questa prospettiva proviamo qui a evidenziare qualche nodo di quella storia.

2.2.1. Il ruolo del computazionale nella progettazione architettonica e i suoi sviluppi

«Il passaggio dalle tecnologie meccaniche a quelle digitali – sostiene Mario Carpo che ha prodotto una delle più interessanti ricostruzioni del ruolo del digitale in architettura – rappresenta un importante punto di svolta storico, e il processo di creazione e disfacimento dell’era digitale dovrebbe essere valutato nella prospettiva a lungo termine della storia delle tecnologie culturali. Ciò è particolarmente vero per l’architettura, perché l’architettura stessa, come la conosciamo, è il frutto dell’invenzione tecno-culturale moderna delle notazioni architettoniche e del design autoriale, e deriva da quella bizzarra affermazione rinascimentale secondo cui un nuovo tipo di autore umanista, chiamato architetto, dovrebbe fare disegni, non edifici»³⁶. L’evoluzione del dialogo uomo-macchina, promosso a cavallo tra gli anni ‘60 e ‘70 da Nicholas Negroponte³⁷, trova precedenti nei pareri di Douglas Engelbart³⁸, che teorizzava nel 1962 la figura dell’“architetto aumentato”, e di Christopher Alexander³⁹, che nel 1964 dava avvio alla teoria del *design methods*. La spinta innovativa era data dall’incessante affermazione dell’informatica: progettisti e pensatori erano affascinati dalla possibilità di espandere la loro capacità progettuale utilizzando nuovi strumenti capaci di supportarli durante percorsi decisionali o di rappresentazione, tanto da spingere i collettivi dell’*Architettura Radicale*⁴⁰ ad adottare una grafica “digitale” o a ipotizzare visionarie città informatiche, anche se il tutto è ancora legato a una produzione sostanzialmente “analogica”.

Le prime sperimentazioni in campo scientifico, legate all’evoluzione del pensiero logico-matematico prima e poi allo sviluppo dei nuovi strumenti digitali, furono sviluppate all’interno del MIT (Massachusetts Institute of Technology), e diedero vita a lavori come la tesi

³⁶ M. Carpo, *The digital Turn in Architecture*, Wiley-Blackwell, Chichester 2012, p.13.

³⁷ Cfr. N. Negroponte, *The Architecture Machine*, MIT press, Cambridge (Usa) 1968 e N. Negroponte, *Soft Machine Architecture*, MIT press, Cambridge (Usa) 1975.

³⁸ D. Engelbart, *Au*, Summary Report, Stanford Research Institute, Menlo Park (Usa), 1962.

³⁹ C. W. Alexander, *Notes on the Synthesis of Form*, Harvard University Press, Cambridge, Mass. (Usa) 1964.

⁴⁰ Cfr. A. Sdegno, *Computer Aided Architecture: origini e sviluppo*, DisegnareCon volume 9, UNIVAQ, L’Aquila 2016.

di dottorato di Ivan Sutherland⁴¹, che nel 1963 sviluppa Sketchpad, un primordiale software di rappresentazione grafica per il progetto di architettura. Steven A. Coons, docente al MIT nello stesso anno sostiene che «le differenti capacità dell'uomo e della macchina sono complementari, che mutuamente si rinforzano... sta diventando sempre più evidente che la combinazione tra il potenziale intellettuale dell'uomo e della macchina è maggiore della somma delle singole parti»⁴² un'affermazione molto attuale, che anticipa quello che viene oggi riconosciuto come più significativo nell'utilizzo degli strumenti computazionali.

Le prime integrazioni tra informatica e architettura in ambito professionale sono state invece, in quegli anni, appannaggio esclusivo di chi aveva la forza economica per affrontare il notevole investimento che queste nuove procedure richiedevano: l'esempio più noto è quello dello studio SOM (Skidmore, Owings , Merrill), che ha implementato autonomamente il software BOP⁴³.

Tuttavia, è ancora Carpo a metterlo in luce, «è solo negli anni '90 che si realizza la prima "svolta" digitale, in seguito alla diffusione dei personal computer tra le masse. Grazie alla capacità di tali strumenti di supportare software commerciali in grado di elaborare e controllare la topologia delle geometrie complesse, si è assistito al progressivo trasferimento orizzontale di competenze e strumenti, fino ad allora appannaggio di matematici e ingegneri anche nell'ambito della progettazione architettonica»⁴⁴.

Nel 2003 Branko Kolarevic scrive: «Le architetture digitali stanno cambiando profondamente i processi di progettazione e costruzione. Integrando progettazione, analisi, produzione e assemblaggio degli edifici con le tecnologie digitali, architetti, ingegneri e costruttori hanno l'opportunità di reinventare il ruolo del "master-builder" e di reintegrare le discipline attualmente separate dell'architettura, ingegneria e costruzione, in una collaborazione digitale senza soluzione di continuità, colmando così il divario tra progettazione e produzione che si è aperto quando i progettisti hanno iniziato a realizzare disegni, e individua nella figura

⁴¹ I. Sutherland, *Sketchpad, a man-machine graphical communication system*, Phd Thesis, MIT, Cambridge (Usa) 1963.

⁴² S. A. Coons, *An outline of the requirements for a computer-aided design system*. Proceedings – spring joint computer conference, Association for Computing Machinery, New York (Usa) 1963, p. 300.

⁴³ BOP (Building Optimization Program) è un algoritmo in grado di analizzare in fase di progettazione il costo della realizzazione dell'edificio.

⁴⁴

del “master-builder” un “gestore di processi” capace di incorporare e gestire informazioni eterogenee lungo le diverse fasi dell'evoluzione del progetto»⁴⁵.

Ma c'è di più. Guido Nardi in un saggio dal titolo *Euristica e architettura* sosteneva il singolare avvicinamento tra pensiero scientifico e pensiero artistico: «da un lato, infatti, l'epistemologia contemporanea ha messo in luce i requisiti retorici e immaginativi e gli elementi ‘irrazionali’ presenti nel procedere scientifico e dall'altro lato l'arte si è rivelata soggetta a una creatività normata, sempre a confronto con codici e sistemi di regole, che pure tenta di superare o di trasgredire»⁴⁶. Nardi intravede prospettive nuove per il mondo dell'architettura nell'intreccio tra scienza e arte, pur sapendo che queste relazioni possono essere pericolose. Fatto sta che le prime ipotesi un po' acerbe sul rapporto uomo-macchina diventano un'eredità fruttuosa quando il Computational Thinking⁴⁷ entra nel mondo della progettazione architettonica. Questo approccio logico è individuato da Carpo come l'innescio di quella che definisce “seconda fase” della svolta digitale in architettura. La presa di coscienza delle capacità computazionali sposta l'attenzione dalla ricerca di una forma soltanto *composta* alla ricerca di una forma *ottimizzata* secondo processi progettuali multicriterio, basati sull'ottenimento di determinate performance. Performance non significa solo funzione: tutte le caratteristiche dello spazio architettonico possono contribuire alla definizione dei parametri dell'ottimizzazione; quello che conta di più è la potenzialità moltiplicativa della “macchina digitale” che riesce a dare un contributo anche in fase euristica e in alcuni casi può accompagnare o addirittura suscitare nuovi modi di pensiero: «All'inizio, negli anni '90, abbiamo usato le nostre nuovissime macchine digitali per implementare la vecchia scienza che conosceamo. In un certo senso, abbiamo trasferito tutta la scienza che avevamo sulle nuove piattaforme computazionali che stavamo appena scoprendo. Ora, al contrario, stiamo imparando che i computer possono lavorare meglio e più velocemente quando lasciamo che seguano un metodo diverso, non umano e postscientifico; e troviamo

⁴⁵ B. Kolarevic, *Designing and Manufacturing Architecture in the Digital Age*, University of Pennsylvania, (Usa) 2003, p.123.

⁴⁶ G. Nardi, *Euristica e architettura*, in *Percorsi di un pensiero progettuale*, Maggioli Editore, Rimini 2010, p.5.

⁴⁷ Il pensiero computazionale è un insieme di processi mentali coinvolti nella formulazione di un problema e della sua soluzione tali che la sequenza di azioni minime che ne seguono possano effettivamente essere compiute dall'uomo o dalla macchina. «Il pensiero computazionale consiste nel risolvere problemi, progettare sistemi e comprendere il comportamento umano attingendo dai principi fondamentali dell'informatica. Il pensiero computazionale comprende anche una serie di strumenti mentali che riflettono la vastità del mondo dell'informazione». In J. Wing, *Computational Thinking*. In *Communication of ACM*, 49, 2006, pp. 33 – 35.

sempre più facile lasciare che i computer risolvano i problemi a modo loro, anche quando non capiamo cosa fanno o come lo fanno. In senso metaforico, i computer stanno sviluppando una propria scienza, un nuovo tipo di scienza. Così, proprio come la rivoluzione digitale degli anni '90 (nuove macchine, stessa vecchia scienza) ha generato un nuovo modo di fare, la rivoluzione computazionale di oggi (stesse macchine, ma una scienza nuova di zecca) sta generando un nuovo modo di pensare»⁴⁸.

È importante constatare quindi, come un approccio alla progettazione di tipo computazionale non sia limitato alla mera questione tecnologica dell'architettura, ma che invece, riesce ad avere un taglio pluridisciplinare, mettendo a fuoco tutte le diverse fasi del processo⁴⁹.

2.2.2. I termini del computazionale in architettura

Nel dibattito sul rapporto tra il computazionale e la progettazione architettonica spesso si incontra l'utilizzo di termini ambigui e talvolta sovrapponibili. Su questa varietà di aggettivi la comunità scientifica prova da tempo a fare chiarezza, e numerosi sono stati i tentativi di dare definizioni e portare avanti studi tassonomici. Per farne una disamina si può partire dal lavoro svolto da Inês Caetano, Luis Santos e António Menezes Leitaó ricordando che la parola "*computational*" è un termine inglese derivante dal latino *computatio*, ossia calcolare: «Molti termini, tra cui digitale, computazionale e algoritmico, sono stati usati per descrivere i computer. Quando i professionisti (i progettisti ndr.) hanno iniziato ad usare i computer nel progetto, i differenti utilizzi sono stati identificati come Digital Design (DD), Computational Design (CD), Algorithmic Design (AD), e così via»⁵⁰. Tuttavia, da queste definizioni sono derivate sovrapposizioni ed ambiguità che proveremo a ridurre a partire dalla distinzione, basata sul differente utilizzo del mezzo informatico, tra Digital Design e Computational Design.

Il *Digital Design* allude all'utilizzo dello strumento informatico nel processo di rappresentazione grafica: il computer amplia le capacità di rappresentazione e controllo delle forme.

⁴⁸ M. Carpo, *The second digital turn*, The MIT Press Ltd, (Usa) 2017, p. 7.

⁴⁹ Cfr. G. Nocerino, *Computational Design per la Progettazione Tecnologica*, Tesi di Dottorato, Università Federico II, Napoli 2022, p.29.

⁵⁰ Cfr. I. Caetano, L. Santos, A. Leitaó, *Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design*, *Frontiers of Architectural Research*, volume 9 issue2, 2020, pp. 287 e 300.

Il *Computational Design* implica invece l'uso delle capacità dei computer di elaborare dati: una qualità che amplifica le capacità di investigazione della forma sulla base di valori prestazionali in qualche modo quantificabili. In questo secondo caso la possibilità di *programmare* il processo progettuale rende il progettista capace di controllare un flusso di dati maggiore durante la fase euristica, e di avere uno scambio continuo con il suo "compagno" (*co-pilot*) di lavoro. Il *Computational Design* è in sintesi un approccio alla progettazione che porta al suo interno l'utilizzo delle capacità di elaborazione dati del computer attraverso quattro tipi di attività. La prima riguarda l'automatizzazione delle procedure progettuali che possono essere basate sulla deduzione, sull'induzione o sull'astrazione. La seconda riguarda la possibilità di svolgere in parallelo diverse operazioni di progettazione. La terza è la gestione rapida e flessibile delle variazioni progettuali, mentre l'ultima dà al progettista la possibilità di ottenere riscontri immediati rispetto alle performance ricercate, ricordando che la performance non è solo un dato prestazionale scientifico, come la portanza, il flusso di aria o la percezione acustica, ma può essere un valore che riguarda gli aspetti dimensionali e geometrici che definiscono la forma degli spazi.

Termini associati alla progettazione come *Parametric*, *Generative*, *Performance-based*, *Algorithmic*, *Evolutionary* e altri, sono spesso utilizzati come sinonimi: in realtà descrivono differenti modi di utilizzare il *Computational Design*, che li comprende tutti.

Per semplificare, possiamo raggrupparli in tre macro gruppi: il *Parametric Design*, il *Generative Design* e l'*Algorithmic Design*.

Una rapida analisi della letteratura esistente ci aiuta a capirne differenze e similitudini.

Parametric Design: l'enciclopedia Treccani tratta il termine parametro, in ambito matematico, con una lunga definizione, che nella parte finale sintetizza con «sotto il nome di parametri si raccolgono addirittura tutte le variabili, che compaiono in un problema matematico». Il termine parametrico, quindi, significa "relativo o espresso in termini di uno o più variabili". Luigi Moretti, da alcuni considerato uno dei padri della progettazione computazionale, definì l'architettura parametrica come l'insieme di «soluzioni, incentrate sui 'parametri' quantizzabili, dei fenomeni che costituiscono le funzioni per le quali cerchiamo le forme; 'parametri' che di conseguenza, singolarmente e nelle loro interrelazioni, anche esse quantizzabili, fissano i limiti entro i quali si individuano, si disegnano, le forme che quelle funzioni esaudiscono»⁵¹. Ancora Kolarevic nel 2003 sostiene che «nell'architettura

⁵¹ L. Moretti, *Ricerca matematica in architettura e urbanistica*, Moebius, IV, 1, 1970, p.30.

parametrica, è il parametro di uno specifico dato a essere dichiarato, non la sua forma. Così assegnando diversi valori ai parametri, possono essere creati differenti oggetti o configurazioni. Le equazioni possono essere usate per descrivere la relazione tra gli oggetti, così da definire una geometria associativa. In questo modo, l'interdipendenza tra gli oggetti può essere stabilita, così come è definita la loro modalità di trasformazione»⁵² cosa che consente l'elaborazione di diverse soluzioni, tutte capaci di assicurare la coerenza complessiva.

Una deriva del *Parametric Design* è il Parametricismo, definito da Patrik Schumacher come uno «stile architettonico contemporaneo che ha raggiunto un'egemonia pervasiva all'interno dell'avanguardia architettonica contemporanea»⁵³; questo punto di vista nella trattazione scientifica è insolito e fuori registro. Mentre il *parametric design* si concentra sul controllo del progetto, il parametricismo, con la sua desinenza, allude chiaramente a un manifesto architettonico, e quindi alla volontà di limitarsi alle questioni connesse al linguaggio architettonico. Per questo motivo la definizione di Schumacher non può essere considerata interna al nostro tentativo classificatorio.

In sostanza, sulla base della letteratura, possiamo descrivere il Parametric Design come un processo di progettazione basato sul pensiero computazionale che utilizza regole vincolanti e parametri variabili dai quali si ottiene uno specifico risultato geometrico/formale.

Generative Design: il dizionario Treccani definisce generare come «Dare vita a un essere della stessa specie». Alla fine degli anni '70, Mitchell descrisse i sistemi di progettazione generativa (1975) come dispositivi in grado di generare potenziali soluzioni a un dato problema. Frazer et al. (2002) descrissero GD come l'uso dello "spazio virtuale del computer in un modo analogo ai processi evolutivi in natura". Non tutti gli autori sono concordi nel limitare il GD ai processi evolutivi, perché lo considerano un approccio progettuale basato su processi algoritmici o su regole che generano soluzioni multiple e, possibilmente, complesse. Quindi possiamo considerare parte del GD gli automi cellulari, i metodi evolutivi, shape

⁵² B. Kolarevic, *Designing and Manufacturing Architecture in the Digital Age*, University of Pennsylvania (Usa) 2003, p.119, <http://www.upenn.edu/gsfa>.

⁵³ P. Schumacher, *Parametricism as style: parametricist manifesto*. In: *The Darkside Club*, 11th Architecture Biennale, Venezia, 11 September 2008.

grammar⁵⁴, L-system⁵⁵, l'auto-organizzazione, i modelli basati sugli agenti e i sistemi a sciami». Ne deriva che l'approccio generativo è privo di una corrispondenza lineare input-output – presente invece nel *Parametric Design* – perché fonda le proprie regole su logiche più complesse: algoritmi genetici, algoritmi ricorsivi, solutori evolutivi, simulatori, etc. Questo rende le soluzioni proposte dai sistemi Generativi più imprevedibili e non univocamente determinabili: resta una prerogativa del progettista, con la sua sensibilità e competenza, la scelta finale tra le soluzioni proposte dal sistema generativo. Questo risulta particolarmente vero quando l'applicazione di questo metodo si basa sulle prestazioni (Performance Based Generative Design), in quanto le soluzioni proposte sono sempre dei compromessi tra gli obiettivi da perseguire.

Algorithmic Design: il dizionario Treccani definisce algoritmo «qualunque schema o procedimento matematico di calcolo; più precisamente, un procedimento di calcolo esplicito e descrivibile con un numero finito di regole che conduce al risultato dopo un numero finito di operazioni, cioè di applicazioni delle regole». Muovendo da questa definizione dovremmo intendere quindi che gli algoritmi sono alla base di qualsiasi processo informatico; invece definiamo Algorithmic Design, il processo di progettazione che affida alla implementazione di un algoritmo, creato ad hoc, la risoluzione dei problemi progettuali. Quindi al di là delle definizioni date da autorevoli studiosi, e in contrasto con quanto dichiarato da Caetano et al. cioè che «Algorithmic Design è un sottoinsieme del Generative Design, perché esclude i processi evolutivi data la difficoltà a supportare la tracciabilità richiesta»⁵⁶, possiamo definire l'Algorithmic Design come un livello superiore, un insieme più ampio e quindi comprensivo del Parametrico e del Generativo, in quanto entrambi i metodi si esplicitano attraverso la scrittura di Algoritmi. La precedente definizione parrebbe equiparare l'Algorithmic e il Computational Design, ma questi due approcci sono su livelli diversi, mantenendo il computazionale più ampio. Questo accade perché nel Computational Design rientrano quegli strumenti informatici atti a supportare le capacità creative grazie all'impiego della "forza" di calcolo dei computer, e per questa ragione anche l'AI rientra in quest'ultimo insieme, ma dato che l'utilizzo dell'intelligenza artificiale, da parte dell'utente finale, non

⁵⁴ Introdotte per la prima volta da George Stiny e James Gips nel 1971, le Shape grammars sono nel computing una classe specifica di sistemi di produzione che generano forme geometriche.

⁵⁵ Sviluppati nel 1968 da Aristid Lindenmayer, gli L-System forniscono una teoria matematica per la creazione di organismi multicellulari con ad esempio piante, foglie e fiori. Alla base di questo meccanismo opera un sistema di riscrittura che, secondo regole precise, ripete un modulo grafico prestabilito.

⁵⁶ Cfr. I. Caetano, L. Santos, A. Leitao, cit.

avviene tramite la stesura di algoritmi, possiamo individuare all'interno dell'insieme Computational Design due sottoinsiemi, uno riguardate la progettazione algoritmica e l'altro l'intelligenza artificiale.

Ritornando quindi alla progettazione algoritmica, la possiamo definire che quest'ultima è un approccio generale che si basa sul pensiero computazionale e si esplicita sotto forma di istruzioni chiare e in numero finito; questa può essere parametrica nel caso di un algoritmo semplice in cui impostati i dati, i vincoli che li legano e le regole delle loro variazioni, otteniamo un risultato univoco; oppure generativa nel caso di algoritmi più complessi, non lineari e molto spesso orientati alla ricerca della soluzione che meglio risponde a una o più performance richieste.

Torniamo in conclusione alla distinzione tra l'uso del digitale come "supporto materiale" e come "supporto creativo", a cui abbiamo fatto cenno all'inizio: non è difficile comprendere ora che il Digital design offre ai progettisti un "supporto materiale" (come fa il CAD_Computation Aided Design) o i programmi BIM_Building Information Modeling), mentre il Computational Design si propone loro come "supporto creativo". Questo significa, insomma, che non tutti i programmi utilizzati per la progettazione architettonica hanno a che vedere con la "progettazione computazionale". E questo indipendentemente dal fatto che tutte le "specie di programmi digitali" siano fondate su algoritmi anche molto complessi.

Ciò che segna la differenza tra i software per la progettazione computazionale e gli altri programmi è che questi ultimi offrono al progettista algoritmi "prefabbricati" che riescono a svolgere egregiamente le più comuni operazioni progettuali.

Basati su algoritmi "prefabbricati" sono (per ora) anche i programmi di Intelligenza Artificiale che compiono la magia di trasformare parole in immagini, righe di testo in viste tridimensionali. Se vogliamo, l'AI rappresenta un'ulteriore semplificazione per l'utente, che non deve necessariamente padroneggiare la "disciplinaria" dell'architettura per generare immagini anche molto suggestive ed efficaci, ma ha in mano uno strumento di straordinaria potenza creato ad hoc per rendergli la vita facile: un (quasi) profano che inizia a usare un programma avanzato di Intelligenza Artificiale è infatti capace di ottenere le prime immagini nello stesso giorno in cui ha iniziato. Ovviamente il raffinato palleggio parole/immagini è già un'abilità del tutto inedita tra quelle richieste ai progettisti e quindi la qualità delle immagini cambia se l'utente è un esordiente o già un esperto.

Dal lato della progettazione computazionale invece il progettista è aiutato a trasformarsi lui stesso in programmatore, attraverso un percorso lungo e faticoso che richiede l'apprendimento di abilità specifiche e, in alcuni casi, il capovolgimento di convinzioni radicate. L'algoritmo posto alla base dell'Intelligenza Artificiale, dei CAD e dei BIM si "usa", quello della progettazione computazionale si "costruisce".

In tutti i casi l'affermazione dei nuovi strumenti allarga l'orizzonte del progettista aprendo a nuove possibilità. Che queste siano straordinarie, desiderabili, pericolose o dannose è sempre la storia degli anni successivi a deciderlo. L'Intelligenza Artificiale è infatti ancora troppo giovane per consentire un giudizio definitivo sui suoi possibili utilizzi. Già sappiamo che alcuni utenti molto esperti la stanno usando per operazioni di programmazione digitale, e con questo sconfessano in parte quanto abbiamo sostenuto nelle righe precedenti e ci obbligano a un'estrema cautela nei giudizi.

In conclusione, l'insieme ricco e articolato degli strumenti di grande efficacia che consentono la progettazione computazionale è un arcipelago all'interno del quale il progettista trova metodi nuovi e potenti per fare operazioni abituali oppure sistemi per gestire più efficacemente il rapporto tra il progetto e tutto ciò che lo circonda e, in alcuni casi, lo motiva. E trova anche una piattaforma per far interagire efficacemente questioni anche remote e ottenere che esse forniscano, ove richiesto, il loro contributo alla definizione della forma/layout funzionale/processo costruttivo dell'architettura, della città o del paesaggio.

2.2.3. La progettazione computazionale delle ABTG

L'interesse per le Active Bent Timber Gridshell ha recentemente conosciuto un notevole incremento come dimostra l'aumento, del 3000% delle pubblicazioni scientificamente rilevanti avvenuto nell'ultimo decennio⁵⁷. In questi anni sono stati pubblicati studi teorici e ricerche sperimentali con approfondimenti nell'ambito dell'ingegneria strutturale e della scienza dei materiali. L'argomento principale di una gran parte di questi lavori è naturalmente connesso al comportamento strutturale di tali costruzioni con relativi studi sui processi di ottimizzazione della forma finalizzati alle migliori performances strutturali e ad arginare i fenomeni di instabilità locale e globale. Nel campo del progetto e dell'innovazione tecnologica, invece, sono stati pubblicati alcuni studi sperimentali finalizzati alla messa a

⁵⁷ Dyvik, Steinar & Manum, Bendik & Rønnquist, Anders. (2021). Gridshells in Recent Research-A Systematic Mapping Study. Applied Sciences. 11. 10.3390/app112411731.

punto di sistemi costruttivi, con particolare attenzione agli aspetti processuali con l'obiettivo di implementare soluzioni tecniche e strumenti digitali adeguatamente "abbinati".

Alcuni studiosi autorevoli, in particolare, hanno affrontato i temi inerenti all'oggetto della presente ricerca mettendo in evidenza le difficoltà progettuali del sistema ABTG con specifico riguardo alla simulazione dei processi di formatura e quindi al *form-finding*⁵⁸.

Alla luce dell'esperienza personale maturata sul campo e dello studio della letteratura in materia, oggi si può affermare che i passaggi necessari a eseguire un corretto *form-finding* sono tre e si distinguono sulla base del grado di approfondimento del problema. Il primo è la definizione di una "superficie-obiettivo"⁵⁹, generalmente ideata durante la fase euristica del progetto architettonico, che spesso esula da qualsiasi considerazione di tipo meccanico-fisica (Fig.17).



Fig. 12 superficie di input generica

Il secondo è la discretizzazione della superficie continua in una maglia con *pattern* quadrangolare regolare, composta da segmenti di pari lunghezza, a esclusione di quelli sui bordi (Fig.18).

⁵⁸ Processo di progettazione mediante il quale si determina la forma di strutture tramite l'applicazione di forze esterne che agiscono su elementi che da soli non risultano in equilibrio statico.

⁵⁹ Superficie tridimensionale alla cui forma si cerca di far aderire la gridshell

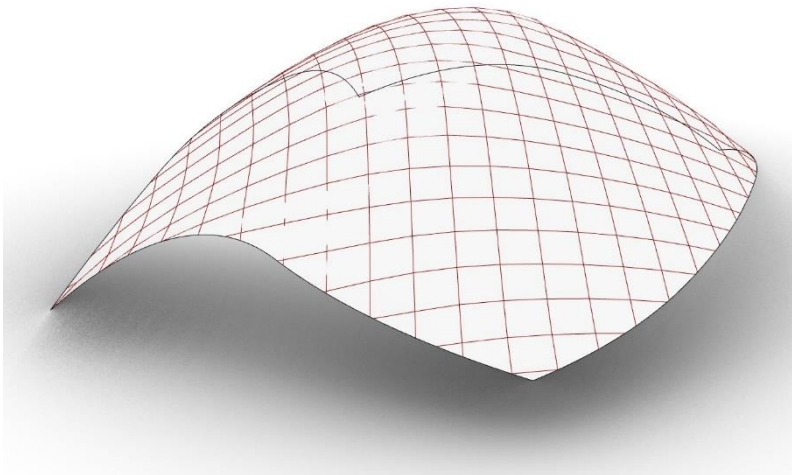


Fig. 13 maglia con pattern quadrangolare regolare su superficie generica

Il terzo passaggio prevede la trasformazione di questi segmenti in oggetti con caratteristiche fisiche tali da poter simulare la resistenza a flessione degli elementi costruttivi reali.

Nel contesto di questa procedura in tre fasi, ormai largamente condivisa dalla comunità scientifica, il secondo passaggio in particolare consente di trovare la migliore maglia piana, attraverso il reticolo di Chebyshev⁶⁰, ossia attraverso il disegno di una maglia quadrangolare a passo regolare in grado di adattarsi a qualsiasi superficie. Il terzo passaggio, che invero si dimostra più complesso da affrontare rispetto agli altri, è quello della simulazione del comportamento fisico di elementi soggetti a grandi deformazioni, mediante le quali si intende ottenere la flessione della linea elastica.

Invero, l'esistenza di tali passaggi è riscontrabile nel processo progettuale delle gridshell sin da quello delle prime realizzazioni, anche se occorre tenere a mente che nel corso del tempo si è assistito ad un'evoluzione nell'approccio.

⁶⁰ Reticolo di Chebyshev, dal nome del matematico che, nel 1878, avendo uno stipendio piuttosto modesto, accettò un contratto per ottimizzare il taglio delle uniformi militari. Il corpo umano è infatti una forma complessa che è complicato coprire con un tessuto piatto senza pieghe. Fino alla fine del XIX secolo, i vestiti erano realizzati con gli occhi e quindi non montati. La sartoria personalizzata era un'arte costosa e dispendiosa in termini di tempo.

Come già raccontato in precedenza, Mannheim⁶¹ è stata progettata attraverso la realizzazione di diversi modelli in scala e il rilievo stereo-fotogrammetrico del plastico finale, al fine di ottenere le coordinate spaziali di ciascun nodo. In quel caso, affrontato esclusivamente con strumenti analogici, il rilievo risultò altamente impreciso e per regolarizzare nel dettaglio il modello si usò il *Force Density Method*⁶² (§2.2, §3.2) il quale, come si vedrà dettagliatamente in seguito (§3.2) serviva a simulare lo stato tensionale tra gli elementi.

Tra il 1974 ed il 2002 non si registrano significative realizzazioni e ciò, come si è detto in precedenza, è dovuto all'estrema complessità riscontrata dai progettisti in fase di progettazione e realizzazione. Tuttavia, quel tempo ha fatto da scenario all'evoluzione tecnologica, su cui ci si è soffermati nel paragrafo precedente, la quale ha penetrato anche il campo della progettazione architettonica, tanto che, all'indomani del nuovo millennio, la ricerca sulle gridshell è tornata ad acquisire interesse.

Infatti, dopo la Multihalle di Mannheim, in luogo del metodo quasi tutto analogico utilizzato in quella occasione, sono stati impiegati procedimenti integralmente computazionali, basati sul *Dynamic Relaxation* (DR) (§3.2), i quali sono risultati sicuramente più efficaci. Sul punto, Richard Harris ha osservato che «l'analisi computerizzata della gridshell di Downland del 2002 è basata sulla tecnica del DR, un processo iterativo che risolve un sistema di equazioni non lineari (...) Questo metodo è stato inventato da Alistair Scott Day (1965) e successivamente sviluppato da Mike Barnes. Questa tecnica è comunemente usata per modellare ed analizzare le strutture tese (...) La Downland Gridshell non è una forma funicolare pura; un modello sospeso non può essere utilizzato per modellare quella forma, è stato modificato il software per consentirgli di gestire la rigidezza flessionale delle bacchette di legno. Sono stati usati elementi con flessione elastica, che possono sopportare trazione, compressione e taglio durante la fase di form-finding»⁶³. Inoltre, con specifico riferimento al DR, Lina Bouhaya ha spiegato che «si tratta di un metodo iterativo che descrive il movimento della struttura dal momento del carico al suo equilibrio»⁶⁴.

⁶¹ Ci si riferisce alla Multihalle di Mannheim, costruita nel 1974 ad opera di Frei Otto.

⁶² Metodo di risoluzione lineare per il form-finding, basato sul calcolo dell'equilibrio statico dei nodi soggetti alle forze delle aste di collegamento

⁶³ R. Harris, J. Romer, O. Kelly, S. Johnson, *Design and construction of the Downland Gridshell*. Building Research and Information, 2003

⁶⁴ L. Bouhaya, Ph.D. Thesis – Optimisation structurelle des gridshells. École doctorale science ingénierie et environnement, 2010

Nell'ultimo decennio, poi, lo sviluppo dei sistemi computazionali - e soprattutto la loro fruibilità - è aumentata considerevolmente, tanto da spingere progettisti sempre più numerosi a creare i propri strumenti di lavoro, in autonomia, tramite la programmazione; ci si riferisce a strumenti creati *ad hoc* per soddisfare le esigenze specifiche che il progettista deve affrontare.

Lo studio dei metodi di progettazione delle ABTG, naturalmente, non è rimasto indifferente a questa evoluzione. Analizzando le ultime pubblicazioni, infatti, emerge che il *workflow* di lavoro è abbastanza omogeneo, ma presenta differenze con riferimento ai metodi impiegati e agli obiettivi finali perseguiti.

Nell'ambito delle sperimentazioni più recenti, si analizzano di seguito i risultati raggiunti da cinque diversi gruppi di lavoro che, sulla base di quanto è stato detto prima, hanno utilizzato un metodo di progettazione computazionale, sviluppando ciascuno il proprio *workflow*, ognuno diverso dall'altro.

Fin da ora, si può osservare che, nel complesso, tutti i gruppi di ricerca hanno elaborato un *workflow* suddiviso in tre fasi: l'assunzione della superficie, la discretizzazione della superficie in un grigliato e la simulazione fisica del comportamento flessionale. Ciò posto, essi hanno affrontato con modalità anche solo parzialmente diverse la risoluzione delle problematiche da affrontare.

L'Unità di Ricerca **Gridshell.it**, guidata dal prof. Sergio Pone⁶⁵, della quale faccio personalmente parte dal 2011, ha elaborato – e quindi dispone di - tre differenti strumenti digitali atti alla progettazione di ABTG, ciascuno dei quali è destinato a svolgere funzioni diverse. Ci si riferisce a: *GridMaker* (2015), *GFFT* (2012) ed *Informer* (2015), i quali sono stati sviluppati in ambiente *rhino/grasshopper*⁶⁶ e risultano adoperabili solo da utenti in possesso del *know how* necessario; quest'ultimo consiste non tanto e non soltanto in adeguate capacità informatiche, ma anche e soprattutto in specifiche conoscenze delle problematiche connesse al sistema strutturale.

Dei tre strumenti sopra citati, *GridMaker*, che viene adoperato nella fase due del *workflow*, è dedicato al disegno del reticolo di Chebyshev su una superficie individuata e opera tramite

⁶⁵ Sergio Pone è prof. ordinario di Tecnologia dell'Architettura, svolge da anni la sua attività di ricerca nel campo delle ABTG con numerose pubblicazioni autorevoli sull'argomento

⁶⁶ Grasshopper è un linguaggio di programmazione visual (VPL) integrato, nella sua versione stabile 1.0 nel software di modellazione 3D Rhinoceros (McNeel). Il suo creatore è David Rutten che ha basato sulla filosofia della sharing knowledge la crescita e l'evoluzione di grasshopper

un processo di morfogenesi computazionale, generando la conseguente maglia piana. GFFT, invece, viene utilizzato nella fase successiva (fase 3) e simula la flessione della maglia piana tramite un sistema analitico definito *Particle Spring*⁶⁷. Nella medesima fase lavora anche il terzo strumento, *Informer* che è destinato a ottimizzare, laddove necessario, il processo di formatura finale, tramite l'individuazione di punti sulla griglia deformata su cui posizionare puntoni e tiranti, affinché essa si avvicini il più possibile alla superficie di partenza.

Come si vedrà in seguito, i risultati della ricerca condotta dal gruppo Gridshell.it sono stati complessivamente positivi e si sono tradotti nella realizzazione di 15 gridshell di diversa forma e dimensioni.

Il secondo gruppo di lavoro che, invero, è costituito soltanto da Bernardino D'Amico⁶⁸ (2015), si è posto come obiettivo quello di implementare il processo di *form-finding*⁶⁹ e ottimizzare lo spessore del guscio in base alle sollecitazioni esercitate da carichi esterni.

La strategia di *form-finding* utilizzata da D'Amico parte dall'assunzione di una superficie di riferimento così come il precedente gruppo ma, a differenza di quanto fa quest'ultimo, egli utilizza il DR in entrambe le due fasi successive del *workflow*. In particolare, la fase di discretizzazione della superficie (fase 2) non avviene tramite un processo geometrico (metodo del compasso) ma mediante un processo di simulazione dinamica. Infatti, D'Amico "costringe" una maglia piana ad adagiarsi alla superficie obiettivo, facendola assestare in una posizione di equilibrio aderente alla superficie. Nella fase successiva (fase 3), D'Amico sottrae la superficie obiettivo lasciando la maglia deformata appena ottenuta libera di trovare la propria configurazione naturale attraverso il rilassamento dinamico.

È importante sottolineare che il metodo del DR implementato in questo caso è caratterizzato da sei gradi di libertà (corrispondenti a 3 traslazioni e 3 rotazioni(Fig.19)), in modo da poter valutare anche la torsione degli elementi. L'algoritmo progettato è realizzato in ambiente *Python*⁷⁰ e non se ne prevede l'utilizzo da parte di utenti diversi dal progettista del sistema informatico.

⁶⁷ Metodo analitico per la risoluzione dell'equilibrio statico di modelli soggetti a grandi spostamenti attraverso la seconda legge di Newton $F=m \cdot a$

⁶⁸ Bernardino D'Amico ha fatto parte della U.R. Gridshell.it fino a quando non ha assunto il ruolo di PhD student e poi di Lecturer alla Napier University of Edinburgh (Uk)

⁶⁹ B. D'Amico, A. Kermani, H. Zhang, A. Pugnale, S. Colabella, S. Pone, *Timber gridshells: Numerical simulation, design and construction of a full scale structure*, "Structures" 3 2015 227–235,

⁷⁰ linguaggio di programmazione <https://www.python.it/about/>

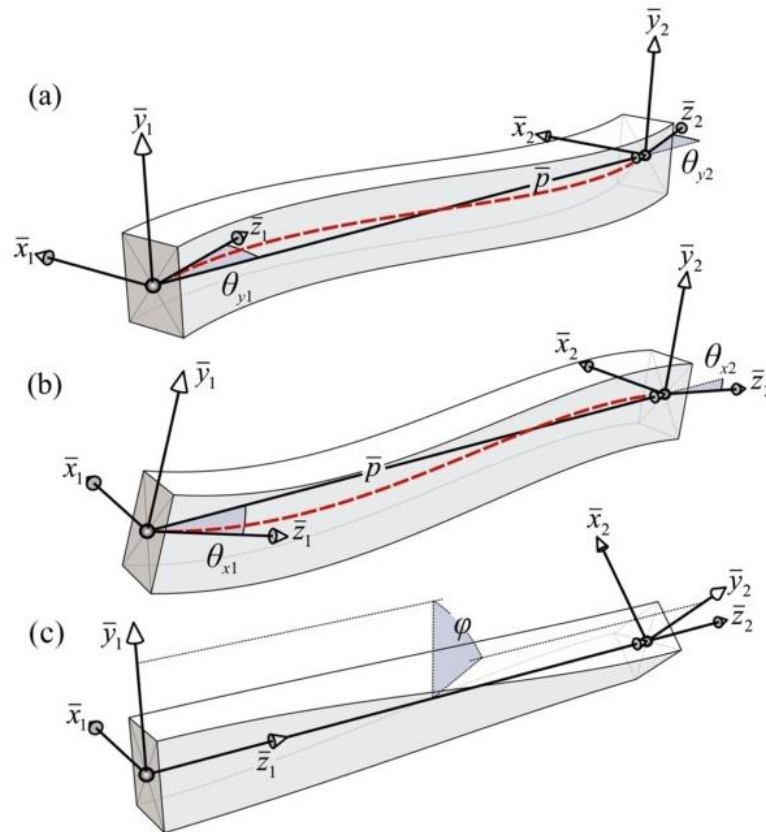


Fig. 14 rappresentazione dei tre gradi di libertà rotazionali attorno ai tre assi Y (a), X (b) e Z (c)

Il terzo gruppo in esame è rappresentato da Lionel Du Peloux⁷¹ (2017), il quale ha osservato che il progetto delle gridshell rappresenta “il percorso dalla forma alla struttura” e definisce la ricerca di forma come un processo iterativo che trova risoluzione attraverso i tre già menzionati passaggi principali.

Il lavoro svolto da Du Peloux è articolato in due momenti successivi: il primo riguarda l’elaborazione del *workflow* che è stato utilizzato per il progetto della EPHEMERAL Cathedral (2013)⁷² (fig.20), mentre il secondo ne rappresenta un’evoluzione.

Con riferimento al primo momento della ricerca, Du Peloux ha elaborato un *workflow* la cui prima fase si concentra sull’ottimizzazione della forma. A differenza di quanto fatto dai due gruppi precedenti, infatti, in tale fase egli non si limita ad acquisire una determinata

⁷¹ L. Du Peloux, *Modeling of bending-torsion couplings in active-bending structures. Application to the design of elastic gridshells*, 2017

⁷²



Fig. 15 *Ephemeral Cathedral*, Parigi, 2013, L. Du Peloux, F. Tayeb, O. Bavarel, JF. Caron

superficie, ma prima di utilizzarla ne analizza le curvature con lo scopo di ottimizzarla sin da subito, secondo i raggi di curvatura ammissibili per le aste che si utilizzeranno per la costruzione. Nella seconda fase, Du Peloux discretizza la superficie ottenuta in una rete geometrica composta da segmenti di pari lunghezza, tramite il già descritto metodo del compasso⁷³. Va però osservato che le possibili reti, generate a partire da regole esclusivamente geometriche, non tengono conto delle condizioni meccaniche; per questo motivo tra i reticoli possibili si scelgono quelli che minimizzano la curvatura.

L'ultima fase del workflow di Du Peloux consiste nell'individuare la geometria della griglia in equilibrio meccanico e calcolarne il corrispondente sforzo flessionale; detto calcolo è elaborato numericamente ricorrendo ad un algoritmo basato su DR e comprende i seguenti passaggi:

1. Deformazione della griglia attraverso l'applicazione di spostamenti dalla posizione di riposo a quella generata tramite compasso
2. "Rilassamento" della griglia fino al raggiungimento dell'equilibrio meccanico
3. Calcolo dello sforzo di flessione della geometria in equilibrio

⁷³ Otto F., Henniecke, Matsushita, (1974). IL 10: Gitterschalen Gridshells, Institut für Leichte Flächentragwerke.

4. Processo iterativo in cui la geometria e lo sforzo flessionale calcolato sono reimmessi nella fase 2.

Il calcolo di Du Peloux è stato svolto con il modulo di *form-finding* del *software* commerciale Oasys GSA⁷⁴, il quale lavora con un algoritmo di DR a 6 gradi di libertà, analogo a quello utilizzato da D'Amico, impiegando anche smorzamento viscoso e cinetico, come era stato suggerito da Sigrid Adriaenssens nel 2000⁷⁵. Tenuto conto che i calcoli necessari alla convergenza del risultato si sono rivelati complessi e che essi richiedono un sensibile consumo di tempo, Du Peloux ha valutato opportuno sviluppare, successivamente, uno specifico strumento di *form-finding* dotato di un maggior livello di interattività rispetto a quello che aveva utilizzato.

Nello sviluppo di tale strumento, inserito in ambiente *Grasshopper* e chiamato *Marsupilami*, consiste il secondo momento della ricerca di Du Peloux che lo ha portato a elaborare un Dynamic Relaxation a quattro gradi di libertà (3 traslazioni e 1 rotazione) al fine di rendere più realistica, e quindi affidabile la ricerca di forma⁷⁶.

Il quarto gruppo di ricerca oggetto di analisi è il collettivo interdisciplinare *Construire l'Architecture* dell'ENSA Paris La Villette che, nel 2021, ha pubblicato uno dei lavori più interessanti ai fini della presente ricerca. A differenza degli ultimi due gruppi descritti, infatti, tale collettivo si è posto obiettivi molto simili a quelli qui perseguiti.

Fondato nel 2014 da Marc Leyral e Sylvain Ebode, *Construire l'Architecture* ha come scopo iniziale la messa a disposizione dei supporti digitali nei corsi di costruzione per gli studenti della scuola di architettura. Oggi, il collettivo è particolarmente interessato alla tematica della pedagogia delle scienze e delle tecniche per l'architettura e la costruzione. Il lavoro condotto da *Construire l'Architecture* è denominato *Elastica*⁷⁷ e ha lo scopo di costruire un *tool* computazionale di facile utilizzo per la progettazione di strutture di tipo gridshell derivanti da flessione attiva.

Il workflow elaborato da tale gruppo è suddiviso in quattro fasi:

⁷⁴ <https://www.oasys-software.com/products/gsa/> (OASYS)

⁷⁵ S. Adriaenssens, "Stressed spline structures," PhD thesis, University of Bath, 2000.

⁷⁶ Cfr Du Peloux, L. (2017). Modeling of bending-torsion couplings in active-bending structures. Application to the design of elastic gridshells. P.311

⁷⁷ Leyral, Marc & Ebode, Sylvain & Berthou, Clément. (2021). *Elastica* project: dynamic relaxation for post-formed elastic gridshells.

1. Costruzione del reticolo di Chebyshev su di una superficie col metodo delle sfere
2. DR a tre gradi di libertà della maglia disegnata sulla superficie
3. Analisi strutturale
4. Abaco degli elementi

Va precisato che tutte le fasi sopra citate, dalla genesi geometrica alla simulazione strutturale, sono state interamente gestite nell'ambiente di lavoro di *Rhino/grasshopper*⁷⁸; la sperimentazione del collettivo si è concretizzata nella realizzazione di un prototipo in scala 1:1 per validare il procedimento progettuale (Fig.21).



Fig. 16 Realizzazione della gridshell legata al progetto *Elastica*, 2020, Saint-Denis, M. Leyral, S. Ebode, M. Zitouni, G. Louison. Photo S. Mostefaoui DR

⁷⁸ <https://www.rhino3d.com/it/>

Da ultimo, va analizzato lo studio portato avanti da Antonio J. Bocanegra⁷⁹ (2022) che, tra i vari obiettivi mirati, si propone di offrire una modellazione numerica più aderente possibile alla realtà, in quanto intende valutare, nel processo progettuale, tutti le sollecitazioni - interne ed esterne - che possono agire sulla struttura in fase di formatura, come ad esempi, le tensioni residue che si generano nella fase di messa in forma della maglia piana. Il lavoro di ricerca di A. Bocanegra viene poi testato con la realizzazione di una gridshell in scala 1:1. (Fig.22).



Fig. 17 Triaxial Grdshell, Madrid, 2021, A. Bocanegra

Bocanegra muove dal presupposto che modellare il processo di formatura richieda la risoluzione di equazioni non lineari, la cui necessità deriva dai grandi spostamenti e dalle rotazioni che avvengono durante la fase di deformazione. Al fine di risolvere questo problema, Bocanegra sviluppa un pacchetto integrato di algoritmi per rendere assai più agile il processo di progettazione, volto ad automatizzare le seguenti elaborazioni:

⁷⁹ Cfr. Lara-Bocanegra, Antonio José. (2022). Elastic timber gridshells. From material to construction.

1. determinazione del reticolo applicando il metodo del compasso
2. analisi geometrica della griglia per ottenere le sollecitazioni di flessione iniziali nelle bacchette, consistente nel determinare la curvatura normale e geodetica lungo le curve utilizzando i triedri di Frenet⁸⁰ e il vettore di Darboux⁸¹. Da queste curvature si ottengono i momenti di curvatura nei piani di curvatura principale di ciascuna asta, e da queste le massime sollecitazioni flettenti
3. generazione automatica del modello in un programma commerciale di analisi strutturale
4. elaborazione di un modello geometrico tridimensionale da cui sviluppare tutti i dettagli necessari per la costruzione.

Quindi, il modello numerico impiegato per le analisi strutturali è stato realizzato in due passaggi: nel primo, i momenti di curvatura nei due piani di flessione sono stati calcolati dagli algoritmi sopra menzionati; nel secondo è stata effettuata l'analisi della struttura considerando la geometria costruita, la quale è derivata anche dagli algoritmi che appunto sono stati sviluppati. I momenti di curvatura (ottenuti nel primo passaggio) sono stati introdotti come carichi di precompressione. Il modello utilizzato è stato progettato con il programma *Robot Structural Analysis di Autodesk*⁸². Segue tabella riassuntiva.

⁸⁰ Nella geometria differenziale triedro formato dal vettore tangente (T), vettore normale (N) e vettore binormale (B), atto a descrivere le caratteristiche di un punto P, nel parametro (t) di una data curva

⁸¹ Nella geometria differenziale vettore che esprime la velocità angolare di un punto che si sposta su di una curva, derivato dal triedro di Frenet

⁸² <https://www.autodesk.com/products/robot-structural-analysis/overview?term=1YEAR&tab=subscription>

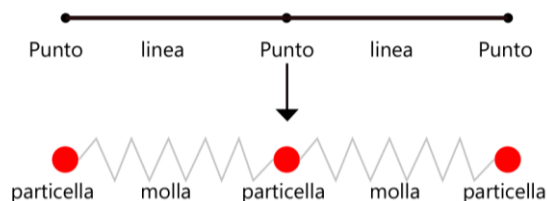
	D'amico 2015	Du Peloux 2017	Elastica 2019	Bocanegra 2021	Gridshell.it 2012-17
superficie di input	generica superficie	generica superficie ottimizzata secondo le	generica superficie	generica superficie	generica superficie curvature
Maglia su superficie	Dynamic relaxation per attrarre la griglia alla superficie	Metodo del compasso ottimizzato secondo le curvature del materiale	Metodo del compasso	Metodo del compasso ottimizzato secondo le curvature del materiale	Metodo del compasso con ottimizzazione morphogenetica, in ambiente grasshopper (GridMaker)
Simulazione fisica	Dynamic relaxation applicato alla griglia deformata sulla super- ficie, eliminando il sup- porto della stessa	Dynamic relaxation con 4 gradi di libertà	Dynamic relaxation con 3 gradi di libertà in ambiente Rhino\Grass- hopper	Dynamic relaxation con 6 gradi di libertà in ambiente Autodesk Robot	Algoritmo particle sping implementato in Kangaroo\grass- hopper (GFFT)
verifica della defor- mazione					Algoritmo morpho- genetico implementa- to in Python e grass- hopper, per il con- fronto della griglia geometrica e quella ottenuta dal rilassa- mento (Informer)

Tabella 1 metodi a confronto

Parte 2

3. Sviluppo del tool

L'obiettivo di questa ricerca è quello di proporre un *workflow* appositamente costruito e implementato in un tool computazionale, per la progettazione delle gridshell derivanti da flessione attiva. Questa esigenza nasce dalla volontà di portare questa complessa costruzione, a un livello di maggiore diffusione nel campo non solo delle grandi opere, ma anche delle piccole realizzazioni, che non hanno la possibilità di muovere ingenti capitali. Il nostro tool parte dalla volontà di simulare virtualmente il comportamento della struttura in fase di deformazione, in modo da poterne comprendere le difficoltà da affrontare nella fase di messa in forma. Per questa ragione il nostro primo strumento è stato un simulatore di processo, noto come GFFT (Gridshell form-finding tool)⁸³. Grazie a GFFT si è in grado di simulare il comportamento di una maglia piana sottoposta a deformazione e visualizzarne la configurazione finale. Le informazioni che traiamo da questa simulazione sono varie, queste sono sia di carattere geometrico dimensionale che geometrico/statico, tutte interdipendenti tra loro. Lo strumento è sviluppato con l'utilizzo di *Grasshopper*⁸⁴, questo, nella sua configurazione base, è indicato unicamente per scrivere algoritmi basati su operazioni matematico/geometriche, quindi nel tempo l'ambiente di lavoro di *Grasshopper* è stato arricchito dalla comunità degli utenti con numerosi add-on che gli consentono di oltrepassare i limiti della semplice modellazione geometrica, infatti per simulare il comportamento fisico della flessione dell'asta si è dovuto utilizzare l'add-on, *Kangaroo*⁸⁵, quest'ultimo è quello



⁸³ Algoritmo per la progettazione delle gridshell derivanti da flessione attiva, sviluppato in grasshopper presentato in: Pone S., Colabella S., D'Amico B., Fiore A. Lancia D., Parenti B., *Timber Post-formed Gridshell: Digital Form-finding / drawing and building tool*, Proceedings of IASS Annual Symposia, IASS 2013 Wroclaw: 'Beyond the Limits of Man' – Timber Spatial Structures, pp. 1-8(8)

⁸⁴ Piattaforma di programmazione visuale a blocchi (VPL) creata nel 2008 da David Rutten, con il nome *Explicit History*, è stata diffusa gratuitamente, consentendo a milioni di utenti di avvicinarsi alla progettazione computazionale e alle sue potenzialità. Questa diffusione gratuita ha consentito lo sviluppo di una grande community che ha supportato il miglioramento del *software* stesso e soprattutto lo sviluppo di *add-on* che hanno ampliato le potenzialità dello strumento che nasce come gestore parametrico delle geometrie di *Rhinoceros*.

⁸⁵ Piker D., *Kangaroo: Form Finding Computational Physics*, in *Architectural Design*, 2013

che viene definito un *particle-spring system*, ossia un sistema di componenti in grado di far corrispondere a un modello di linee e punti un modello composto da molle e masse, associando una rigidità assiale alle linee e una massa fittizia ai punti; riuscendo così, attraverso la legge di Newton, $F = m \cdot a$, a simulare la flessione di una maglia piana.

L'algoritmo di GFFT è il seguente:

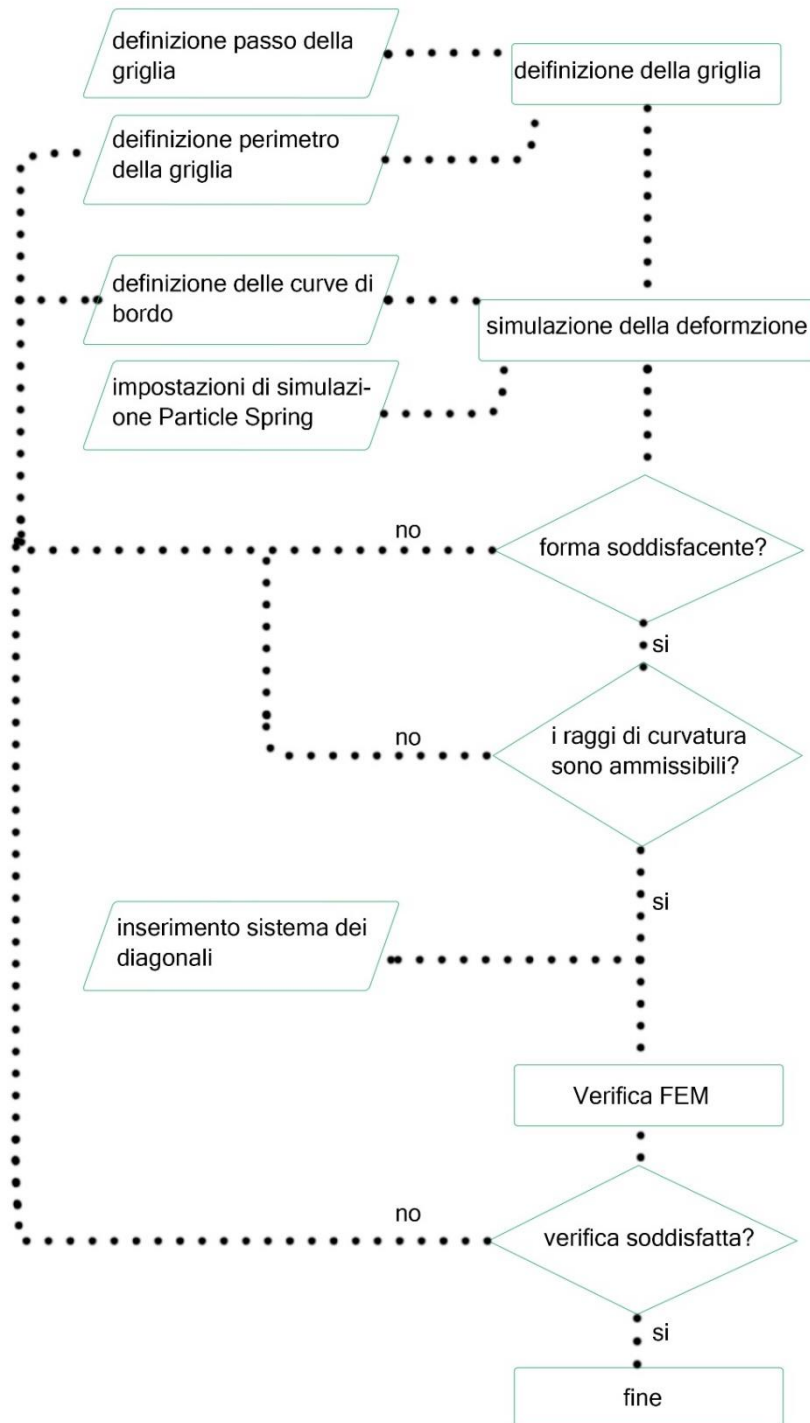


Fig. 18 Diagramma di flusso di GFFT

Varie sono state le sperimentazioni di questo tool, tra queste segnaliamo la gridshell Toledo (2012), Gridshell Selinunte (2012), Gridshell Alida (2013), Gridshell RFI (2013), Gridshell Toledo II (2015). Analizzando queste sperimentazioni ci si rende conto che hanno dei tratti architettonici in comune, questo è dovuto alla modalità di inserimento della griglia di input; inizialmente ci si è dati delle regole molto rigide per la generazione della maglia, in quanto si è cercato di riprodurre digitalmente lo stesso percorso utilizzato per costruire il modello in scala, che ricordiamo essere realizzato partendo da una maglia quadrata composta da bacchette di taglio 1mm*2mm intrecciate, quindi l'obiettivo era quello di ricreare questa griglia digitale da deformare. Ma non avendo una precisa informazione sulla corrispondenza geometrica tra maglia piana e forma architettonica desiderata, ci si è trovati spesso a ripetere schemi di taglio molto simili, producendo padiglioni con simili caratteristiche, soprattutto legate alla volontà di realizzare in maniera più semplice i bordi della maglia, che per questa ragione erano sempre tagliati o lungo la direzione delle aste o 45° rispetto la loro giacitura (Fig. 24).

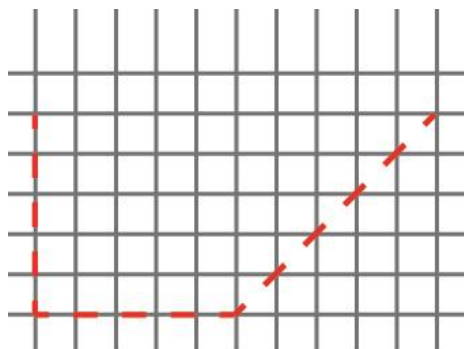


Fig. 19 La linea rossa tratteggiata indica le direzioni seguite per tracciare il perimetro della griglia

Dopo queste sperimentazioni nel 2015, nasce l'esigenza di trovare un nuovo modo per generare la maglia piana di input al processo di simulazione, per questo motivo viene sviluppato GridMaker⁸⁶, un tool basato sull'ottimizzazione genetica multiobiettivo (MOGA)⁸⁷.

⁸⁶ S. Pone, G. Mirra, E. Pignatelli, D. Lancia, S. Colabella, *Specialised algorithms for different project stages in a postformed timber gridshell design*, in Structures and Architecture, CRC press, 2016

⁸⁷ Murata T., Ishibuchi H.. (1995). *MOGA: multi-objective genetic algorithms*. Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Evolutionary Computation. DOI:10.1109/ICEC.1995.489161. Il procedimento multiobiettivo per l'ottimizzazione è in grado di controllare più soluzioni contemporaneamente, in modo da rendere gli obiettivi dell'analisi plurimi e indipendenti tra di loro.

Questo algoritmo basato sul metodo di Chebyshev⁸⁸ è in grado di restituire una maglia piana da utilizzare come input per GFFT. Questa maglia è il risultato di un'ottimizzazione che cerca la migliore distribuzione geometrica di una griglia equidistante su di una superficie generica. Questa operazione per risultare più efficace possibile è costruita con un algoritmo generativo che utilizza un principio evoluzionistico. Questo algoritmo è costruito al fine di rispettare due condizioni specifiche; ricoprire tutta l'area della superficie e mantenere gli angoli tra i quadrilateri della griglia il più ortogonale possibile. Il risultato generato dall'algoritmo è una famiglia di soluzioni che si dispone sul quello che viene chiamato "*fronte di Pareto*"⁸⁹, tra le soluzioni presenti in questo diagramma l'utente seleziona la soluzione che ritiene meglio

⁸⁸ Reticolo di Chebyshev, dal nome del matematico che, nel 1878, avendo uno stipendio piuttosto modesto, accettò un contratto per ottimizzare il taglio delle uniformi militari. Il corpo umano è infatti una forma complessa che è complicata da coprire con un tessuto piatto senza pieghe. Fino alla fine del XIX secolo, i vestiti erano realizzati con gli occhi e quindi non montati. La sartoria personalizzata era un'arte costosa e dispendiosa in termini di tempo descritto in "Sur la coupe des vêtements" nel 1878

⁸⁹ Il fronte di Pareto è un insieme di soluzioni ottime, ovvero è costituito da tutti i punti non dominati, cioè da quei punti per i quali non esiste alcun punto che sia migliore contemporaneamente per tutti gli obiettivi considerati nella funzione di ottimizzazione. Wikipedia

rispondente alle specifiche richieste. Scelta la soluzione otteniamo la maglia piana da utilizzare come inizio della simulazione del processo.

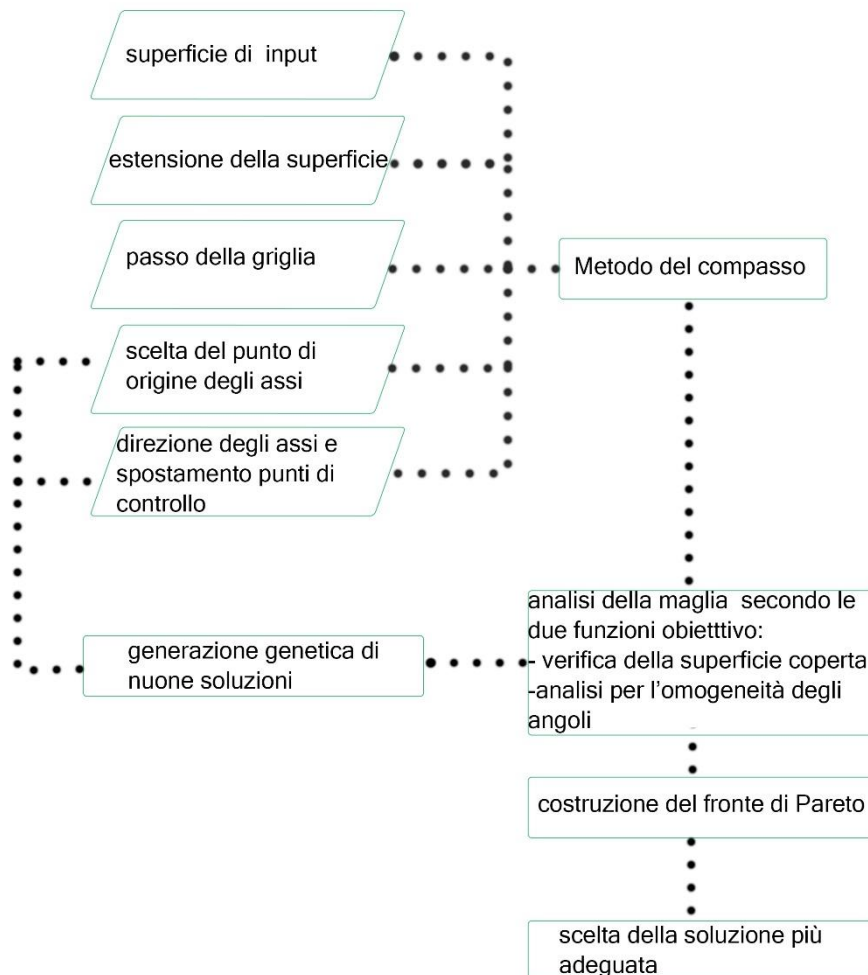


Fig. 20 Diagramma di flusso di Gridmaker

Quindi ottenuta la maglia e fatta la simulazione si verifica l'aderenza con l'idea iniziale, se questa soddisfa le esigenze progettuali si procede con la verifica strutturale attraverso l'utilizzo di Karamba3d®, altrimenti, in caso di eccessivo distacco tra superficie obiettivo e deformazione ottenuta, interviene un ulteriore tool conosciuto come *Informer*⁹⁰, questo strumento è in grado di trovare il minor numero di forze da applicare alla struttura deformata affinché questa si avvicini il più possibile alla superficie obiettivo. Ciò avviene confrontando il reticolo di Chebyshev sulla superficie e la maglia deformata con GFFT, dal confronto delle coordinate dei punti delle maglie si ipotizzano il posizionamento di puntoni e tiranti che deformano la superficie al fine di ottenere una quasi identità tra le maglie. Il processo di calcolo è di matrice genetico-evolutivo, e termina quando trova la migliore soluzione con il minor impiego di forze, preferendo i tiranti ai puntoni (Fig. 26-27). Questa procedura così descritta rappresenta lo stato dell'arte della ricerca qui presentata, quello che si propone in questo lavoro di tesi è dimostrare come un toolkit che si presenta all'utente con un'interfaccia più semplice, possa aiutarlo nella progettazione di tale sistema costruttivo. Questo workflow proposto unisce ai passaggi già sviluppati nuove analisi con l'intenzione di surrogare l'esperienza del progettista esperto, in modo da supportare in una fase preliminare

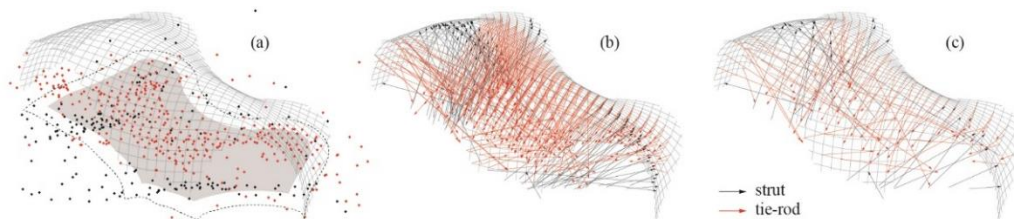


Fig. 21 a) proiezione dei punti secondo la normale alla superficie, b) creazione dei puntoni e tiranti, c) riduzione degli stessi

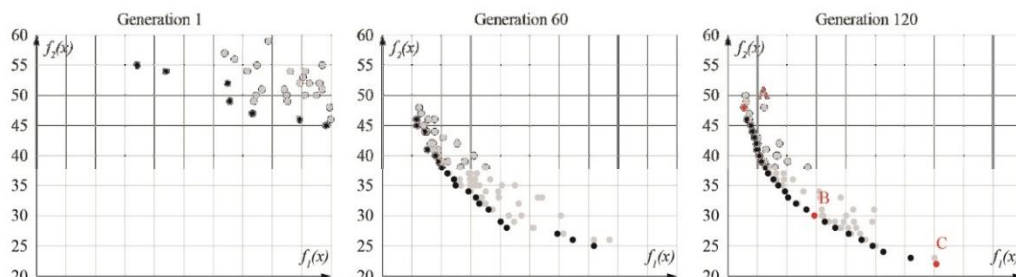


Fig. 22 fronte di pareto alla 1° generazione, alla 20° e alla 120°

⁹⁰ E. Pignatelli, G. Mirra, S. Pone, *InFormer: designing forming actions in post-formed gridshells by means of MOGAs*, in IASS 2017

i progettisti non competenti in materia. Per questo motivo seguiranno alcuni chiarimenti nei temi specifici della progettazione delle gridshell derivanti da flessione attiva, come la geometria del guscio, curvatura geometrica, metodi matematici di simulazione fisica

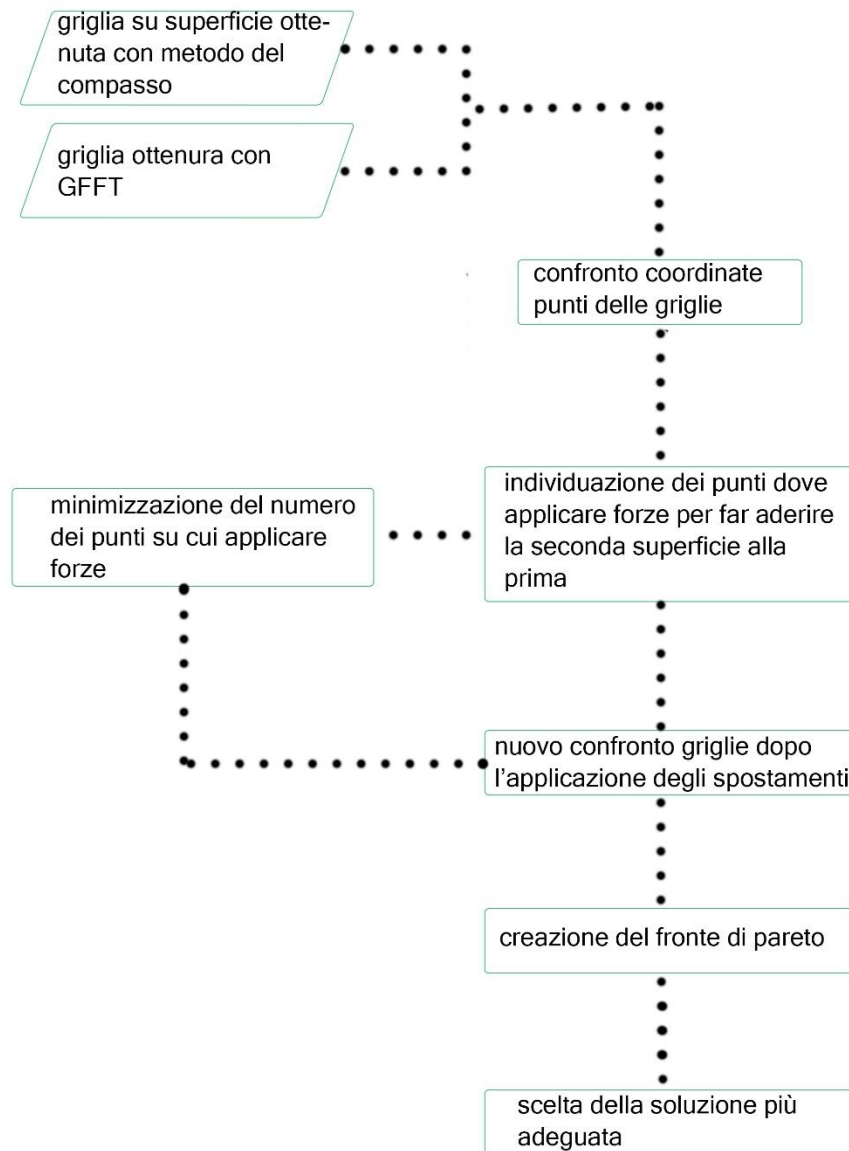


Fig. 23 Diagramma di flusso di informer

3.1. La geometria delle gridshell derivanti da flessione attiva

L'enciclopedia Treccani definisce la geometria come parte della matematica che studia le figure, lo spazio in cui sono inserite e le loro proprietà, relazioni e trasformazioni, quindi intuitivamente pensiamo di poter descrivere e rappresentare, quindi controllare, qualsiasi forma esistente. Ciò non è sempre vero e le strutture a flessione attiva, e le gridshell nel caso specifico, rientrano in questo caso, in quanto la forma di queste ultime, dipende da un'azione

fisica su di un elemento, e quindi non si può prescindere dal dover simulare il comportamento fisico di queste.

Quindi gli strumenti della geometria euclidea e differenziale sono estranei a questo processo? No, assolutamente, ma rientrano in alcuni passaggi fondamentali per la comprensione del fenomeno e lo sviluppo degli strumenti necessari alla progettazione.

Quando si usa il termine Gridshell, si indica un sistema strutturale che è composto da una griglia e un guscio. In verità si tratta di una discretizzazione di un guscio continuo attraverso la realizzazione di una maglia che presenta “più vuoti che pieni”⁹¹. Questo svuotamento modifica il guscio e lo rende più leggero, ma soprattutto, lo trasforma in un sistema di aste incernierate che consente la rotazione tra gli elementi, questa deformazione tangenziale al piano garantisce una deformabilità della superficie piana che non potrebbe dipendere dalla sola flessione ortogonale al piano, rendendo così indispensabile la scomposizione in “trama e ordito” della superficie continua. È da notare che questo tipo di spostamenti interni alla griglia piana non sono descrivibili geometricamente, è necessario un modello fisico che li simuli. Sono queste deformazioni interne che rendono la maglia piana deformabile in una superficie a doppia curvatura, raggiungendo così la forma resistente.

La ricerca della forma resistente, “forma ideale” (S. Musmeci)⁹² nasce dalla ricerca di un ottimo strutturale, cioè la volontà di utilizzare il materiale da costruzione al meglio delle sue prestazioni. Questa indagine inizia con la progettazione degli archi e volte in muratura, una tecnica costruttiva basata sulla sovrapposizione di elementi lapidei, che presenta le migliori prestazioni quando gli elementi costitutivi sono sollecitati a pura compressione. Ma come stabilire il percorso delle azioni? Il percorso delle forze all’interno degli elementi strutturali non è visibile ad occhio nudo. La visualizzazione mentale degli sforzi e delle sollecitazioni, è l’abilità da allenare che raccomanda Pierluigi Nervi al fine di comprendere al meglio l’arte del costruire, svincolandosi dalla mera applicazione delle formule di verifica strutturale, in modo di avere una più ampia libertà progettuale. Bill Addis in merito alla progettazione geometrica di una struttura a guscio pone due fondamentali domande:

- Come si può definire, descrivere o comunicare una forma geometrica tridimensionale da una persona all'altra? O, in altre parole, come può una forma tridimensionale essere generata nella mente del suo creatore?

⁹¹

⁹²

- Quali sono le forme tridimensionali più adatte a una struttura a guscio, affinché il progettista abbia la certezza che la struttura funzionerà come previsto?⁹³

A queste semplici ma non banali domande si è iniziato a dare una risposta con validità scientifica nel XVI quando il fisico/ingegnere Simon Stevin inizia i suoi studi sulla statica delle forze, a lui si deve il teorema del triangolo delle forze, quindi la visualizzazione grafica di un “vettore” con conseguente scomposizione in due componenti. La stagione della codifica dei fenomeni naturali attraverso le scienze era appena iniziata⁹⁴ infatti da questi studi continueranno numerosi studi tra i quali quelli di Robert Hooke che nel 1676 all’interno del volume *“A description of helioscopes and some other instruments”*, per riempire una pagina vacante pubblica 10 scoperte sotto forma di anagramma in latino, *“2. The true Mathematical and Mechanichal form of all manner of Arches for Building, with the true buttment necessary to each of them. A Problem which no Architectonick Writer hath ever yet attempted, much less performed. abccc ddeeee fgg iiiiiii lmmmmnnnnnoopr ssstttttuuuuuuux.”* solo dopo la sua morte il Waller⁹⁵ riuscirà a decifrarlo ottenendo *“Ut pendet continuum flexile, sic stabit contiguum rigidum inversum”*, come pende la linea flessibile, così ma invertita starà l’arco rigido. Quindi possiamo confermare che intorno al 1670 R. Hooke aveva definito l’arco funicolare, a prova di ciò troviamo la collaborazione del fisico col progettista Christofer Wren per la progettazione della cupola di St. Paul’s Cathedral (fig.29), la quale fu realizzata tentando di seguire la forma funicolare, ma non essendo stati in grado di calcolarla, si utilizzò l’equazione cubica $y=x^3$ come approssimazione⁹⁶. Gli studi finalizzati alla ricerca della corretta geometria continueranno, soprattutto con l’ausilio di modelli fisici, in quanto la schematizzazione del problema in calcoli matematici si rivela estremamente complessa, così troveremo gli studi di Heinz Isler con i suoi modelli di tessuti funicolari imbevuti di gesso o resina, oppure i modelli di Frei Otto per lo studio delle superfici minime grazie alle bolle di sapone o membrane tese. Questi modelli vengono utilizzati per simulare quelle caratteristiche meccaniche e fisiche scalabili linearmente, e che quindi non risentono di quella legge che enunciata da Galileo Galilei nel 1638 è conosciuta come “la legge del cubo

⁹³ B. Addis, *Physical modelling and form finding*, in Aa.Vv. *Shell Structures for Architecture*, Routledge, London (UK) 2014

⁹⁴ J. Leo van Hemmen, *Neuroscience from a mathematical perspective: key concepts, scales and scaling hypothesis, universality*, in “*Biological Cybernetics*” Vol 10 p.701-712, 2014

⁹⁵ Waller, *The posthumous works of Robert Hooke* (London, 1705). Second edition (photographic reprint with an introduction by T.M. Brown, London, Frank Cass and Co, 1971).

⁹⁶ <https://plus.maths.org/content/maths-minute-st-pauls-dome>

quadrato”. I comportamenti che si possono analizzare con modelli in scala, senza problemi di trasferimento al modello reale,

sono:

- L'equilibrio statico
- La forma funicolare
- Le superfici minime
- La flessione della linea elastica

Per questo motivo trovano grande diffusione in quanto sono di grande aiuto nello sviluppo di questa metodologia progettuale.

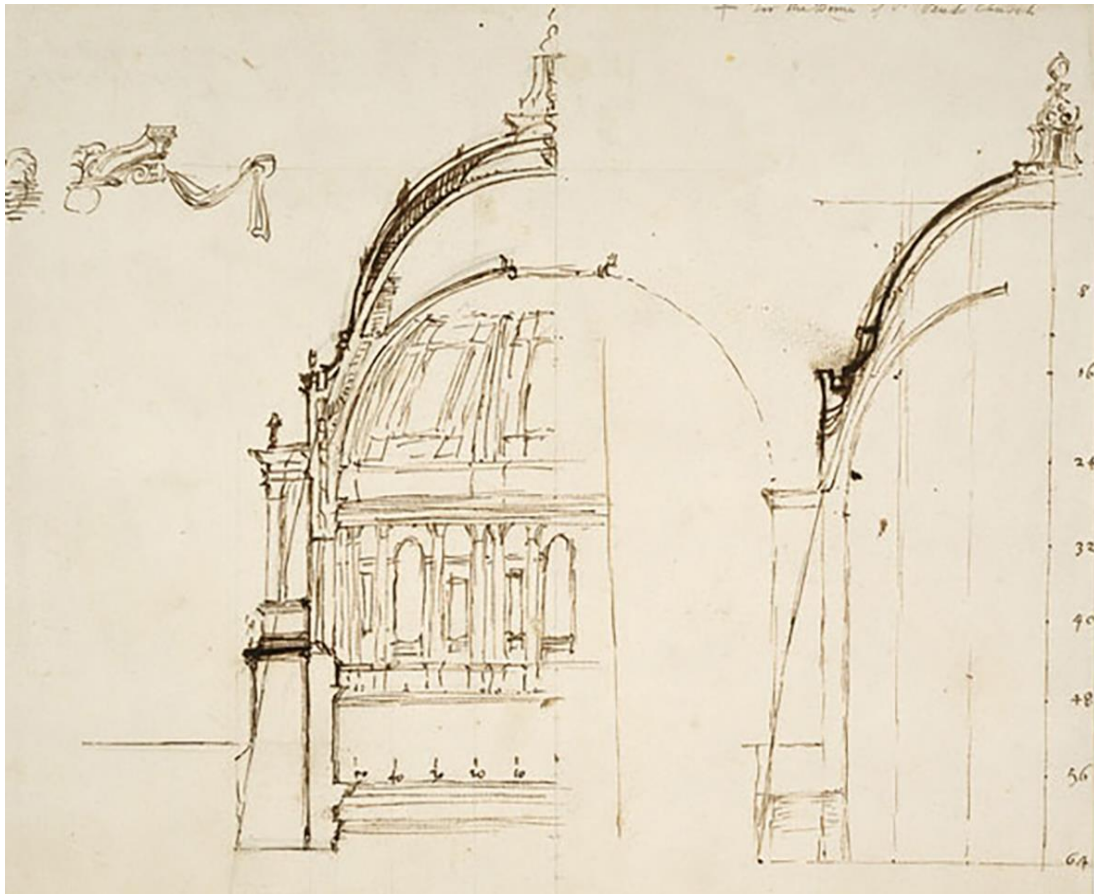


Fig. 24 sezione che approssima la forma funicolare della cupola di St. Paul's Cathedral

Queste ricerche saranno alimentate dagli studi nel campo della biologia sempre più approfonditi, che entrando nel micro della realtà, inizieranno a presentare agli studiosi di strutture, e quindi ad architetti ed ingegneri, l'ossatura che la natura crea, ottimizzando le

risorse a disposizione⁹⁷. Come afferma Pierluigi Nervi: «Calici di fiori, foglie lanceolate, canne, gusci di uova e di insetti, conchiglie, ventagli, paralumi, carrozzerie di automobili, vasi di vetro e perfino oggetti di vestiario, quali cappelli femminili, sono altrettanti esempi di resistenza per forma, ed è certamente molto importante che un nuovo mezzo costruttivo ci permetta, per la prima volta, di estendere queste strutture a grandi e grandissime dimensioni»⁹⁸.

Se la geometria globale del guscio è ricercabile con metodi di simulazione fisica, come possiamo invece studiare la geometria interna, quella del grigliato che discretizza il continuo?

Il tracciamento di curve su di una superficie è un tema complesso e per affrontarlo dobbiamo fare riferimento ad alcuni principi di geometria differenziale. Occorre chiarire il concetto di superficie e di curva appartenente ad essa. Come riportato da Pottman⁹⁹ le superfici sono definibili da funzioni parametriche, e ciascun punto P di è individuato da una coppia di valori definiti u e v . Possiamo quindi rappresentare la superficie parametrica S come:

$$p(u,v) = (x(u,v), y(u,v), z(u,v))$$

Dove i parametri u e v assumono tutti i valori di una regione bidimensionale R . Ciascun punto $P(u,v)$ è caratterizzato da una terna di versori che indicano la normale, la tangente e la bi-normale alla superficie in P . La relazione tra questi triedri caratterizza la curvatura della superficie. Per determinare questa ultima, si interseca la superficie con due piani ortogonali passati per il vettore normale. La coppia di piani ortogonali che genera la curva con la massima e la minima curvatura, indicano le direzioni principali di curvatura k_1 e k_2 , il loro prodotto restituisce la curvatura Gaussiana ($G = k_1 \cdot k_2$), mentre la media aritmetica tra le due ci restituisce la curvatura media ($H = (k_1 + k_2)/2$). Dalla relazione tra k_1 e k_2 possiamo definire tre tipologie di superfici:

- sinclastiche se k_1 e k_2 hanno lo stesso segno
- anticlastiche se k_1 e k_2 hanno segni opposti

⁹⁷ Vedere nota, se non sbaglio Menges o Otto

⁹⁸ P. L. Nervi *Costruire* correttamente, Hoepli, Milano 1955, p. 116

⁹⁹

- .monoclastiche se una delle due ha valore nullo

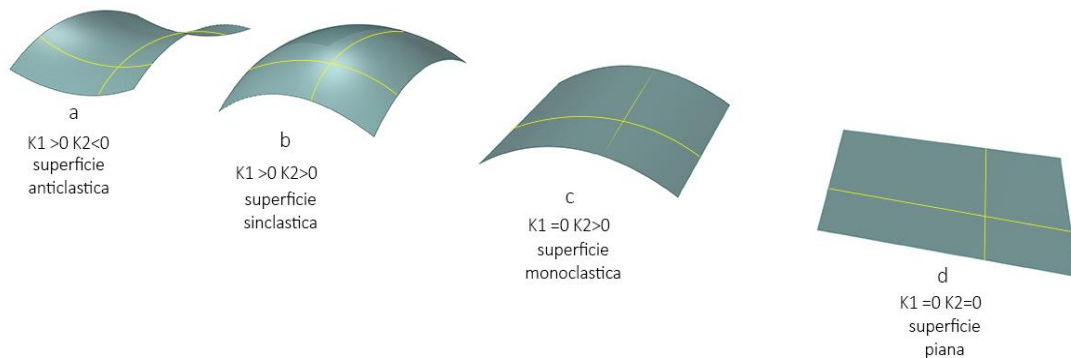


Fig. 25 superfici sezionate da piani ortogonali secondo le direzioni principali

Esiste un caso particolare di superficie anticlastica che prevede $k1$ e $k2$ con segni opposti ma stesso valore, questo caso ci porta ad avere una curvatura media nulla. Nel caso di una superficie con curvatura media nulla costante, questa si definisce *minima*. Per misurare la curvatura di una curva appartenente ad una superficie possiamo combinare la direzione della curva con l'orientamento della superficie per generare un sistema di coordinate noto come piani di Darboux. Questi piani sono il vettore normale Z , il vettore tangente X e il vettore binormale Y . Le curvature secondo i tre assi prendono il nome di Curvatura geodetica se intorno all'asse Z , torsione geodetica se intorno all'asse X , e curvatura normale se intorno all'asse Y . (Tang et al. 2016b). Sulle superfici è possibile rappresentare speciali tipi di curve che possono evitare una delle precedenti rotazioni descritte. Queste sono le curve geodetiche che bloccano la rotazione intorno all'asse Z , le curve principali che evitano la rotazione intorno all'asse X e le curve asintotiche che evitano la rotazione intorno all'asse Y (Schling and Barthel 2017)¹⁰⁰. La scelta di questi tre tipi di pattern può essere consigliata per diversi tipi di fabbricazione del guscio, perché gli elementi che formeranno la griglia saranno elementi monodimensionali rettilinei, quindi di facile produzione, ma al contempo richiederanno l'impiego di macchinari a controllo numerico per il loro taglio e foratura, in quanto ogni elemento sarà diverso, Le distanze dai fori saranno tutte diverse. L'unico modo per ottenere una maglia equidistante quadrangolare è il già citato metodo di Chebyshev.

Al matematico russo Chebyshev fu proposto il problema sartoriale di dover ottimizzare il taglio del tessuto per la produzione di abiti¹⁰¹. Egli si appassionò alla questione ed elaborò

¹⁰⁰ E. Schling, D. Hitrec, R. Barthel, *Designing Grid Structures Using Asymptotic Curve Networks*, Proceedings of "Humanizing Digital Reality. Design Modelling Symposium", Paris (Fr) 2018

¹⁰¹

quella che oggi è conosciuta come *Chebyshev net*, definita matematicamente “Sia S una superficie (infinitamente differenziabile) immersa (o sommersa) nello spazio euclideo R^3 . Un aperto connesso U di S è ibridabile se esiste un dominio Ω del piano euclideo R^2 (di coordinate (u,v)) e una parametrizzazione $F:\Omega \rightarrow F(\Omega)=U \subset S$ le cui restrizioni alle linee orizzontali e verticali sono curve parametriche di lunghezza d'arco. In altre parole, F è un tessuto se i vettori $\partial F/\partial u$ e $\partial F/\partial v$ hanno norma unitaria.”¹⁰² Nella pratica quello che viene attuato per ricreare il reticolo di Chebyshev è il metodo del compasso¹⁰³ descritto da Klaus Linkwitz per il disegno della maglia della Gridshell di Mannheim. Si tratta di tracciare due generici assi su di una superficie, dal punto di incrocio di questi tracciare una sfera con il raggio (r) di valore uguale al passo che vogliamo abbia la nostra maglia; dalle 4 intersezioni costruire altre 4 sfere e nei punti in cui si intersecano tra di loro con la superficie, generare nuovi punti, e così via fino a ricoprire tutta la superficie. Questo metodo ricorsivo è facilmente attuabile con l’ausilio della progettazione computazionale (Fig. 31 e 32).

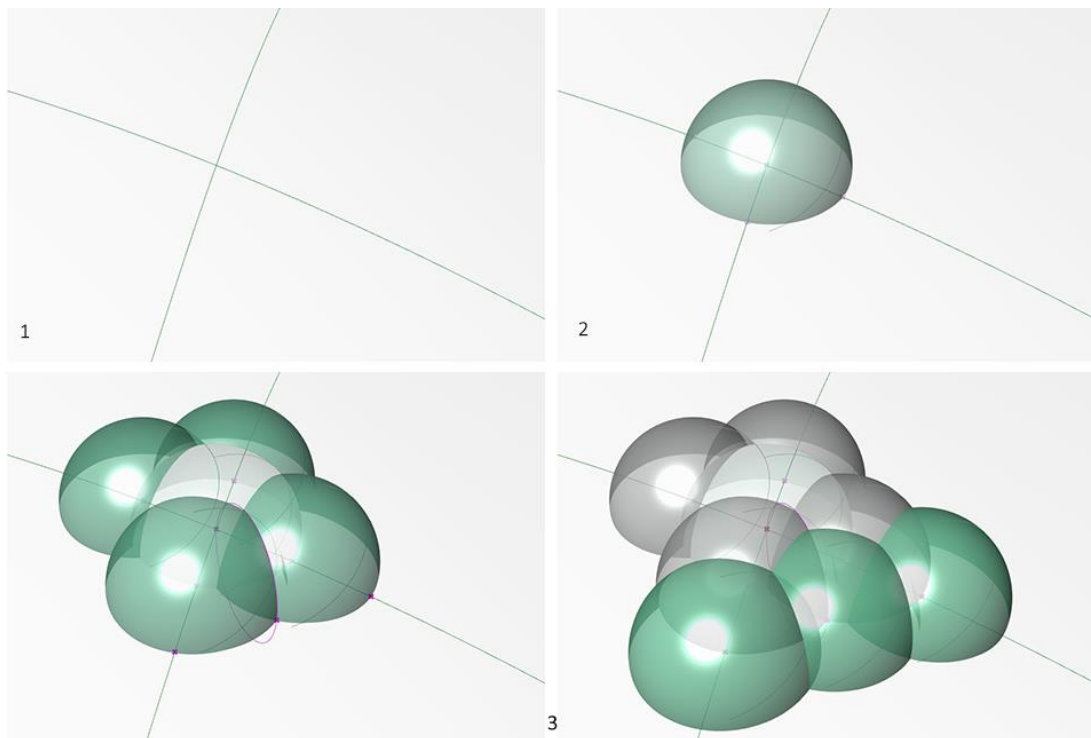


Fig. 26 Il metodo del compasso: 1) assi guida sulla superficie; 2) prima sfera con centro nell'intersezione degli assi; 3) costruzione delle successive sfere nei punti di intersezione tra le sfere e la superficie

¹⁰² E. Ghys, *Sur la coupe des vêtements à variation autour d'un thème de Tchebychev*, « MathSciNet » n.1, 2, 2011

¹⁰³ IL n. 10

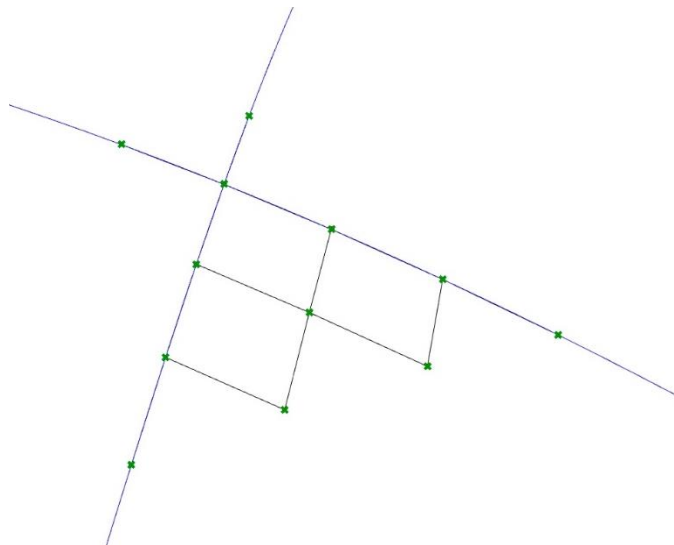


Fig. 27 Maglia quadrangolare a lati uguali disegnata sulla superficie con il metodo del compasso

Questo metodo resta comunque insufficiente per la progettazione delle gridshell derivanti da flessione attiva in quanto la discretizzazione della superficie è un disegno geometrico, che non rispecchia in alcun modo la resistenza a flessione del materiale che verrà impiegato nella costruzione. Quindi è per questo motivo che bisogna rivolgersi a metodi analitici per simulare la flessione delle aste, una riproduzione virtuale di quello che sarà il vero processo.

La facilità con cui i computer possono generare forme tridimensionali può tuttavia indurre gli architetti a dimenticare ciò che molti di loro sapevano negli anni '60 e '70: che le forme strutturali ottimali esistono, e che non sono parti di una sfera, di un ellissoide o (come sembra attualmente prevalente) di un toroide¹⁰⁴.

3.2. Metodi analitici per la simulazione dei corpi rigidi

Come riportato da Diederik Veenendaal and Philippe Block i metodi di *form-finding* analitici possono essere divisi in tre gruppi:

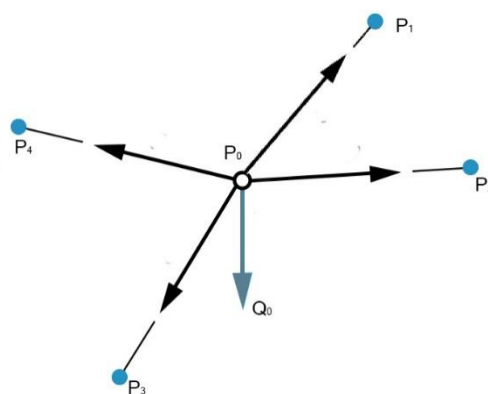
- I metodi a matrice di rigidezza; questi metodi sono tra i più vecchi e sono adattati dall'analisi strutturale, ad esempio dall'analisi agli elementi finiti.

¹⁰⁴ B. Addis, *Physical modelling and, form finding* in in Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization, Routledge, New York 2014, p. 42

- I metodi di rigidezza geometrica, questi sono indipendenti dal materiale. Nati con il Force density Method, i successivi sviluppi sono estensioni o generalizzazioni del FDM come ad esempio, la Thrust Network Analysis (TNA).
- I metodi di equilibrio dinamico, questi risolvono il problema dell'equilibrio dinamico per arrivare a una soluzione statica, come ad esempio, il *Dynamic Relaxation* (DR) e il *Particle-Spring*.¹⁰⁵

Quindi esclusi metodi a matrice di rigidezza in quanto non adatti al calcolo di deformate per gradi spostamenti analizziamo i metodi a rigidezza geometrica, il Force density method, e quelli a equilibrio dinamico, il Dynamic Relaxation e il Particle Spring.

Il Force Density Method, è un procedimento che compare nel campo dell'architettura intorno agli anni '70 elaborato da Klaus Linkwitz¹⁰⁶, grazie al quale riesce a progettare varie strutture, in particolare le coperture tese e le gridshell¹⁰⁷. Il sistema come già detto nel paragrafo 1.X è stato utilizzato per modellare analiticamente la gridshell di Mannheim. Il FDM risolve il problema dell'equilibrio attraverso equazioni lineari e soprattutto non tiene conto delle caratteristiche del materiale. Per semplificare potremmo dire che una rete "geometrica", che è composta da punti e linee rappresenta una topologia tridimensionale che deve trovare l'equilibrio tra le forze interne ed esterne, per far ciò si pone l'uguaglianza tra la massa di ciascun punto e la somma delle quattro forze che scorrono nelle quattro aste che collegano il singolo punto con gli altri punti vicini. Per schematizzare il funzionamento del FDM immaginiamo di avere un punto P_0 (x, y, z), questo sarà collegato a quattro punti P_1, P_2, P_3, P_4 attraverso delle barre di lunghezza L_n ,



¹⁰⁵ D. Veenendaal, P. Block, *Comparison of form-finding methods*, in *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*, Routledge, New York 2014, p. 115

¹⁰⁶

¹⁰⁷ K. Linkwitz, *Force density method, Design of a timber shell*, in *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*, Routledge, New York 2014, p. 59

L'equilibrio tra la forza Q_0 al nodo P_0 e le tensioni T_n può essere determinato risolvendo le forze di tensione T_n nelle componenti x , y e z . Ciò si ottiene moltiplicando T_n per i coseni di direzione, definiti come i rapporti tra le coordinate spaziali in ciascuna direzione e le lunghezze effettive L_n .

$$T_{n,x} = T_n(x_i - x_0)/L_n$$

$$T_{n,y} = T_n(y_i - y_0)/L_n$$

$$T_{n,z} = T_n(z_i - z_0)/L_n$$

Ponendo l'eguaglianza tra le tensioni interne e la forza esterna abbiamo le formule:

$$\frac{T_1(x_1 - x_0)}{L_1} + \frac{T_2(x_2 - x_0)}{L_2} + \frac{T_3(x_3 - x_0)}{L_3} + \frac{T_4(x_4 - x_0)}{L_4} = Px_0$$

$$\frac{T_1(y_1 - y_0)}{L_1} + \frac{T_2(y_2 - y_0)}{L_2} + \frac{T_3(y_3 - y_0)}{L_3} + \frac{T_4(y_4 - y_0)}{L_4} = Py_0$$

$$\frac{T_1(z_1 - z_0)}{L_1} + \frac{T_2(z_2 - z_0)}{L_2} + \frac{T_3(z_3 - z_0)}{L_3} + \frac{T_4(z_4 - z_0)}{L_4} = Pz_0$$

Le equazioni sopra descritte sono non-lineari, il Force Density Method consente di trasformarle in equazioni lineari, dando al rapporto tra la tensione e la lunghezza dell'asta, appunto il valore di Densità della forza

$$F = \frac{\text{Tensione interna all'asta di collegamento}}{\text{Lunghezza dell'asta}}$$

Sostituendo i valori di F otterremo il seguente sistema di equazioni lineari, che ci consentono di verificare la posizione di P_0

$$F_1(x_1 - x_0) + F_2(x_2 - x_0) + F_3(x_3 - x_0) + F_4(x_4 - x_0) = Px_0$$

$$F_1(y_1 - y_0) + F_2(y_2 - y_0) + F_3(y_3 - y_0) + F_4(y_4 - y_0) = Py_0$$

$$F_1(z_1 - z_0) + F_2(z_2 - z_0) + F_3(z_3 - z_0) + F_4(z_4 - z_0) = Pz_0$$

Da queste equazioni possiamo ottenere le coordinate x , y e z del punto P_0

$$x_0 = \frac{Px + x_1 \cdot F_1 + x_2 \cdot F_2 + x_3 \cdot F_3 + x_4 \cdot F_4}{F_1 + F_2 + F_3 + F_4}$$

$$y_0 = \frac{Py + y_1 \cdot F_1 + y_2 \cdot F_2 + y_3 \cdot F_3 + y_4 \cdot F_4}{F_1 + F_2 + F_3 + F_4}$$

$$z_0 = \frac{Pz + z_1 \cdot F_1 + z_2 \cdot F_2 + z_3 \cdot F_3 + z_4 \cdot F_4}{F_1 + F_2 + F_3 + F_4}$$

Il Dynamic Relaxation è stato sviluppato da Alistair Day¹⁰⁸ nel 1965. Con questo procedimento si riesce a tracciare il movimento che la struttura compie durante la deformazione causata dall'applicazione di un carico che porta la struttura fuori equilibrio, il movimento oscillatorio della struttura viene smorzato artificialmente, fino a che l'energia delle singole masse non raggiunge la condizione di equilibrio. Questo modello come riportato da D'Amico¹⁰⁹, rappresenta un'alternativa al metodo considerato "dominante" per la risoluzione statica di strutture soggette a grandi spostamenti, ossia il *Transient Stiffness Method* (TSM), questo modello potenzia il metodo agli Elementi Finiti, che come sottolineato da Lewis¹¹⁰ "...evolve dalla teoria convenzionale legata ai piccoli spostamenti" in modo da mantenere una relazione lineare tra il vettore delle forze applicate nei nodi e i loro spostamenti corrispondenti. Ma a differenza della teoria dei piccoli spostamenti, il carico vettoriale viene applicato in modo incrementale, cosicché gli spostamenti linearizzati vengano "corretti" e la matrice di rigidezza "aggiornata" a ogni incremento, al fine di minimizzare l'errore residuo che si verifica come conseguenza della linearizzazione. Invece il Dynamic Relaxation rappresenta un metodo alternativo, in quanto considera un problema statico, un problema

$$Kx = f$$

(a)

$$Ma + Cv + Kx = f$$

(b)

"dinamico" e converte il sistema di equazioni non lineari (a) in un sistema di equazioni del moto (b).

In (a) K rappresenta la matrice di rigidezza, x i vettori spostamento dei nodi ed f i vettori delle forze nei nodi, in (b) M rappresenta la massa concentrata nei nodi e C lo smorzamento viscoso.

partendo da un sistema di calcolo per possiamo considerare il La tecnica analitica è sostanzialmente stessa che si usa nei metodi Leapfrog¹¹¹ e Verlet per integrare la seconda legge di Newton. Va ricordato che durante il processo di form-finding tutti i valori numerici di carico, di EA e di EI , possono essere arbitrati in quanto è solo il loro rapporto ad avere effetto sulla forma

¹⁰⁸ A.S. Day, *An introduction to dynamic relaxation*, Engineer, 1965

¹⁰⁹ B. D'Amico, *Timber Grid-shell Structures: form-finding, analysis and optimisation*, PhD Thesis, Edinburgh Napier University, 2015

¹¹⁰ W. J. Lewis, *Tension structures: form and behaviour*, Tomas Telford, 2003

¹¹¹ Metodo di integrazione della seconda legge di Newton

Come descritto da Barnes, “il metodo consiste nel tracciare passo dopo passo per piccoli incrementi di tempo, Δt , il moto di ogni nodo di una struttura (da un istante iniziale non a riposo) fino a quando, a causa di uno smorzamento artificiale, la struttura si ferma in equilibrio statico”¹¹²; la procedura per il calcolo del Dynamic Relaxation include i seguenti passaggi¹¹³:

La forza risultante per ogni nodo i è calcolata con la seconda legge di Newton in ciascuna direzione:

$$R_{ix}^t = M_i V_{ix}^t \quad (1.1)$$

$$R_{iy}^t = M_i V_{iy}^t$$

$$R_{iz}^t = M_i V_{iz}^t$$

Dove:

R_i^t = alla risultante delle forze nel nodo i-esimo

M_i = massa fittizia del nodo i-esimo

V_{ix}^t = accelerazione del nodo i-esimo

La massa M è definita:

$$M_i = \frac{\Delta t^2}{2} S_i \quad (1.2)$$

Dove S_i è la maggiore rigidezza al nodo i :

$$S_i = \sum_{m=1}^k \left(\frac{EA^s}{L_0} + G \frac{T^s}{L^s} \right) \quad (1.3)$$

L’accelerazione al tempo t può essere approssimata come:

$$V_{ix}^t = (V_{ix}^t(t + \Delta t/2) - V_{ix}^t(t - \Delta t/2))/\Delta t \quad (1.4)$$

¹¹² M. R. Barnes, *Form finding and analysis of tension structures by dynamic relaxation*. International Journal of Space Structures 14, 2, 1999, 89-104

¹¹³ M. R. Barnes, D. Wakefield, *Dynamic relaxation applied to interactive form finding and analysis of air-supported structures*, Proceedings of Conference on the Design of Air-supported Structures. I.Struct.E., Bristol (Uk) 1984

Dove:

V_{ix}^t = accelerazione del nodo i-esimo

$V_{ix}^{t+\Delta t/2}$ = velocità del nodo i-esimo

Sostituendo la (1.1) nella (1.4) la velocità al $(t + \Delta t/2)$ può essere trovata:

$$V_{ix}^{t+\Delta t/2} = V_{ix}^{t-\Delta t/2} + \frac{\Delta t}{M} * R_{ix}^t \quad (1.5)$$

La geometria può essere aggiornata al tempo $(t + \Delta t)$:

$$\begin{aligned} x_i^{t+\Delta t} &= x_i^t + \Delta t * V_{ix}^{t+\Delta t/2} \\ y_i^{t+\Delta t} &= y_i^t + \Delta t * V_{iy}^{t+\Delta t/2} \\ z_i^{t+\Delta t} &= z_i^t + \Delta t * V_{iz}^{t+\Delta t/2} \end{aligned} \quad (1.6)$$

Dopo aver aggiornato la posizione dei punti è possibile determinare al tempo $(t + \Delta t/2)$ il valore dell'energia cinetica (KE). Nel caso in cui l'energia cinetica fosse maggiore della precedente, si ripeterebbe il ciclo di calcolo, aggiornando la posizione in base alla velocità, e quindi trovando la nuova energia cinetica risultante, questo tramite:

$$\begin{aligned} R_{ix}^{t+\Delta t} &= P_{ix}^{t+\Delta t} + \sum \left(\frac{T}{l} \right)_m^{t+\Delta t} * (x_j - x_i)^{t+\Delta t} \\ R_{iy}^{t+\Delta t} &= P_{iy}^{t+\Delta t} + \sum \left(\frac{T}{l} \right)_m^{t+\Delta t} * (y_j - y_i)^{t+\Delta t} \\ R_{iz}^{t+\Delta t} &= P_{iz}^{t+\Delta t} + \sum \left(\frac{T}{l} \right)_m^{t+\Delta t} * (z_j - z_i)^{t+\Delta t} \end{aligned} \quad (1.7)$$

Dove

$P_{ix}^{t+\Delta t}$ = aggiornamento della forza di collegamento agente sul nodo i

T_m = tensione nell'asta di collegamento m che collega i nodi i e j

l_m = lunghezza dell'asta di collegamento m

$\sum \left(\frac{T}{l} \right)_m^{t+\Delta t}$ = sommatoria di tutti i collegamenti m che collegano i punti i

Invece se l'energia cinetica è minore della precedente vuol dire che c'è stato un picco di velocità precedente, e la simulazione riprenderà dalla (1.1) impostando le velocità pari a zero.

Per far sì che la simulazione termini è necessario introdurre uno smorzamento fittizio, in modo da portare le oscillazioni dei nodi della maglia in una posizione di equilibrio, che equivale ad avere l'energia cinetica del sistema pari a zero. Ciò viene normalmente descritto come la convergenza del sistema verso lo stato di equilibrio. La velocità di convergenza dipende dal valore della massa nodale fittizia, dal coefficiente di smorzamento e dall'intervallo temporale scelto per l'integrazione numerica. Se il passo temporale è troppo grande e lo smorzamento insufficiente, l'integrazione numerica supererà il movimento nodale e causerà instabilità geometrica. Nel metodo di rilassamento dinamico è possibile includere due tipi di smorzamento: lo smorzamento viscoso e lo smorzamento cinetico. Lo smorzamento viscoso è modellato matematicamente in modo tale da essere proporzionale alla velocità nodale e da agire nella direzione opposta a quella della velocità, rallentando così il movimento.

Nell'equazione (1.7) il termine $\sum_m \left(\frac{T}{l}\right)^{t+\Delta t}$ può essere visto come la rigidezza assiale S_i , questa può essere modificata e settata in maniera più appropriata per le differenti strutture. Per le strutture a flessione attiva si ritiene doveroso accordare il valore S_i tenendo presente la rigidezza flessionale dei collegamenti tra i punti, questo assume il valore di:

$$S_i = \sum \frac{2EI}{l^3} \quad (1.8)$$

Per riuscire a considerare l'effetto dei momenti flettenti e delle forze di taglio, causati dalla flessione dei listelli di legno rispetto il loro stato inizialmente diritto. Ci si rifà ad un modello numerico che richiede solo tre gradi di libertà traslazionali per nodo evitando così di considerare i gradi di libertà rotazionali. Lo schema adottato è, in effetti, una modellazione alle differenze finite di un elemento spline continuo con almeno due segmenti. La Figura 33 mostra nodi consecutivi lungo una spline inizialmente diritta.

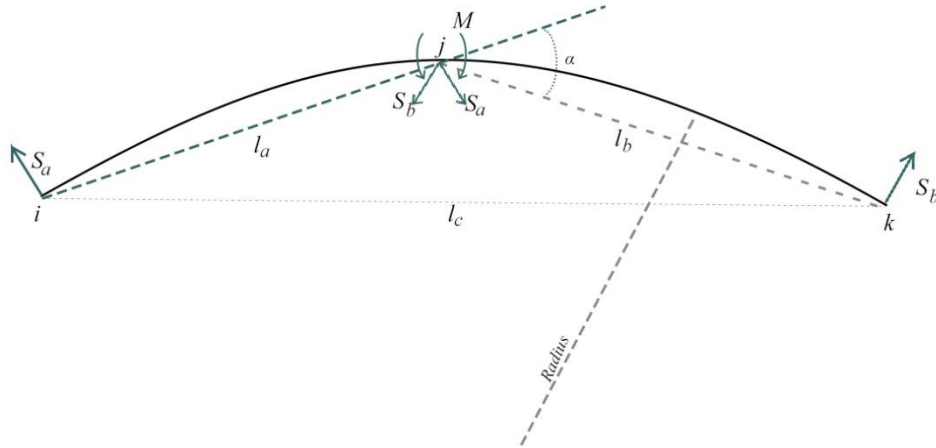


Fig. 28 schema di sforzi di momento e taglio in due aste consecutive soggette a flessione

Da questo modello, considerando E costante, possiamo ricavare il raggio R e il momento M di flessione con:

$$R = \frac{l_c}{2\text{sen}\alpha} \quad (1.9) \quad M = \frac{EI}{R} \quad (1.10)$$

E le forze di taglio S_a e S_b con:

$$S_a = \frac{2EI\text{sen}\alpha}{l_a l_c} \quad (1.11) \quad S_b = \frac{2EI\text{sen}\alpha}{l_b l_c} \quad (1.12)$$

Queste forze di taglio agiscono sui nodi i, j e k, come mostrato nella Fig. 33, e devono essere considerate come sforzi normali nelle aste nel piano locale di ijk. Per tenere conto della componente di rigidità dovuta alla flessione nel nodo j, viene aggiunto un termine all'equazione 1.3, in modo che:

$$S_i = \sum_{m=1}^k \left(\frac{EA^s}{L^s} + G \frac{T^s}{L^s} \right) + \sum_{a,b} \left(\frac{4EI^s}{L^3_s} \right) \quad (1.13)$$

Quindi si considera l'intera spline suddivisa in gruppi di tre nodi consecutivi, ciascun gruppo si trova su un piano diverso durante la modellazione di una curva spaziale.

3.3. Il workflow

Come abbiamo visto nei paragrafi precedenti la progettazione delle gridshell derivanti da flessione attiva è complessa e ricca di variabili, quello che si propone quindi è un workflow per un percorso ripetibile da chiunque abbia un minimo di esperienza con i software di progettazione computazionale, fornendo dei componenti implementati ad hoc per le parti più complesse e specifiche, connessi con componenti propri dell'ambiente Rhino\Grasshopper.

Il workflow ha un percorso lineare, l'input di inizio è una superficie generica, la quale deve essere analizzata nella sua geometria globale e locale, successivamente questa viene discretizzata tramite l'algoritmo genetico, chiamato GridMaker, che traccia il reticolo di Chebyshev, ossia una maglia quadrangolare equilatera, inestensibile secondo la direzione assiale delle aste. Alla maglia descritta tridimensionalmente sulla superficie corrisponderà una maglia planare che sarà l'input per la simulazione della deformazione, questa avverrà attraverso GFFT 3.0, un algoritmo basato sul Dynamic Relaxation a 3 gradi di libertà. Questa simulazione ci mostra la deformazione che la maglia assumerà in fase di realizzazione; ovviamente il reticolo deformato non sarà mai completamente sovrapponibile al reticolo di Chebyshev, in quanto la deformata tiene conto della resistenza flessionale, mentre la discretizzazione sulla superficie è un tracciato geometrico di punti equidistanti. Qualora la superficie di base presentasse dei cambi di curvatura, passando da sinclastica ad anticlastica, è necessario utilizzare *informer* in modo da conoscere e verificare gli ulteriori spostamenti da effettuare in fase di formatura. Ottenuta, quindi, la griglia definitiva segue una verifica per carichi esterni tramite il FEM Karamba3d¹¹⁴, un add-on di Grasshopper, a verifica soddisfatta, possiamo procedere con la scomposizione in moduli, in modo da avere un file esecutivo per la stima e realizzazione dei pezzi.

¹¹⁴ Solutore FEM per il calcolo strutturale in ambiente Grasshopper, anche Karamba3d consente la costruzione di algoritmi con il linguaggio visuale. <https://karamba3d.com/>

Vediamo approfonditamente i passaggi salienti del workflow proposto.

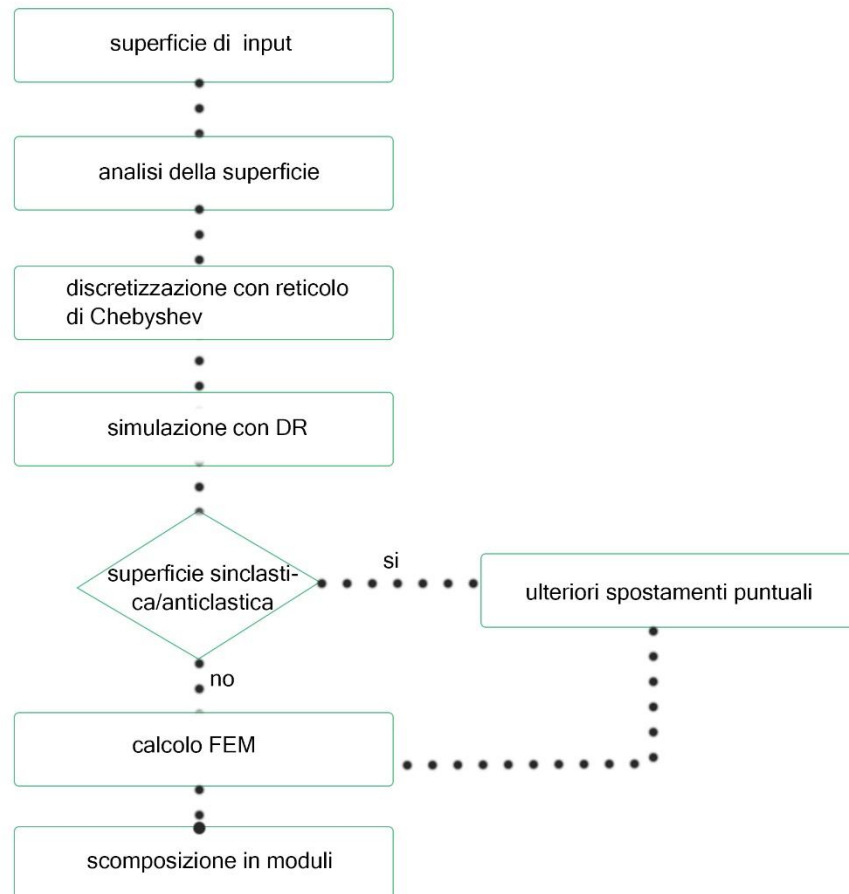


Fig. 29 workflow

3.3.1. Superficie di input

L'input iniziale è una superficie che rappresenta la forma architettonica, la spazialità che si intende creare. Questa superficie può essere modellata con varie tecniche, ad esempio può essere una superficie di rivoluzione, una estrusione su uno o due binari, può essere generata da sezioni successive oppure può essere una complessa NURBS¹¹⁵. Presupposto necessario

¹¹⁵ Le geometrie NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) sono rappresentazioni matematiche della geometria 3D, che definiscono con precisione qualunque forma: da una semplice linea, a un cerchio, un arco o una curva, fino al più complesso solido o superficie a forma libera o organica 3D. Grazie alla loro precisione e flessibilità, i modelli NURBS possono essere usati in svariati processi, dalle illustrazioni e animazioni sino alla fabbricazione.

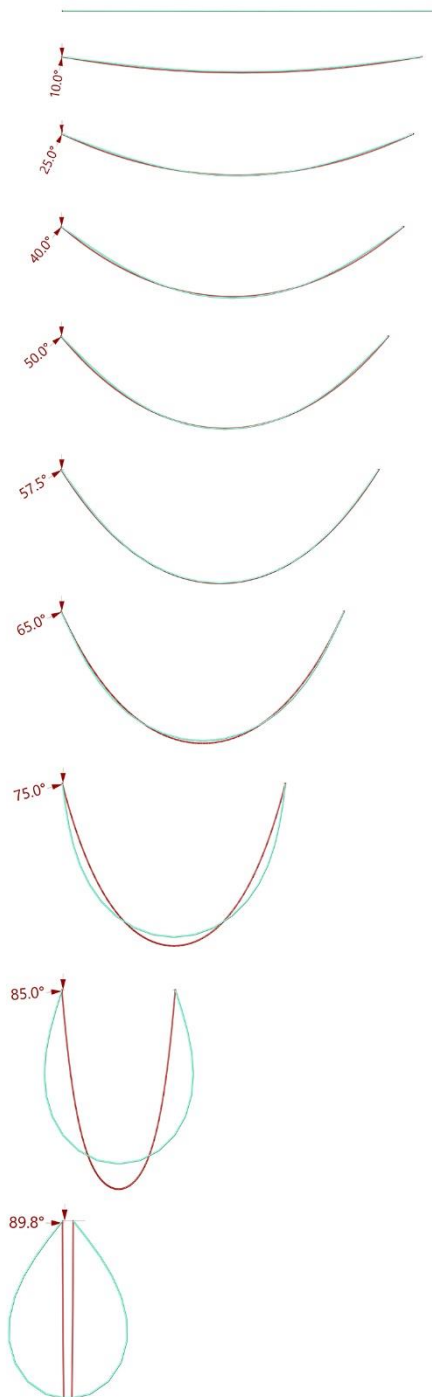


Fig. 30 Comparazione tra deformata della linea elastica, in azzurro, e la curva catenaria, in rosso

dell'analisi è che la superficie sia formata da un unico oggetto e non sia una unione di singoli parti (polysuperficie); in quest'ultimo caso, infatti, l'esame restituirebbe risultati relativi ai singoli settori, generando forti punti di discontinuità. Quindi l'analisi della superficie deve riguardare l'intero modello tridimensionale.

Così data la superficie, l'analisi mira a verificare se quest'ultima rispetti tutti vincoli, dettati dalla tipologia strutturale su base sperimentale, di seguito elencati:

- Non devono essere presenti eccessive curvature, ma neanche vaste aree a curvatura nulla
- Non devono essere presenti repentini cambi di forma concavo-convessa
- le "pareti verticali" non devono arrivare al suolo con un angolo superiore agli 85°

Mentre le prime due indicazioni derivano dall'impossibilità di flettere oltre certi limiti, dipendenti dalle caratteristiche geometriche e meccaniche, il legno in fase di costruzione, la terza invece è un'accortezza maturata con l'esperienza della ricerca, in quanto per contrastare i fenomeni di deformazione visco-plastica che si presentano nel tempo, è necessario configurare nelle aree di attacco a terra un andamento funicolare. E come riportato da Julian Leinhard¹¹⁶ e Cyril Douthe¹¹⁷ c'è un rapporto di identità tra la deformata catenaria e quella derivante dalla flessione

¹¹⁶ J. Lienhard, *Bending-Active Structures*, PhD thesis, Stuttgart 2014, p. 113

¹¹⁷ C. Douthe, *Étude de structures élancées précontraintes en matériaux composites: application à la conception des gridshells*, PhD thesis, École Nationale des Ponts et Chaussées, 2007

attiva che viene rispettato finché l'angolo di attacco col suolo è inferiore ai 65°(Fig.35), è da sottolineare la completa sovrapposizione a 57,5°.

L'analisi della superficie ci restituisce una mappatura della stessa indicando qualitativamente le percentuali di curvatura e in quali zone agire per "regolarizzare" l'andamento della forma (Fig.36).

Dopo l'esame della superficie il secondo step prevede la discretizzazione della stessa in una maglia regolare.

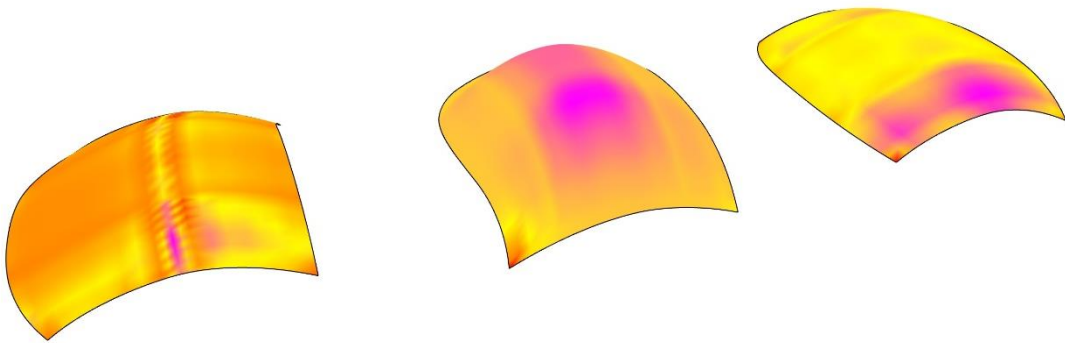


Fig. 31 Analisi delle curvature medie su superfici simili

3.3.2. GridMaker

Il secondo passaggio del diagramma di flusso prevede la trasformazione del guscio continuo, rappresentato con una superficie tridimensionale, in un reticolo a passo regolare, in modo da ottenere una maglia piana, che poi sarà deformata per simulare la fase di costruzione.

La maglia piana si ottiene facendo processare ad un algoritmo generativo/genetico la superficie di input. Il processo di ottenimento della griglia avviene tramite precisi passaggi; si sceglie un punto sulla superficie, da questo viene generata una coppia di vettori ortogonali, questi due saranno le direzioni che prenderanno i due assi che dividono la superficie in 4 porzioni. Questi assi sulla superficie non saranno delle curve generiche ma delle curve geodetiche, in modo da cercare di minimizzare la flessione nel piano della superficie. Dall'incrocio di questi due assi, grazie all'impiego del *compass method*, viene generata la

maglia a passo regolare sulla superficie; le soluzioni possibili sono innumerevoli, data la variazione consentita alla posizione del punto iniziale e l'orientamento della maglia sulla superficie. Quindi per valutare l'ingente numero di soluzioni prodotte ci si affida ad un processo evolutivo di ispirazione genetica "Octopus"¹¹⁸, questo add-on di grasshopper è in grado di valutare le soluzioni proposte in base agli obiettivi fissati –funzioni fitness- grazie alla variabilità degli input iniziali, ossia la posizione del punto e la giacitura nello spazio, può generare e valutare autonomamente un grande numero di soluzioni, affinando sempre più la ricerca dei risultati migliori. Le soluzioni generate tendono ad avvicinarsi il più possibile all'obiettivo, tutti i risultati si dispongono in quello che viene definito il "paesaggio delle soluzioni"¹¹⁹. Le funzioni obiettivo sono le seguenti:

- La distribuzione degli angoli della maglia quadrangolare più omogenea e ortogonale possibile.
- Il controllo dei raggi di curvature delle aste entro un intervallo prestabilito.

¹¹⁸ Octopus è un plug-in per applicare principi evolutivi alla progettazione parametrica e alla risoluzione dei problemi. Consente la ricerca di più obiettivi contemporaneamente, producendo una gamma di soluzioni di compromesso ottimizzate tra gli estremi di ciascun obiettivo. <https://www.grasshopper3d.com/group/octopus?overrideMobileRedirect=1>

¹¹⁹ Viene definito paesaggio delle soluzioni la disposizione delle soluzioni disposte in uno spazio tridimensionale in cui ogni asse di riferimento rappresenta un valore da ottimizzare.

Il controllo degli angoli della maglia avviene in ogni incrocio della griglia, vengono valutati i 4 angoli che si formano, viene scelto come dato da “controllare” quello più distante dai 90°, la condizione apparente è quella di angoli opposti al vertice, ma in realtà si tratta di angoli consecutivi la cui somma è pari a 360°; data la relazione mutua dei vertici della griglia al variare di un angolo dei quattro, variano tutti gli altri.

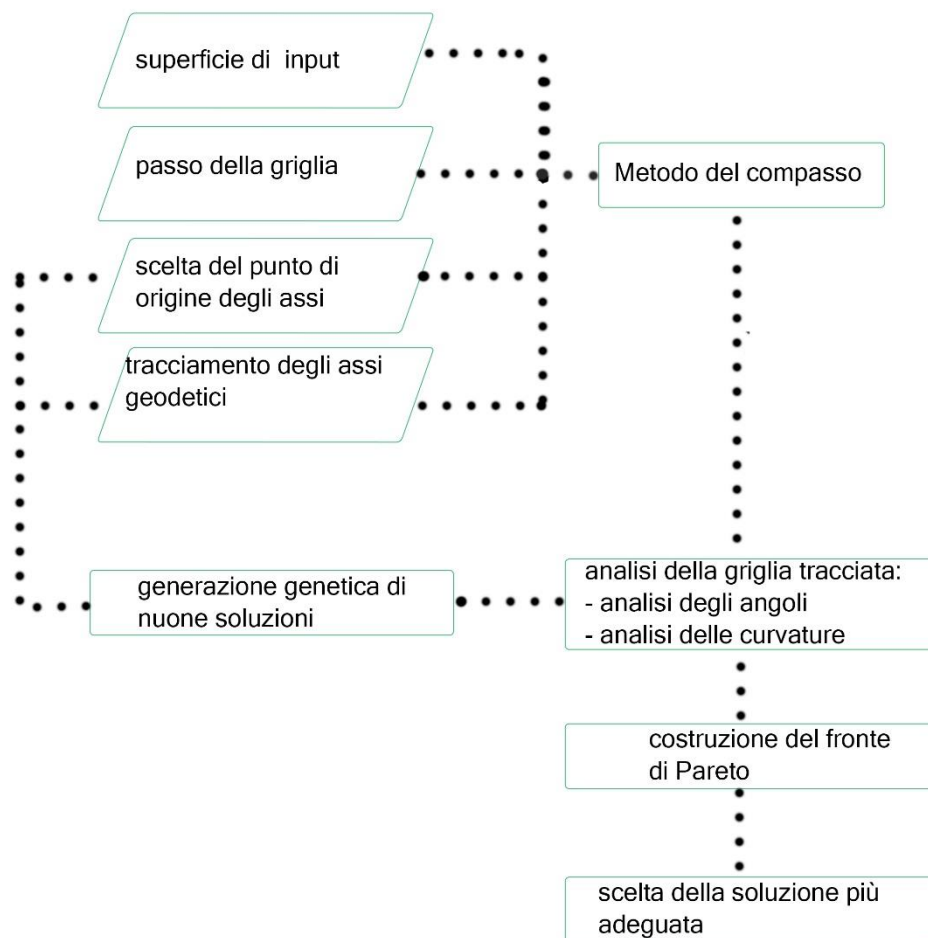


Fig. 32 diagramma di flusso di GridMaker 2.0

La verifica dei raggi di curvatura invece avviene tramite l'analisi del raggio del cerchio osculatore¹²⁰, prendendo tre punti successivi su ciascuna asta si traccia una circonferenza che approssima la curvatura dell'asta nel vertice centrale di ciascun trio.

Una importante modifica del metodo di tracciamento della griglia riguarda le aree prossime ai bordi, che ovviamente risultano sempre non raggiungibili dal metodo del compasso, nella

¹²⁰ In geometria differenziale, cerchio o, più propriamente, circonferenza, detta circonferenza osculatrice, che meglio approssima localmente la curvatura di una linea.

versione di GridMaker 1.0, la risoluzione del problema è affidata all'estensione della superficie, in modo da avere maggiore area sulla quale prolungare il metodo del compasso. In questa versione invece si è preferito trovare un'alternativa all'estensione della superficie, quando un punto è prossimo alla linea di confine della superficie si proietta il medesimo verso la curva di bordo mantenendo come direzione quella del vettore da cui proviene, con questa nuova direzione si predispone l'asse X di un nuovo piano che avrà come asse Y il vettore normale alla superficie in corrispondenza del punto proiettato; intersecando il piano appena ottenuto con la superficie otterremo il punto sulla curva di bordo (fig. 38).

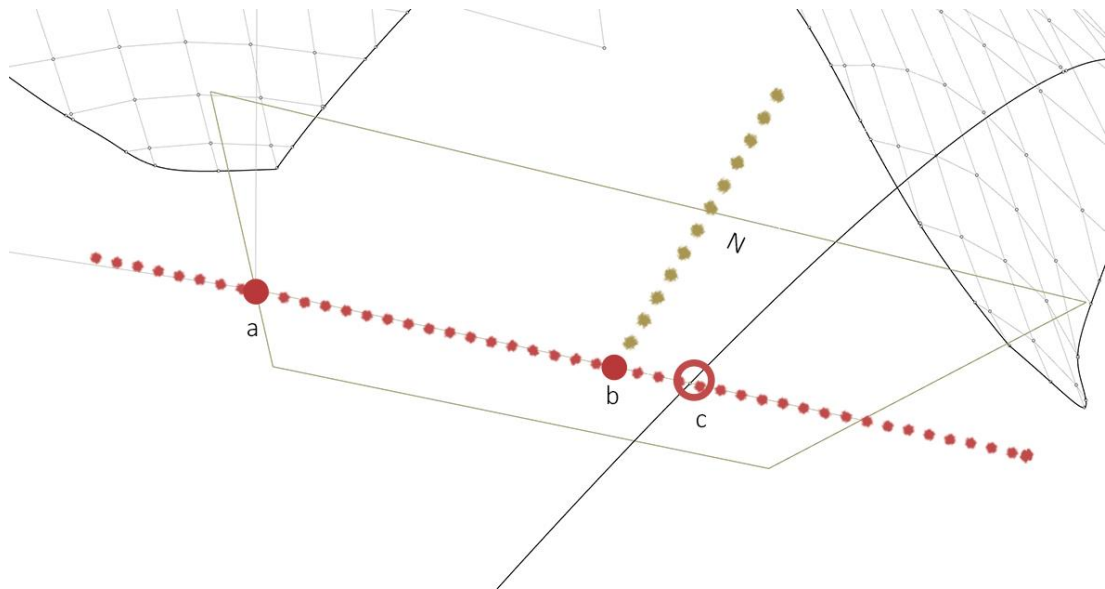


Fig. 33 Per trovare il punto C creiamo un piano che ha come assi il vettore AB e la normale alla superficie in B (N, intersecando con questo piano la curva di bordo della superficie otteniamo il punto C, essendo la distanza tra B e C molto breve, una ipotetica traslazione del punto è assolutamente trascurabile.

3.3.3. Gridshell Form Finding Tool, GFFT 3.0

La terza fase del workflow prevede la simulazione della deformazione della maglia piana. A differenza dei metodi utilizzati dai gruppi di ricerca precedentemente analizzati (§2.2.3) che prevedono la regolazione del modello partendo da una griglia già deformata nello spazio, che può essere stata disegnata sulla superficie col metodo delle sfere, o attratta alla superficie con il Dynamic Relaxation, in questo metodo si vuole ripercorrere le fasi della deformazione partendo dalla maglia piana.

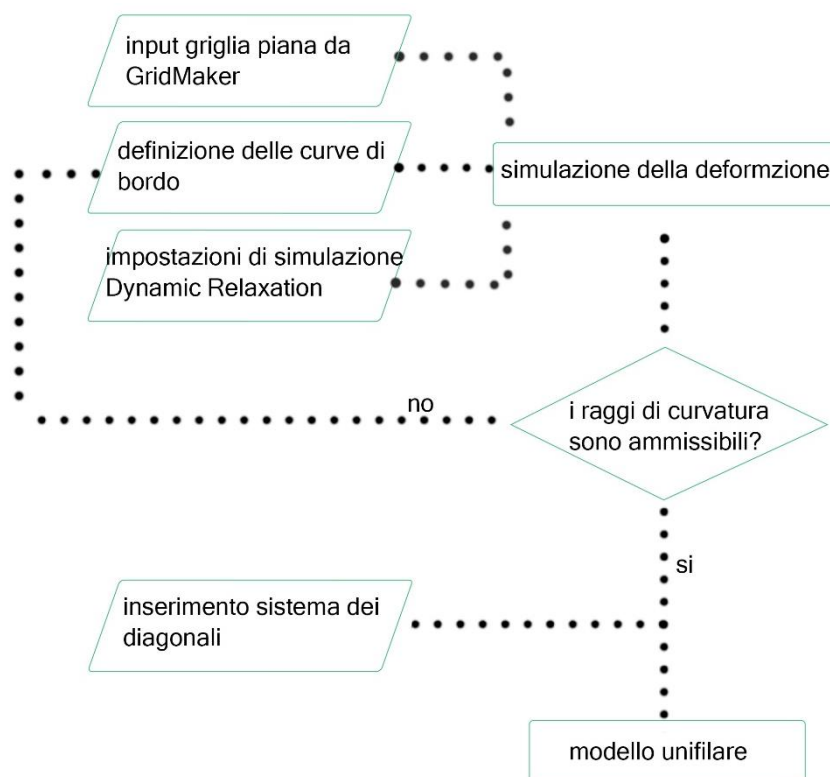


Fig. 34 diagramma di flusso di GFFT 3.0

Questo dettaglio è importante in quanto si ritiene che cambiando le condizioni di partenza della simulazione fisica, possa risentirne la formatura finale, per questo motivo si preferisce iniziare la deformazione come avverrebbe in cantiere. Quindi ricevuta la maglia piana come output dal passaggio GridMaker, verrà inserita all'interno di un componente scritto *ad-hoc* per la simulazione degli spostamenti. Al componente verranno dati degli input geometrici:

- la griglia piana
- i punti di bordo
- le curve di attacco

e degli input fisici:

- Modulo Elastico (E)
- Momento d'inerzia

La simulazione si basa sull'applicazione del *Dynamic Relaxation*, in questa simulazione si è optato per un DR a 3 gradi di libertà, molto più semplice e veloce da gestire a livello computazionale rispetto ad un 6gradi di libertà, consentendo quindi una più rapida interazione tra gli input variabili e la risposta del simulatore che si adatta istantaneamente alle variazioni apportate dal progettista. Si reputa il DR a 3 gradi di libertà adeguato al grado di approfondimento richiesto, dati i vantaggi che ne porta in termini di agilità di utilizzo.

3.3.4. Analisi FEM con Karamba3d

Terminata la fase di simulazione si procede con la verifica qualitativa della struttura con il solutore FEM Karamba3d. Questo solutore ci consente in maniera agile, di verificare la resistenza della struttura, ciò accade perché il passaggio al modello strutturale avviene grazie all'utilizzo della stessa "grammatica", cioè si resta nello stesso ambiente Grasshopper, e con componenti specifici si trasforma l'informazione geometrica in dati per la verifica strutturale, inserendo informazioni sul tipo di sezione, materiale, carico esterno e condizioni di vincolo esterno.

È molto importante modellare in maniera giusta la gridshell, in quanto anche piccole differenze possono dare risultati molto diversi, per far ciò è importante tener conto di come effettivamente sarà realizzata la costruzione, diamo per scontato che il nostro guscio sarà formato da un doppio strato sovrapposto di bacchette incrociate; quello che è suscettibile di variazioni è la dimensione della sezione della singola asta e la distanza tra il primo e il secondo strato di bacchette incrociate in modo da poter aumentare l'inerzia, e quindi la resistenza flessionale della singola asta. Le aste parallele sono connesse con dei blocchi che assorbono gli sforzi di taglio tra gli strati, ovviamente questi blocchi oltre che avere una funzione a taglio, aumentano la rigidità flessionale della sezione, imitando il comportamento di una sezione a Doppio T, quindi la sezione che andremo ad associare al nostro modello unifilare sarà quella di un doppio T con le ali di dimensione pari alla sezione delle bacchette, mentre l'anima avrà l'altezza reale, lo spessore sarà una proporzione del volume realmente esistente però esteso sul passo continuo, ridotto di un ulteriore 10%. Per esempio ipotizziamo di utilizzare aste con sezione 2,5 * 5 cm, con il layer parallelo a 5 cm di distanza e di avere un passo

strutturale di 50 cm, poi inseriamo un blocco di 30 cm con sezione 5 * 5 cm tra i layer paralleli, la proporzione risulta essere la seguente:

$$5*5*30=75\text{cm}^3 \quad 5*x*50=75 \quad x=75/250=0,3*0,90=0,27 \text{ cm}$$

Quindi modelleremo una sezione a doppio T con ali di 2,5 x 5 cm e un'anima alta 5 cm con spessore di 0,27 cm. Per i dati caratteristici del materiale ci si rifà ai valori tabellati dell'essenza scelta per la realizzazione. Mentre per il bordo avremo una soluzione differenziata in quanto le parti stabilite per il fissaggio saranno realizzate con un vincolo cerniera in modo da ridurre il momento flettente; mentre le parti "in aria", ossia delle parti identificabili come archi d'ingresso saranno modellate con sezioni variabili in modo da avere maggior resistenza ai bordi se necessario.

Per quanto riguarda i carichi avremo ovviamente il peso proprio della struttura e in aggiunta un sovraccarico che dipende dal tipo di utilizzo e quindi dalla successiva copertura che si andrà a realizzare, in ogni caso viene modellato come un carico verticale verso il basso (-Z) con il valore corrispondente in KN. Ad esempio se consideriamo la struttura precedente ed un'essenza di conifera con un peso di circa 650 Kg/m³, in 1 m² di maglia avremo circa 0,014 m³ di legno che corrisponde a circa 9 Kg/m², quindi il carico per peso proprio sarà di circa 0.088 KN/m² (Q1), ovviamente non saremo noi ad inserire questo valore in quanto l'algoritmo conoscendo tutte le informazioni geometriche e fisiche necessarie, calcola in automatico questo valore. Mentre per il sovraccarico consideriamo di caricare la struttura solo in corrispondenza dei nodi, e sempre rivolgendoci allo stesso esempio di maglia strutturale suddividiamo un carico di 100 Kg/m² per il numero di doni presenti in un metro quadro di maglia, che in questo esempio risultano essere 4, quindi ciascun nodo sarà caricato con 100/4= 25 Kg, ossia 0,024 KN.

Se la verifica risulta soddisfacente si può procedere con la suddivisione della maglia in moduli, così da poter ottenere il piano di fabbricazione degli elementi.

3.3.5. Divisione in moduli

Il passaggio dal digitale alla realizzazione concreta prevede la trasformazione della rete unifilare in lunghe bacchette che si incrociano; come descritto in precedenza (§1.4) queste aste sono realizzate giuntando di testa, con colle, piccole aste. Il processo di incollaggio normalmente avviene in ambienti a temperatura e umidità controllata, quindi la realizzazione di queste connessioni o avviene in ambienti industriali, oppure in cantiere si

destinano appositi spazi per realizzare un corretto incollaggio facendo diventare questa lavorazione molto dispendiosa e quindi non affrontabile da tutti. È sulla scorta di queste considerazioni che nel 2007 Sergio Pone, Sofia Colabella, Bianca Parenti e Felice Grasso¹²¹, progettano per la prima volta una maglia realizzata in moduli separati, che successivamente vengono assemblati con giunzioni meccaniche, ossia bulloni o viti. Questa modalità di connessione è stata sperimentata in varie realizzazioni, subendo spesso delle varianti per testarne la validità. La praticità della divisione della maglia piana in moduli ha reso la sperimentazione e la realizzazione delle gridshell alla portata di anche piccoli gruppi, tanto da essere ripresa in molte realizzazioni di piccola e media grandezza. Questa modalità di assemblare la maglia permette di poter prefabbricare i moduli e trasportare il legno in cantiere con estrema velocità alleggerendo i tempi di assemblaggio della maglia piana in cantiere.

La dimensione del tracciato di divisione della griglia dipende da due fattori; il primo riguarda la trasportabilità del modulo che si compone, in quanto un modulo “chiuso” ha una lunghezza confrontabile con il doppio della lunghezza singola asta, il secondo invece riguarda la dimensione delle aste che si ha a disposizione. Decisa la dimensione “standard” del modulo si suddivide la griglia in modo da ricavare una mappa dei moduli, del loro posizionamento e della loro composizione. Per realizzare i moduli quindi risulta necessario la produzione di un elaborato da officina che elenchi i pezzi da fabbricare e successivamente assemblare.

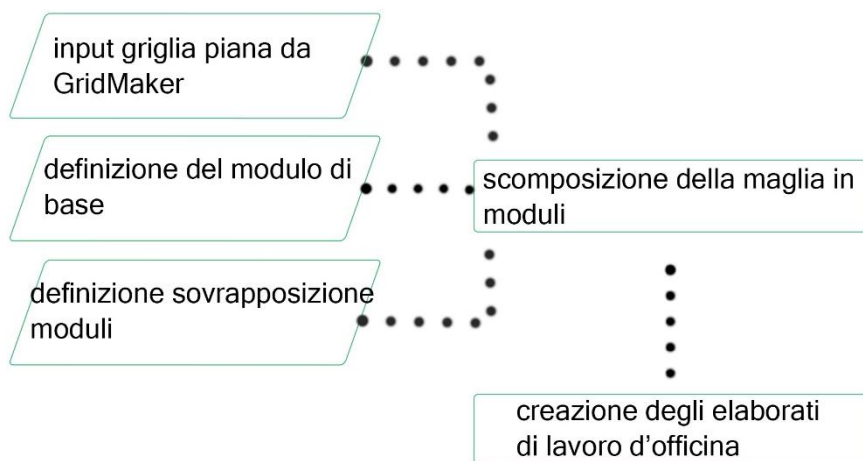


Fig. 35 diagramma di flusso della divisione in moduli

¹²¹ Brevetto n.0001394107, *Elemento strutturale per una costruzione gridshell, costruzione gridshell includente detto elemento e procedimento per realizzare tale costruzione impiegando detto elemento*

L'ultima fase del workflow qui presentato riguarda un algoritmo che generi automaticamente l'elaborato per la produzione. L'algoritmo di suddivisione della maglia ha come input la medesima griglia di GFFT 3.0, assunta la griglia da suddividere si decidono le caratteristiche dei moduli, ossia, la dimensione e la sovrapposizione che ci sarà tra le aste che saranno connesse per creare la continuità della maglia. Ottenuta questa informazione la suddivisione risulta immediata.

A seguire tabella comparativa del nuovo workflow con i metodi precedentemente illustrati:

	D'amico 2015	Du Peloux 2017	Elastica 2019	Bocanegra 2021	Gridshell.it 2012-17	Lancia 2024
superficie di input	generica superficie	generica superficie ottimizzata secondo le	generica superficie	generica superficie	generica superficie	generica superficie analizzata secondo le curvature
Maglia su superficie	Dynamic relaxation per attrarre la griglia alla superficie	Metodo del compasso ottimizzato secondo le curvature del materiale	Metodo del compasso	Metodo del compasso ottimizzato secondo le curvature del materiale	Metodo del compasso con ottimizzazione morphogenetica, in ambiente grasshopper (GridMaker)	Metodo del compasso semplificato con ottimizzazione mor- phogenetica, in ambi- ente grasshopper (GridMaker 2.0)
Simulazione fisica	Dynamic relaxation applicato alla griglia deformata sulla super- ficie, eliminando il sup- porto della stessa	Dynamic relaxation con 4 gradi di libertà	Dynamic relaxation con 3 gradi di libertà in ambiente Rhino\Grass- hopper	Dynamic relaxation con 6 gradi di libertà in ambiente Autodesk Robot	Algoritmo particle spring implementato in Kangaroo\grass- hopper (GFFT)	Dynamic Relaxation a 3 gradi di libertà, in ambiente Grasshop- per e c# (GFFT 3.0)
verifica della defor- mazione					Algoritmo morpho- genitico implementa- to in Python e grass- hopper, per il con- fronto della griglia geometrica e quella ottenuta dal rilassa- mento (informer)	Algoritmo morpho- genitico implementa- to in Python e grass- hopper, per il con- fronto della griglia geometrica e quella ottenuta dal rilassa- mento (informer)
						Algoritmo implemen- tato in KARAMBA 3D
						Algoritmo implemen- tato in Grasshopper per la divisione della maglia piana in moduli, con gli elementi forati e quotati

Tabella 2 comparazione del metodo proposto con i metodi precedentemente illustrati

Parte 3

4. Test del workflow e dei componenti implementati

Per verificare la funzionalità dei componenti da utilizzare in *grasshopper* sviluppati in C#, si è proceduto ad una serie di test. Le parti del workflow soggette a verifica sono stati il nuovo *Gridmaker* e il nuovo *GFFT*. Il metodo di verifica si è basato sul confronto tra i risultati ottenuti con i vecchi tool. Si è proceduto a stilare un set-up fisso per i test. Si sono scelte 4 tipologie di superfici e per ciascuna sono stati utilizzati i due componenti implementati. Le superfici testate sono state selezionate secondo criteri geometrici che potessero descrivere superfici ordinarie o altre con condizioni limite. Per questo motivo sono state scelte una superficie sinclastica, una superficie anticlastica, una monoclastica e una free-form.

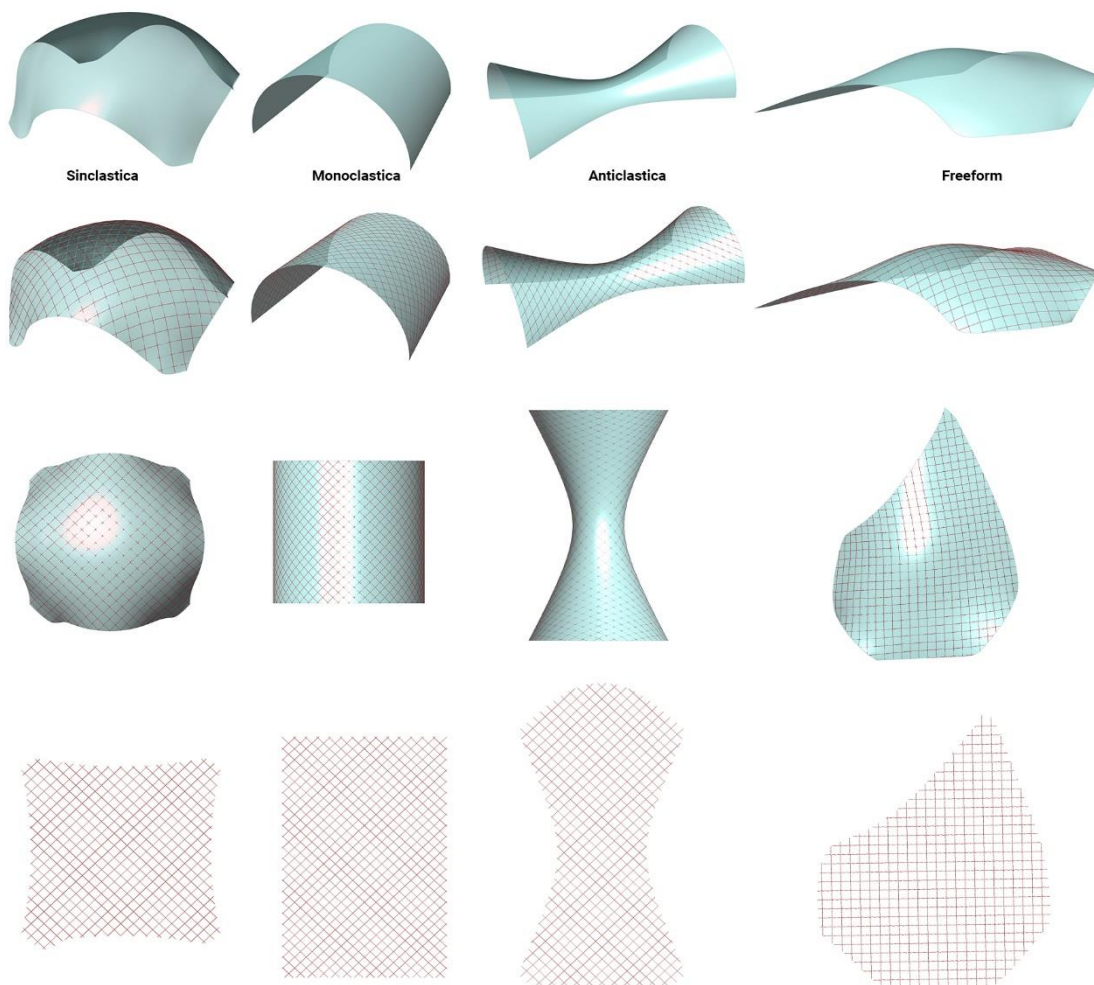


Fig. 36 Superfici test per la verifica del funzionamento del modulo GridMaker

Il nuovo componente *Gridmaker* ha prodotto buoni risultati; i test riguardanti le configurazioni con curvature omogenee non hanno presentato nessun problema, mentre la maglia piana restituita per le superfici più complesse, a merita una maggiore attenzione, ma va comunque esplicitato che superfici così complesse non sarebbero preferibili per una realizzazione di gridshell in legno *active bent*.

I test per il nuovo GFFT sono stati d'apprima di confronto con il vecchio procedimento, elaborato con *Kangaroo*, e poi si è proceduto con test reale, ossia la progettazione per un padiglione fieristico durante Vinitaly 2023.

4.1 Vinitaly 2023

Il caso qui presentato riguarda un progetto ideato per un padiglione espositivo per la ditta produttrice di prosecco Ruggieri.

Il progettista dell'intero padiglione, l'arch. Michele Giannetti¹²², ha proposto al sottoscritto l'idea di ricreare una "bollicina" (fig. 42) nella quale entrare. Le dimensioni del lotto a disposizione nel padiglione fieristico erano 8 x 8 metri, e per motivi logistici e di sicurezza era assolutamente proibito oltrepassare questo limite. Altra componente interessante della sfida è stata l'impossibilità di occupare aree circostanti durante la fase di cantiere, dato che in contemporanea ci sarebbero stati gli allestimenti dei padiglioni vicini.

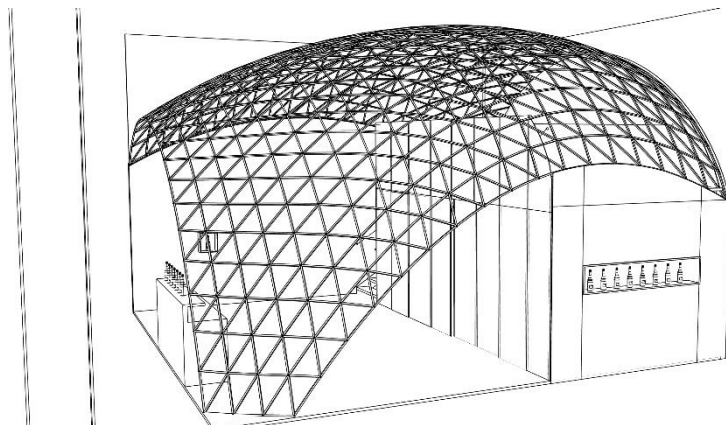


Fig. 37 proposta progettuale dell'architetto M. Giannetti

¹²² Studio Dalpiaz+Giannetti Architektenpartnerschaft, Bahrenfelder Str. 263, 22765 Hamburg, Germania

Ricevuta la superficie dall'architetto Giannetti, si è proceduto con l'analisi della suddetta. La superficie ha subito delle modifiche dovute alla ricerca del rapporto costante di curvatura necessario affinché non risultassero troppo stretti i raggi di curvatura (Fig.43).

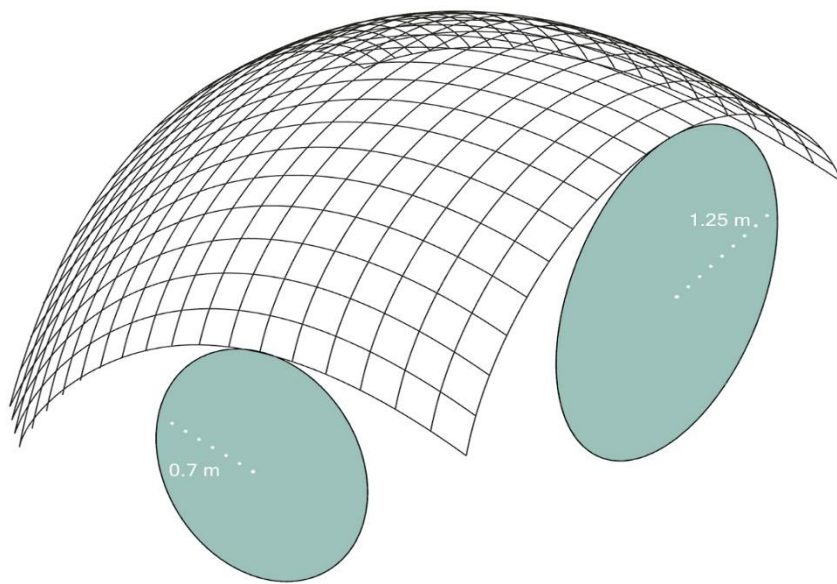


Fig. 38 come si può notare dai due cerchi osculatori rappresentati sono presenti dei raggi di curvatura troppo ridotti per essere realizzati con l'active bending di una asta di legno

Ottenuta la maglia è stato utilizzato il nuovo Gfft per procedere alla simulazione del processo. La simulazione ha funzionato dando una buona risposta, ma sono state riscontrate delle difficoltà in quanto la simulazione prevedeva anche le fasi di cantiere, che in questo caso sarebbero state diverse da quello che era mai stato sperimentato fin'ora. La costruzione, come detto in precedenza, è avvenuta in un lotto 8mx8m, e la copertura, descrivibile come 1/8 di sfera, avrebbe trovato appoggio lungo due pareti ad angolo e in un vertice a terra nell'angolo opposto a queste. Data la gestione complessa di un allestimento fiera, le fasi della costruzione hanno previsto in un primo momento l'assemblaggio della maglia piana a terra, la quale è stata sollevata con sei motori, conservando la configurazione piana; portata la maglia piana a quota 6 m è stato montato l'intero stand composto da pedana, pareti e piccolo manufatto; completata questa fase è stata deformata la gridshell facendola scendere con i motori, e guidando la deformazione punto per punto. La parte che ha creato problemi durante il test del componente, è stata la simulazione del sollevamento della maglia in piano. Questa difficoltà si è riscontrata in quanto la modellazione del tiro in alto prevedeva

L'inserimento di elementi fittizi di collegamento per far sì che la maglia restasse piana durante il sollevamento, ovviamente questi elementi fittizi, una volta raggiunta la quota, devono perdere la loro forza per consentire alla maglia di deformarsi. Il codice implementato non prevede questa possibilità, quindi per risolvere la simulazione siamo dovuti intervenire con dei componenti di grasshopper.

Per la costruzione della gridshell Vinitaly le scelte tecnologiche sono dipese dal tre fattori:

- Realizzazione in interno e nessun carico oltre il peso proprio
- Fase di montaggio e smontaggio rapida
- Brevità del tempo nella configurazione “deformata”

Per questi tre motivi sono state fatte le seguenti considerazioni:

- Realizzazione in categoria S3, quindi possibilità di scegliere essenze con il profilo di resistenza più basso tra quelle ammissibili.
- Costruzione mono-layer con diagonale estradossato.
- Sezioni ridotte e raggi di curvatura controllati, in modo da evitare la plasticizzazione durante la costruzione.

Quindi si è scelto di realizzare una maglia a singolo *layer*, con bacchette sovrapposte e giuntate con bulloni M8 60mm, il giunto cerniera realizzato con dado-rondella-bullone, prevede la sostituzione della rondella frapposta tra testa bullone e bacchetta con una piastra di acciaio dalla spessore di 0.8mm e di dimensione 250 * 45 mm (fig. 44), su questa piastra è

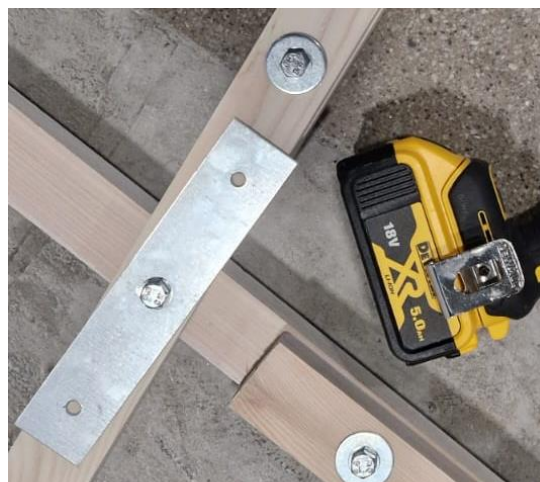


Fig. 39 piattina in sostituzione delle rondelle per fissaggio diagonali

previsto il fissaggio delle aste diagonali per la contrventatura nel piano della superficie (Fig.45).

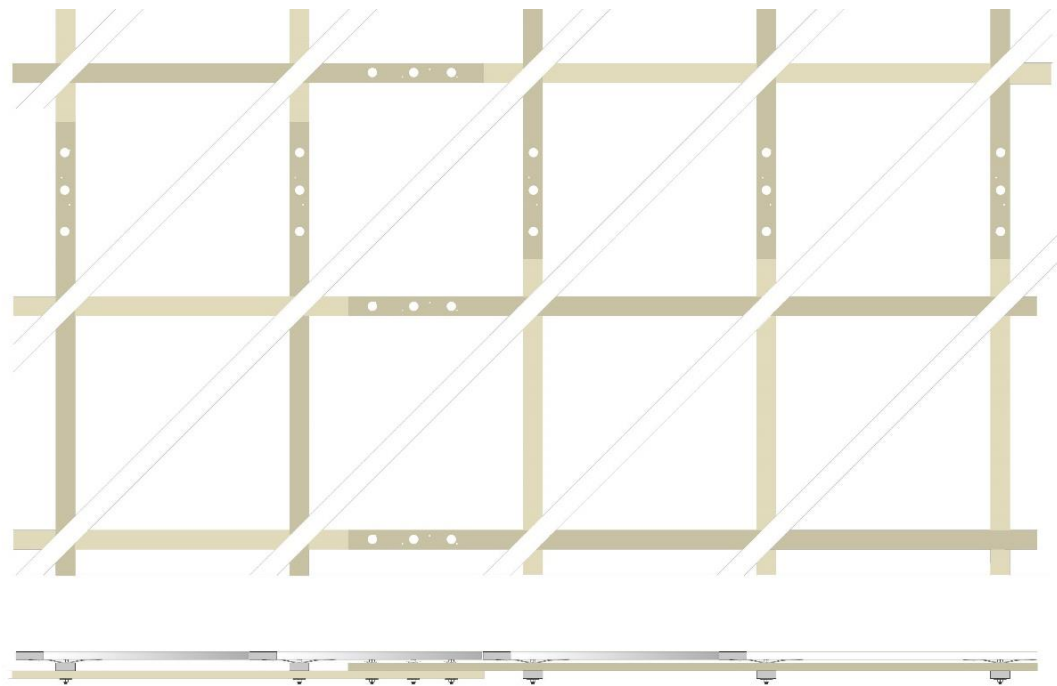


Fig. 40 vista in piante e sezione della maglia assemblata, in bianco gli elementi diagonali, si possono notare i tre bulloni di connessione tra le aste

L'essenza lignea utilizzata è un legno di conifera, precisamente Larice, per la classificazione ci si è basati sulla classificazione a vista prescritta nella norma EN1310, a cui si riferisce la norma UNI 11035-1/2. La normativa prevede che siano valutati ,in particolare, le seguenti caratteristiche o i difetti:

- l'ampiezza media degli anelli di accrescimento, o eventualmente la massa volumica del legno;
- la tipologia, posizione, frequenza e dimensione dei difetti quali:
 - nodi, misurati tramite il rapporto tra il diametro e la sezione di riferimento
 - deviazione della fibratura
 - legno di reazione o attacchi di insetti
 - agenti di carie del legno o deformazioni o smussi o fessurazioni da ritiro

- lesioni meccaniche
- cipollature (ammesse con limitazioni solo dalla norma UNI 11035 per il legname italiano di castagno, larice, abete centro Italia, mentre sono escluse da tutte le altre norme di classificazione)
- altro (inclusioni di corteccia, vischio....).

Data la ridotta sezione utilizzata, 20*50 mm, per la valutazione degli elementi utilizzabili si sono approfondite solo tre caratteristiche, ossia:

- l'ampiezza media dei nodi di accrescimento;
- l'inclinazione delle fibre;
- la presenza dei nodi;

tutte le altre imperfezioni, data la piccola sezione, rendono la bacchetta inutilizzabile.

L'essenza utilizzata è stata il larice (Fig. 47) con le seguenti caratteristiche:

UNI EN 11035-2 (2010)		Classi di resistenza secondo per specie legnose di provenienza italiana									
Proprietà		Abete/Italia			Pino laricio/Italia			Larice/Nord Italia			
Corrispondenza con le Classi di resistenza della UNI EN 338		C24 C18			C40 C22 C14			C22 C18			
Categorie resistenti		S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	
Resistenze [MPa]		N/mm ²			N/mm ²			N/mm ²			
Flessione(5-percentile), MPa	<i>f_{m,k}</i>	25.00 18.00			40.00 22.00 15.00			23.00 18.00			
Trazione parallela alla fibratura (5-percentile), MPa	<i>f_{t,0,k}</i>	15.00 11.00			24.00 13.00 9.00			14.00 11.00			
Trazione perpendicolare alla fibratura (5-percentile), MPa	<i>f_{t,90,k}</i>	0.40 0.40			0.40 0.40 0.40			0.40 0.40			
Compressione parallela alla fibratura (5-percentile), MPa	<i>f_{c,0,k}</i>	21.00 18.00			26.00 20.00 17.00			20.00 18.00			
Compressione perpendicolare alla fibratura (5-percentile), MPa	<i>f_{c,90,k}</i>	2.60 2.60			3.20 3.00 3.00			3.60 3.60			
Taglio (5-percentile), MPa	<i>f_{v,k}</i>	4.00 3.40			4.00 3.80 3.00			3.80 3.40			
Modulo elastico [GPa]		kN/mm ²			kN/mm ²			kN/mm ²			
Modulo di elasticità parallelo alla fibratura (medio), MPa (x 10 ⁻¹)	<i>E_{0,mean}</i>	11.80 10.50			15.00 12.00 11.00			12.50 11.50			
Modulo di elasticità parallelo alla fibratura (5-percentile), MPa (x 10 ²)	<i>E_{0,05}</i>	7.90 7.00			10.00 8.00 7.40			8.40 7.70			
Modulo di elasticità perpendicolare alla fibratura -(medio), MPa (x 10 ²)	<i>E_{90,mean}</i>	0.39 0.35			0.50 0.40 0.37			0.42 0.38			
Modulo di taglio (medio), MPa (x 10 ²)	<i>G_{mean}</i>	0.74 0.66			0.94 0.75 0.69			0.78 0.72			
Massa volumica [kg/m ³]		kg/m ³			kg/m ³			kg/m ³			
Massa volumica (5-percentile), kg/m ³	<i>ρ_k</i>	375.00 375.00			455.00 425.00 430.00			510.00 520.00			
Massa volumica (media), kg/m ³	<i>ρ_{mean}</i>	450.00 450.00			550.00 520.00 520.00			610.00 620.00			

Fig. 41 tabella valori caratteristici UNI 11035-2



Fig. 43 larice, campione delle bacchette selezionate

La struttura portata in cantiere sottoforma di moduli preassemblati (Fig. 48)



Fig. 428 griglia scomposta in moduli

è stata assemblata e formata in 12 ore lavorative, le connessioni tra i moduli sono state fatte con tre bulloni m8 60mm (Fig.49-50-51-52).

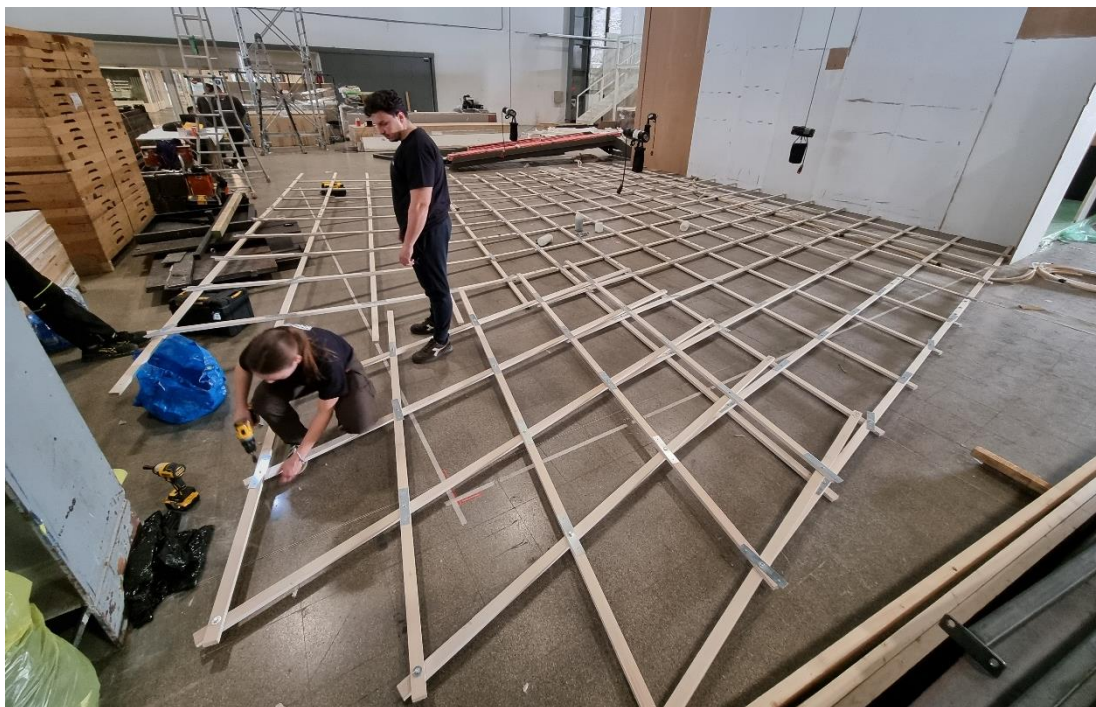


Fig. 49 assemblaggio maglia piana

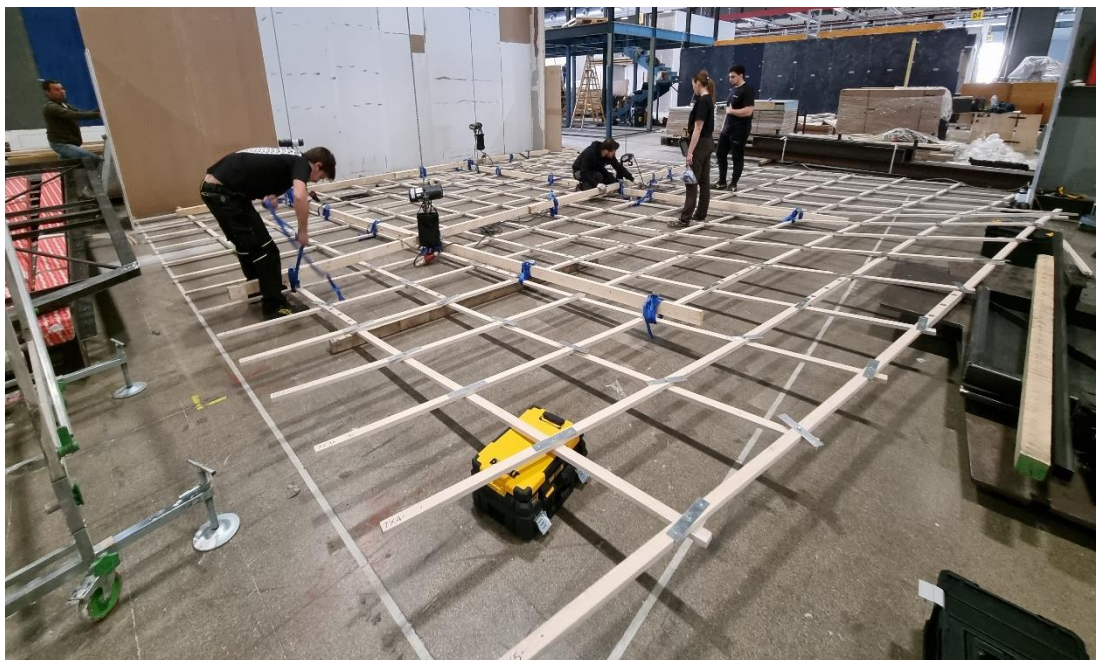


Fig. 50 posizionamento motori per il tiro in alto



Fig. 51 fase finale del fissaggio, da notare gli archi curvi d'imposta e i motori ancora in tensione che sorreggono la struttura in fase di formatura



Fig. 52 diagonali

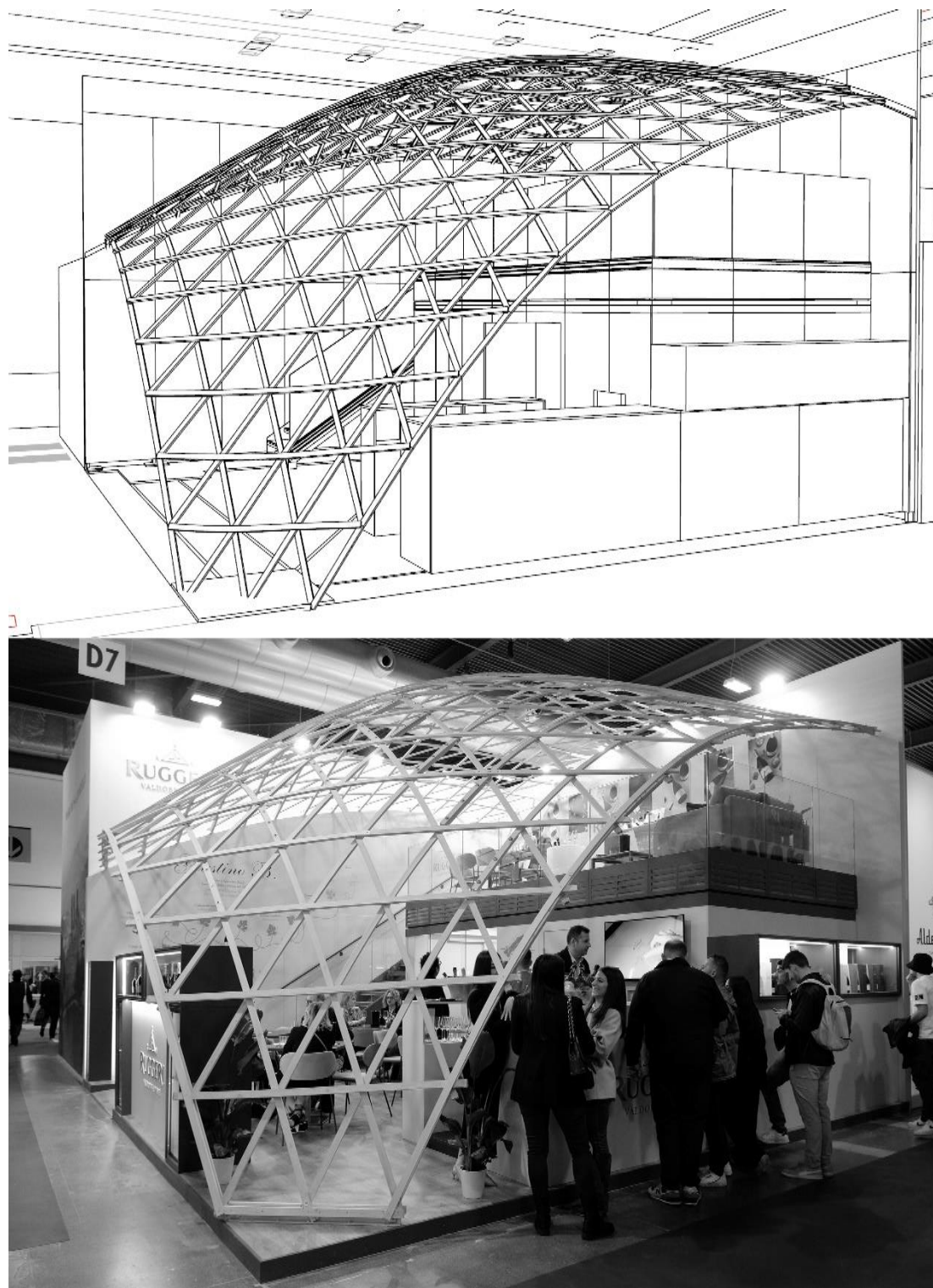


Fig. 54 confronto tra progetto e realizzazione



Fig. 44 per lo smontaggio la gridshell è stata riagganciata ai motori e disassemblata un modulo alla volta

dopo una settimana di fiera è stata smontata (fig.55) e riportata nella sua configurazione a moduli separati, pronta per essere trasportata in deposito ed essere riutilizzata durante Vinitaly 2024.

5. Caso studio: Montevideo applicazione del tool e realizzazione

Il caso studio presentato riguarda una sperimentazione sul campo di un breve corso con realizzazione di gridshell derivate da flessione attiva, nata dalla richiesta di collaborazione con la facoltà di architettura dell'università FADU UDELAR di Montevideo, all'interno del corso di Post-grado in *Costruzione in Legno*. Il corso, rivolto ad una classe eterogenea (dipendenti ministeriali, carpentieri, studenti, lavoratori per il terzo settore) è stato ideato in modo da insegnare agli studenti cosa fosse una gridshell, fargli rendere conto delle potenzialità architettoniche ed espressive, sperimentare con un modello in scala cosa volesse dire lavorare alla progettazione di un "tessuto che prende forma", per poi trovare un piccolo tema di sperimentazione e procedere con il progetto e la realizzazione. A valle della parte teorica del corso, in cui si sono affrontati, appunto, i temi delle strutture in legno, costruzioni

leggere, progettazione computazionale e gridshell; è stato individuato all'interno della *Rede Social* uno spazio in uno *Escenario publico*, ossia un teatro all'aperto, in cui sperimentare tutto il workflow descritto finalizzato con la realizzazione del manufatto.

5.1. Il progetto scenario popolare

La *Red de Escenarios Populares* è un gruppo di spazi culturali dedicati alla produzione di spettacoli ed eventi, gestiti da commissioni di quartiere e associazioni civili senza scopo di lucro. Si tratta di 19 palcoscenici situati nelle periferie di Montevideo e Canelones (Uruguay), che mirano a decentrare la cultura e a rafforzare i legami culturali metropolitani. La Red salvaguarda e rende possibile la pratica del *teatro carnavalesco* (Fig.56), attività principale



Fig. 45 spettacolo di murga uruguayana per il carnevale

dell'articolata "*scena popolare*"¹²³ in Uruguay, una realtà culturale complessa che comprende vari altri spazi, pratiche, media, forme, linguaggi: il teatro comunitario, il teatro di quartiere, il teatro di strada, la religione e il calcio come messinscena, gli interventi urbani, l'uso di strategie teatrali di espressione da parte delle organizzazioni sociali e le loro manifestazioni e apparizioni pubbliche, e molto altro ancora. Queste sono a loro volta collegate ad altri tre

¹²³ G. Remedi, *El teatro de los comunes: aproximaciones a la poética política popular*, in *Ensaïando o olhar latino-americano: insistência de uma cena situada*, 2021 p.150-151

aspetti: la prospettiva e il sentimento popolare del mondo e della vita, influenzato da un'esperienza differenziata dalla sua posizione sociale subalterna; la natura intrinsecamente amorfa, mutevole e contraddittoria della coscienza popolare e anche delle forme popolari; il problema più strettamente politico di sintonizzare e metabolizzare dialogicamente e criticamente il sentimento e la visione del mondo delle classi popolari" (Remedi, 2021, p.151). Dallo scambio tra i teatri e alcuni docenti della Facoltà di Architettura, Design e Urbanistica insieme a professionisti che da diversi anni sostengono attivamente e fanno parte della *Red*, è nata una richiesta di supporto e consulenza di fronte alla sfida di ripensare le proprie infrastrutture per passare da un fenomeno stagionale spontaneo (il carnevale), a una rete di palcoscenici permanenti che indicano un'opzione artistica di qualità nelle periferie e nei quartieri periferici di Montevideo e Canelones. L'obiettivo di questo progetto di estensione è stato quello di valorizzare il ruolo delle comunità che si organizzano intorno a queste attività, contribuendo con elementi tecnici alla costruzione collettiva di un supporto adeguato per diversificare l'offerta di attività socio-culturali in questi territori. Gli attori coinvolti hanno sviluppato un processo di progettazione partecipata, in 5 fasi: 1) Diagnosi fisico-spaziale e organizzativa dei 19 palchi, 2) Valutazione partecipata dei bisogni, delle opportunità e delle priorità vigenti, 3) Studio di soluzioni costruttive a basso costo che amplino la diversificazione delle attività artistiche e culturali dei palchi, 4) Progettazione e sperimentazione costruttiva di possibili interventi materiali, 5) Sistematizzazione dell'esperienza e diffusione.

Quindi si riconosce come obiettivo generale il rafforzamento dello sviluppo della *Red de Escenarios Populares* come agente culturale metropolitano, per valorizzare le comunità che si organizzano intorno ai palchi, contribuire con un supporto adeguato alla costruzione collettiva della diversificazione della proposta culturale in questi territori.

Questo obiettivo è perseguito attraverso i seguenti 5 punti:

1. Creare un legame tra la FADU e la *Red de Escenarios Populares* per favorire lo scambio di conoscenze, esperienze e visioni tra gli attori di entrambe le parti e stabilire un precedente per continuare ad accompagnare lo sviluppo di questa rete dall'UdelaR.
2. Contribuire allo sviluppo degli spazi culturali popolari che costituiscono la *Red de Escenarios Populares* attraverso la co-progettazione di infrastrutture, favorendo l'accesso a servizi culturali di qualità nelle periferie.

3. Rafforzare e proporre forme di co-governance, riflettendo con i livelli di governo coinvolti, per generare politiche pubbliche continue e incrementali che capitalizzino le esperienze spontanee come insieme di nodi importanti della cultura popolare.
4. Sperimentare forme, metodologie e strumenti di progettazione partecipata, avvicinando gli studenti e i vicini ai suoi concetti teorici e pratici fondamentali.
5. Consentire agli studenti universitari di avere un'esperienza pratica di contatto reale con materiali e tecnologie non tradizionali per la loro trasformazione, attraverso istanze sperimentali di co-progettazione e autocostruzione.

Quindi seguendo questi principi di cooperazione e partecipazione è nata la collaborazione con la FADU UDELAR. Nel punto 5 è espresso l'obiettivo che dà vita alla sperimentazione dello strumento di progettazione con successiva realizzazione della struttura gridshell.

5.2. Il caso studio

La sperimentazione ha previsto diverse fasi, passando dal teorico al pratico, per concludersi con la realizzazione di un prototipo in scala 1:1.

La prima fase è stata teorica, servita ad illustrare il metodo costruttivo, la sua evoluzione nel tempo, identificando nei progetti di F. Otto, E. Cullinan e G. Howells i capisaldi dai quali partire per poi approfondire la questione attraverso le sperimentazioni condotte negli anni che culminano nella ricerca qui presentata. Dopo questa prima fase storico/tecnologica, l'obiettivo che ci si è posti è stato quello di far realizzare agli studenti una maglia intrecciata in modo che potessero sperimentare, "giocando" con questa, come poter disegnare una forma utilizzando un materiale che guida e non si lascia costringere, per far ciò sono stati realizzati dei modelli in scala utilizzando listelli di legno dalle dimensioni di 1*2mm (Fig. 57).

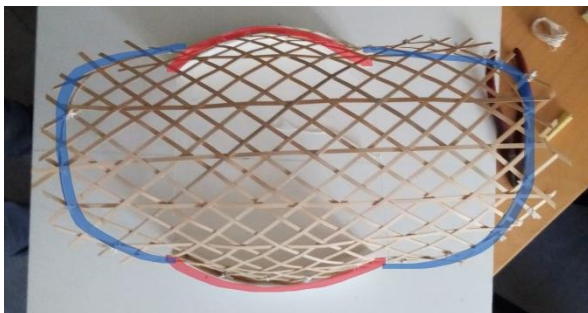


Fig. 57 uno dei modelli di studio realizzato dagli studenti

Con questa fase, totalmente analogica, gli studenti hanno sperimentato la complessità della gestione della forma, il rapporto tra il comportamento della griglia e le possibilità formali esistenti, e quindi la relazione non lineare tra il progetto cartaceo e la realizzazione del suo modello. Al termine di questa forte esperienza didattica, è stata aperta una finestra sul mondo della progettazione computazionale, ai più sconosciuta. Quindi dopo una introduzione ai concetti base, pratici e teorici, sull'utilizzo del pensiero computazionale e il metodo progettuale che ne deriva, è stato prima illustrato, e poi dato alla classe, l'algoritmo che segue il workflow descritto in questa ricerca. Gli studenti ne hanno sperimentato l'utilizzo e hanno trovato un notevole miglioramento della gestione del lento e complesso sistema analogico grazie all'immediata risposta del sistema computazionale (Fig.58).

È da sottolineare, tuttavia, che ai fini pedagogici si rileva quanto sia importante la fase di sperimentazione analogica, perché per quanto la simulazione virtuale aumenti



Fig. 58 alcuni momenti in aula con gli studenti durante la fase "computational"

esponenzialmente le capacità del progettista, non può surrogare l'esperienza del "capire con mano", di "imparare facendo" o meglio "scoprire facendo". Per questo motivo lo strumento computazionale è stato svelato solo al termine del percorso. Le ultime due fasi sono state la concreta sperimentazione del workflow, in quanto in sette giorni si è affrontata la progettazione e la realizzazione del prototipo. Il progetto, dalla fase euristica a quella esecutiva, è stato affrontato in ambiente Rhinoceros/Grasshopper, grazie all'impiego del workflow e dei tools precedentemente descritti. L'ultima fase ha riguardato la realizzazione della gridshell, un manufatto di circa 40 m², realizzato interamente dagli studenti.

5.3. Il progetto

Il Parque de los Fogones si presenta come un anfiteatro con un palco di forma lenticolare di dimensioni 21*9m con di fronte 7 gradinate, in cima alle quali c'è la postazione della regia. La scelta progettuale è ricaduta sulla postazione della regia, in quel momento si presentava completamente sguarnita di qualsiasi tipo di copertura (Fig. 59).



Fig. 59 Escenario populares del parco de los Fogones

Per la realizzazione il budget è stato un parametro importante, in quanto contenuto in un tetto massimo di spesa pari a \$100.000 (pesos uruguayos) ~ €2.000. La progettazione è partita dal rilievo dell'area, in pianta è una porzione di corona circolare, ma in sezione ci si rende conto della presenza di un asimmetrico e rapido dislivello; per velocizzare la fase di rilievo è stato utilizzato un drone in modo da poter ricavare foto aeree e poterle processare con un programma commerciale di fotogrammetria¹²⁴, nel caso specifico è stato utilizzato il software Metashape^{®125} di Agisoft[®]. In questo modo si è ottenuto in maniera rapida e sufficientemente precisa il modello tridimensionale dell'area di intervento (Fig.60). Quindi dopo una breve attività di *brainstorming* con gli studenti, si è passati a sperimentare con i tools a disposizione le proposte progettuali. Quindi partendo dalla modellazione di una

¹²⁴ In geomatica, la fotogrammetria è una tecnica di rilievo che permette di acquisire dei dati metrici di un oggetto (forma e posizione) tramite l'acquisizione e l'analisi di una coppia di fotogrammi stereometrici. Impiegata anche in cartografia e in topografia, oltre che in geologia e in archeologia, il ramo della fotogrammetria che – in architettura – interessa il rilievo di edifici e costruzioni è noto come fotogrammetria architettonica. Wikipedia (10/01/2024)

¹²⁵ <https://www.agisoft.com/>



Fig. 60 Mesh del escenario de los fogones

superficie NURBS si è verificato il suo comportamento a guscio (Fig.xx) nel primo step, successivamente è stata discretizzata geometricamente con il metodo del compasso, grazie al tool GridMaker3.0, ottimizzando la distribuzione della maglia sulla superficie (Fig. 61),

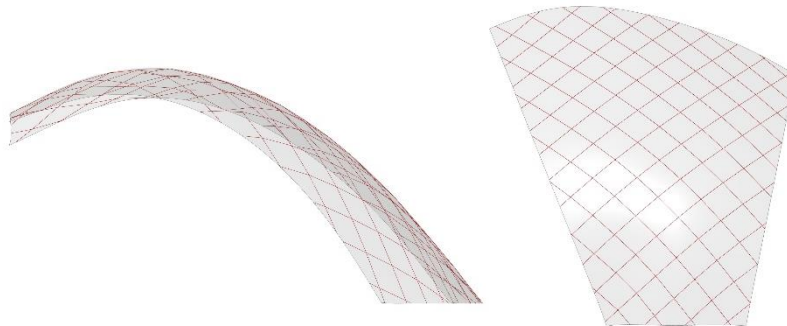


Fig. 61 gridmaker sulla superficie progettata

ottenuta la griglia piana si è proceduto alla deformazione con GFFT 3.0 (fig. 62).

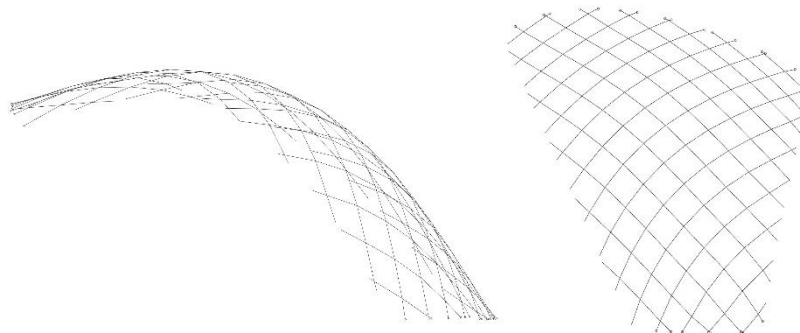


Fig. 46 form-finding con GFFT3

Fatto il form-finding della gridshell si è ulteriormente intervenuto sulle condizioni di bordo, modificando la geometria degli attacchi, in modo da affinare ulteriormente la forma.

Soddisfatta l'esigenza progettuale dello spazio creato, si è proceduto alla verifica strutturale con Karamba3d® (Fig. 63), con un carico di 0,6 kN per nodo verifichiamo un abbassamento di

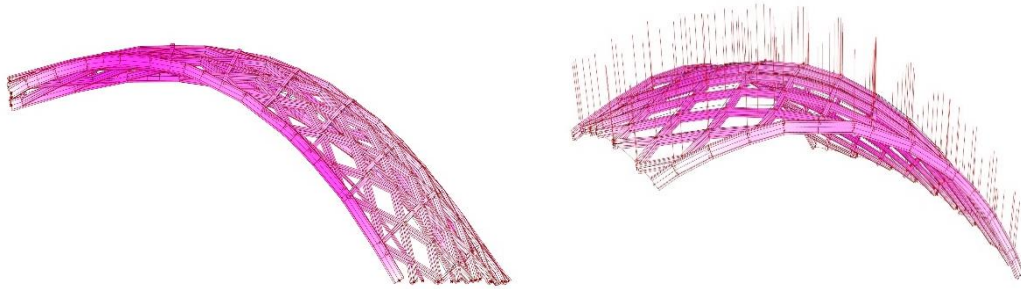


Fig. 63 Verifica per carichi verticali 0,6 kN per nodo

1,29 cm nell'area dell'appoggio in alto, in corrispondenza della minore curvatura della superficie, ma comunque consideriamo questo abbassamento ammissibile. Al termine della quale si è passati all'elaborazione dei disegni d'officina, preceduti dalla divisione in moduli della maglia (fig. 64), e poi il singolo elaborato per ogni modulo (Fig.65) per l'acquisto del materiale da trasformare prima in moduli, poi in maglia piana e infine in gridshell (fif.XXXX). La costruzione ha impiegato 3 giorni di lavoro di circa 10 persone per 8 ore al giorno.

Il costo totale della realizzazione è stato di \$45.000 (pesos uruguayos) ~ €1.000

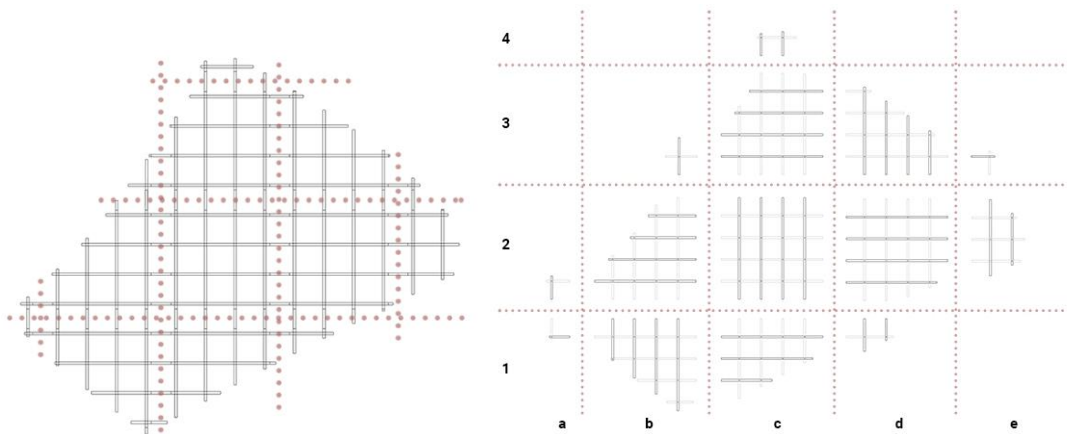


Fig. 64 divisione in moduli della griglia

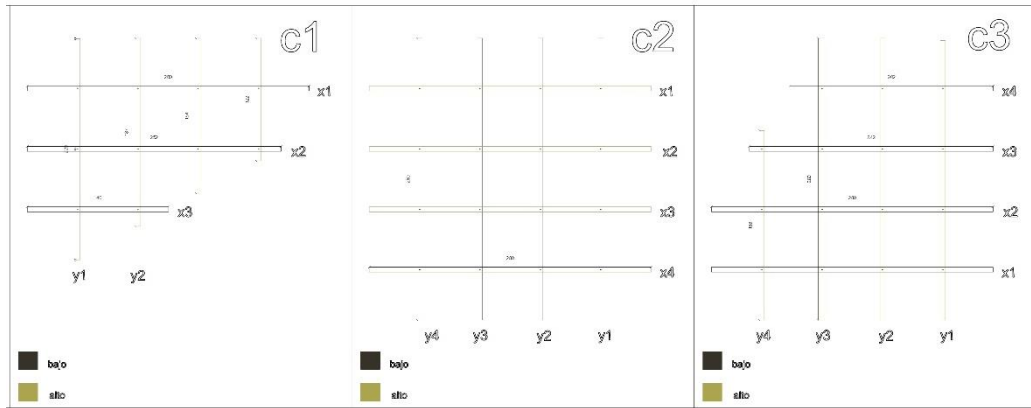


Fig. 47 disegni di officina per la preparazione dei moduli

5.4 La realizzazione

Per la realizzazione della gridshell sono stati impiegati circa 0,7 m³ di legno di Pino Nazionale Uruguayano. Questo legno è poco utilizzato per le carpenterie in quanto poco efficiente rispetto ad altre essenze comunemente adoperate (in Uruguay è molto utilizzato l'eucalipto). Ma tutta via questo legno non presenta alcun nodo, e le fibre sono parallele e poco distanti (Fig. 66), a delle prove sperimentali si presenta come un materiale malleabile, in quanto sono state ottime le risposte a test a flessione su 4 punti. Con appoggi distanti 100 cm la freccia registrata è stata oltre i 10 cm.



Fig. 48 Fornitura di legno di pino Nazionale Uruguayano

Il materiale è stato impiegato per la realizzazione della maglia piana, delle connessioni a taglio, degli elementi diagonali e il rinforzo degli archi. La maglia è a passo costante di 60 cm, formata da 14 moduli di diversa dimensione, questi sono composti solo dal primo e secondolo livello di aste ortogonali, connesse un bulloni M8 60mm. Assemblati i singoli moduli sono stati giuntanti tra di loro sovrapponendo per una lunghezza di 35cm le aste in modo da mantenere il passo della maglia costante, il fissaggio è avvenuto con un sistema meccanico tramite l'impiego di viti autofilettanti per legno della dimensione 4Ø 40mm. (Fig.

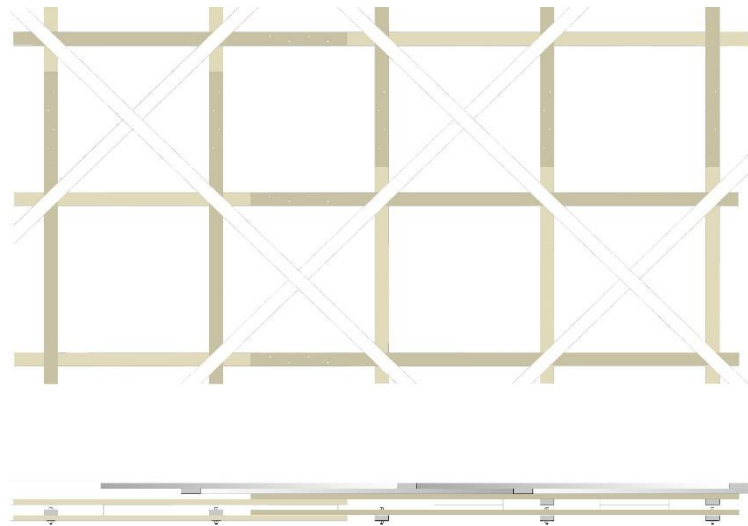


Fig. 497 vista in pianta e sezione della maglia assemblata, in bianco gli elementi diagonali



Fig. 50 assemblaggio della maglia sul palco, connessione tra le aste con viti autofilettanti

Ultimata l'aggregazione dei moduli sono stati avvitati sulle aste, in corrispondenza della mezzeria di ciascun campo i connettori a taglio realizzati con due bacchette sovrapposte di dimensioni 2.5*5*25 cm (Fig. 69).



Fig. 519 fissaggio provvisorio, con una sola vite, dei connettori a taglio

Composta così la griglia la si è posizionata nel sito della costruzione, dato il poco spazio di manovra la maglia è stata posizionata in modo da appoggiarsi già in prossimità dell'arco di bordo superiore. Posizionati i dovuti puntoni di sostegno lentamente si è provveduto alla formatura, la fase più delicata, i puntoni di sostegno e alcuni cavi di ritegno sono stati tenuti in posizione fino alla fine della realizzazione (Fig. 70). Raggiunta la forma finale, verificata tramite misurazioni metriche della distanza tra gli appoggi e l'altezza dal suolo di alcuni punti scelti sulla griglia, si è provveduto al raddoppio dei layer avvitando sui connettori a taglio in attesa le bacchette, anche questo fissaggio è avvenuto con viti autofilettanti da

legno 4Ø 80mm in modo da rendere solidale l'intera sezione (Fig. 71). Completato il guscio si



Fig. 70 struttura deformata con puntoni e cavi di ritegno



Fig. 71 posizionamento dei 3 e 4 layer

è provveduto al fissaggio all'arco superiore con piastre metalliche saldate ad un tubolare precedentemente posizionato, per quanto riguarda l'attacco a terra invece si è proceduto con il posizionamento di picchetti e contrappesi che contrastassero la spinta orizzontale. Bloccato il guscio in questa configurazione sono stati posti in opera gli elementi diagonali; sovrapposti alla maglia principale sono stati avvitati con viti autofilettanti da legno in corrispondenza di ciascun incrocio con viti $4\varnothing 60\text{mm}$. Parallelamente al messa in opera degli elementi diagonali che irrigidiscono la maglia secondo gli spostamenti tangenziali, e che contribuiscono a rendere la struttura più rigida, sono stati irrigiditi i bordi liberi, quindi i due archi d'ingresso (Fig. 72-73-74). È prevista una copertura con un telo removibile.



Fig. 72 messa in opera degli elementi diagonali



Fig. 73 struttura terminata



Fig. 74

6. Conclusioni

Nelle gridshell in legno da flessione attiva si riscontra un distacco tra la grande complessità della fase progettuale, campo ancora aperto a studi, e l'estrema semplicità della fase realizzativa, che per quanto complessa, è facilmente gestibile da un progettista e un carpentiere disposti a pensare fuori dagli schemi della costruzione tradizionale. In questi anni di ricerca e di realizzazione, la gridshell, soprattutto se di modeste dimensioni, si è rivelata uno strumento educativo e sociale estremamente valido. Si è dimostrato con l'esperienza di Montevideo come un progetto estremamente complesso fosse poi, a certe condizioni, realizzabile con un dispendio di energie contenuto e con un costo sociale, ambientale ed economico bassissimo. La ricerca aveva tra i suoi obiettivi quello di rendere più diffusa l'utilizzabilità di questa tecnologia che, se è decisamente ostica come fase progettuale è, alle volte, estremamente "amichevole" in fase di realizzazione.

Scrivono Pone nel 2012: «La gridshell è **portante**: le sue potenzialità si esaltano se viene utilizzata come elemento strutturale. La gridshell è **leggera**: con una griglia di circa 6 kg di peso a m² si possono coprire spazi di 100 m². La gridshell nasce nel binomio **progetto complesso/costruzione semplice**: il suo modulo oggetto sono quattro bacchette di legno sovrapposte e tenute insieme da un bullone, ma la sua forma e il suo comportamento strutturale sono necessariamente complessi da progettare. La gridshell tende a essere **auto-costruibile**: il progetto si carica di una maggiore complessità per semplificare al massimo l'azione costruttiva. La gridshell è eco-compatibile: il legno è il materiale strutturale **eco-compatibile** per definizione, in particolare se è usato con profili di piccola dimensione e se è assemblato a secco»¹²⁶. Che sia portante e leggera, alla fine di questa trattazione, ci pare ormai acclarato e che sia eco-compatibile forse oggi si può addirittura considerare una premessa comune a tutte le costruzioni in legno. Ci interessa, tra le parole del Pone, evidenziare come il binomio progetto complesso/costruzione semplice e il paradigma dell'auto-costruibilità siano legati e come il messaggio che contengono sia quanto mai attuale, senza per questo considerare non legittime le ricerche che si muovano al di fuori di questi assunti.

La ABTG quindi possono essere il prodotto di un progetto *high-tech* e di una costruzione *low-tech*. Andrea Campioli ha definito le culture del progetto che oggi (2010) sono in campo: «È possibile distinguere una cultura artigianale del progetto, nella quale il ruolo del progettista

¹²⁶ S. Pone, Gridshell. I gusci a graticcio in legno tra innovazione e sperimentazione, Alinea, Firenze 2012, p. 15.

coincide ancora oggi con quello del mastro costruttore che raccoglie in sé tutte le competenze per poter progettare e costruire; una cultura industriale del progetto, nella quale le diverse competenze, riferite spesso a figure professionali con diverse formazione, intervengono sequenzialmente risolvendo in modo separato e isolato problemi particolari; una cultura artigianale high tech, nella quale le diverse competenze sono chiamate a lavorare sul progetto con un atteggiamento di collaborazione; una cultura globalizzata del progetto, nella quale i problemi vengono definiti e le soluzioni delineate all'interno di una comunità tecnico-scientifica allargata, sia dal punto di vista del campo di azione di ogni singola disciplina, sia dal punto di vista del numero di competenze disciplinari interessate»¹²⁷.

Come per le tipologie strutturali del novecento, anche in questo caso la Gridshell pare sintetizzare diverse attitudini appartenenti a mondi che potrebbero sembrare tra loro irriducibili. La forte riduzione della distanza tra progettista ed esecutore dell'opera allude infatti a un classico caposaldo della cultura artigianale ma senza la concorrenza di saperi diversi, che Campioli attribuisce alla cultura industriale, non si potrebbe mai progettare e realizzare una struttura che, come abbiamo visto, richiede competenze tecnologiche, strutturali, geometriche e anche una buona formazione computazionale. E, infine, come si potrebbero far dialogare queste discipline se gli esperti si chiudessero nei loro steccati, senza una "cultura globalizzata del progetto".

Al contrario di quanto avviene per la progettazione e per il disegno, la fase costruttiva delle ABTG tendenzialmente si allinea con le prassi stabilite dai primi sperimentatori da Otto e Happold conservando il profilo *low-tech* derivato dall'iterazione del nodo strutturale, composto dalla semplice sovrapposizione di bacchette di legno forate e bullonate quindi "naturalmente auto-costruibile". Sul concetto di auto-costruzione è utile il pensiero di Eduardo Vittoria che scriveva: «Il problema tecnologico diventa quello del come altri potranno appropriarsi degli elementi-oggetto del costruire per modificare, senza distruggerlo, il contesto ambientale esistente... la tecnologia da strumento di distruzione ambientale in nome del profitto, si trasforma in possibilità di edificazione ambientale per una vita più umana e civile, il che significa ampliarne il concetto, approfondendone i legami con la biologia, l'antropologia, la sociologia e la stessa letteratura, in una visione dialettica dei

¹²⁷ A. Campioli, *Innovazione tecnologica e culture del progetto*, in M. Perriccioli (a cura di) *L'officina del pensiero tecnologico*, Alinea Editrice, Firenze 2010

due momenti, quello della conoscenza e quello della prassi, che concorrono al superamento della rozza separatezza tra lavoro intellettuale e sottomissione del lavoro manuale»¹²⁸.

La “rozza separatezza” va superata e l’esperienza dell’auto-costruzione è il ponte tra lavoro intellettuale e lavoro manuale. Un progettista bravo oltre a lavorare ossessivamente a migliorare le performances dei suoi progetti, può dedicare un po’ del suo tempo a rendere il progetto della fase costruttiva più semplice, può determinare un **travaso** di complessità dall’incertezza del cantiere all’ambiente protetto e sicuro del suo computer. Può inserire quote di lavoro eseguibili da operai poco specializzati, può impegnarsi a prefigurare un cantiere, almeno in parte, compatibile con l’auto-costruzione. La possibile futura stratificazione di queste prassi potrebbe lentamente contribuire a generare un’inversione della tendenza ad accentuare la rozza separatezza di cui scrive Vittoria.

Ma perché questo accada bisogna che i costruttori italiani, e più in generale quelli del vecchio continente, imparino un’altra lezione: Paul Preissner il progettista del Padiglione USA alla Biennale di Venezia del 2021 dedicato all’“American Framing” ha raccontato che i balloon/timber/platform-frame americani sono «un modo di costruire molto economico e accessibile a tutti, con cui bastano legno e chiodi e due persone per tirare su una casa. Questo lo rende anche egualitario: le case degli americani sono fatte tutte nello stesso modo, un asse di legno è un asse di legno. Inoltre è adattabile, è un sistema aperto che non ha una sua specifica estetica ma che può essere coniugato in modi diversi ... È più una questione di facilità e immediatezza, anche se si traduce in approssimazione, anzi c’è una volontà di accogliere l’approssimazione come principio intellettuale ... In Europa per costruire edifici ci vogliono competenze, esperti, grossi gruppi di lavoro, strumentazioni professionali eccetera. Questi invece sono edifici che si possono costruire dovunque anche senza esperienza, senza bisogno di istruzioni dettagliate, può farlo chiunque»¹²⁹. Nella frase **accogliere l’approssimazione come principio intellettuale** è il principale messaggio che il giovane professionista americano vuole lanciare alla Biennale di Venezia. Nell’american framing accogliere l’approssimazione non genera una perdita di prestazioni perché il sistema è talmente “solido”, condiviso, collettivamente legittimato che piccole variazioni, modeste

¹²⁸ E. Vittoria, *Introduzione*, in I. Amirante, R. La Creta, *Cupole per abitare*, Quaderni dell’Istituto di Tecnologia dell’Architettura dell’Università degli Studi di Napoli 1978, p. 5.

¹²⁹ M. Cardone, *Costruire con il legno*. Gli Stati Uniti alla Biennale di Architettura di Venezia, «Artribune 10», maggio 2021. Il testo contiene un’intervista al curatore/progettista Paul Preissner al quale vanno attribuite le frasi citate.

integrazioni, ma anche minimi errori non compromettono, anzi nemmeno intaccano, il risultato finale.

Le Active Bent Timber Gridshell, che con l'American Framing condividono il materiale legno e l'estrema semplicità delle giunzioni, hanno bisogno di progetti complessi e che fanno uso di sistemi sofisticati, uno dei quali è il principale oggetto di questa ricerca. Ma, una volta giunti sul cantiere, lì possono "accogliere l'approssimazione come principio intellettuale" possono tollerare, senza soffrirne, che "le cupole esterne siano **solo** 10 cm più basse di quelle rilevate dal modello di calcolo" (cfr §1.5), possono accettare che una lavorazione sia effettuata da un "non specializzato" magari anche con un qualche livello di imperizia. E quindi potrebbero, come abbiamo raccontato per l'esperienza di Montevideo, contare sulla partecipazione dei futuri utenti e delle comunità che poi le useranno e, quindi, mettere in moto quel meccanismo di appropriazione dell'opera realizzata che, quando raramente avviene, garantisce a chi la abiterà una facile "identificazione" con il manufatto e, quasi sempre, all'oggetto costruito una buona vita.

Bibliografia

1. Active bending structures

S. Adriaenssens, P. Block, D. Veenendaal, C. Williams, (Eds.), *Shell structures for architecture: Form finding and optimization*. Routledge, London (Uk) 2013

T. Barucki, *Stéphane du Château*, Salix Alba Press, Varsavia (Po) 2013

A. Campioli, M. Lavagna, *Tecniche e Architettura*, De Agostini Scuola, Novara 2013

J. Chilton, G. Tang, *Timber Gridshell. Architecture, structure and craft*, Routledge, London (Uk) 2017

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

R. Harris J. Roynon, *The Savill Garden Gridshell Design and Construction*, Paper presented at 10th World Conference of Timber Engineering, Miyazaki (Jp) 2008.

J. Henniecke, E. Schaur, *"IL" n. 10: Gitterschalen*, Universität Stuttgart, Institut für Leichte Flächentragwerke, Weitgespannte Flächentragwerke, Krämer, Stuttgart (De) 1974

F. Jensen, *The Downland grid shell*, in «The Structural Engineer», Vol. 79/n. 6, 20 March 2001

I. Liddell, *Frei Otto and the development of a gridshells*. In *Case Studies in structural Engineering*. Vol 4. Elsevier, Suffolk (Uk) 2015

Z. S. Makoski, *Strutture spaziali in acciaio*, tr. It Cisia, Milano 1963

F. Otto, B. Rasch, *Finding Form*, Edition Axel Menges, Stuttgart (De) 1995

G. Pizzetti, A. M. Zorgno Triscuoglio, *Principi statici e forme strutturali*, Utet, Torino 1980

S. Pone, *L'idea di struttura*, FrancoAngeli, Milano 2005

S. Pone, *Gridshell. I gusci a graticcio in legno tra innovazione e sperimentazione*, Alinea, Firenze 2012

E. Torroja, *La concezione strutturale*, Città Studi, Milano 1995

P. Nepoti, *Premessa a Le Ricolais*, in “Zodiac”, n. 22, 1973

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

E. Vittoria (1988). *Le tecnologie devianti dell'architettura*, in M. Fabbri, D. Pastore, *Fondazione Adriano Olivetti. Architetture per il terzo millennio*, Fondazione Adriano Olivetti, Roma 1988

2. Form-finding e progettazione

C. W. Alexander, *Notes on the Synthesis of Form*, Harvard University Press, Cambridge, Mass. (Usa) 1964

R. Banham, *Theory and Design of the First Machine Age*, Praeger, Westport, Connecticut (Usa) 1960

L. Bouhaya, *Optimisation structurelle des gridshells*, Ph.D. Thesis École doctorale science ingénierie et environnement, 2010

M. Burry, *Scripting Cultures: Architectural Design and Programming*, Wiley-Blackwell, Chichester (Uk) 2011

I. Caetano, L. Santos, A. Leita, *Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design*, Frontiers of Architectural Research, volume 9 issue2, 2020

M. Carpo, *The digital Turn in Architecture*, Wiley-Blackwell, Chichester (Uk) 2012

M. Carpo, *The second digital turn*, The MIT Press Ltd, (Usa) 2017

S. A. Coons, *An outline of the requirements for a computer-aided design system*. Proceedings of spring joint computer conference, Association for Computing Machinery, New York (Usa) 1963

L. Du Peloux, *Modeling of bending-torsion couplings in active-bending structures. Application to the design of elastic gridshells*, Université Paris Est, École des Ponts Paris Tech, 2017

D. Engelbart, *Au, Summary Report*, Stanford Research Institute, Menlo Park (Usa), 1962

E. Happold, W.I. Liddel, *Timber lattice roof for the Mannheim Bundesgartenschau*, in The Structural Engineer, March 1975, No. 3, Volume 53

R. Harris, J. Romer, O. Kelly, S. Johnson, *Design and Construction of the Downland Gridshell*, Building Research and Information, 31(6), 427-454, 2003

B. Kolarevic, *Designing and Manufacturing Architecture in the Digital Age*, University of Pennsylvania, (Usa) 2003

J. Lienhard, C. Gengnagel, *Recent developments in bending-active structures*. Conference: *Creativity in Structural Design*, annual Symposium of the IASS – International Association for Shell and Spatial Structures, Boston (Usa) 2018.

M. Meredith, AGU, M. Sasaki, P. ART, Designtoproduction, Aranda/Lash, *From control to design*, ACTAR, Barcellona, 2008

L. Moretti, *Ricerca matematica in architettura e urbanistica*, Moebius, IV, 1, 1970

G. Nardi, *Euristica e architettura*, in *Percorsi di un pensiero progettuale*, Maggioli Editore, Rimini 2010

N. Negroponte, *The Architecture Machine*, MIT press, Cambridge (Usa) 1968

N. Negroponte, *Soft Machine Architecture*, MIT press, Cambridge (Usa) 1975

G. Nocerino, *Computational Design per la Progettazione Tecnologica*, Tesi di Dottorato, Università Federico II, Napoli 2022

A. Sdegno, *Computer Aided Architecture: origini e sviluppo*, DisegnareCon volume 9, UNIVAQ, L'Aquila 2016

P. Schumacher, *Parametricism as style: parametricist manifesto*. In: The Darkside Club, 11th Architecture Biennale, Venezia, 11 September 2008.

I. Sutherland, *Sketchpad, a man-machine graphical communication system*, Phd Thesis, MIT, Cambridge (Usa) 1963

S. Viscuso, *La progettazione agile dell'architettura*, Lettera Ventidue, Siracusa, 2020

J. Wing, *Computational Thinking*. In Communication of ACM, 49, 2006

3. Sviluppo del tool

B. Addis, *Physical modelling and form finding*, in Aa.Vv. Shell Structures for Architecture, Routledge, Form Finding and Optimization, London (Uk) 2014

B. D'Amico, A. Kermani, H. Zhang, A. Pugnale, S. Colabella, S. Pone, *Timber gridshells: Numerical simulation, design and construction of a full scale structure*, "Structures" 3 2015

C. Douthe, *Étude de structures élancées précontraintes en matériaux composites: application à la conception des gridshells*, PhD thesis, École Nationale des Ponts et Chaussées, 2007

E. Ghys, *Sur la coupe des vêtements ^ variation autour d'un theme ` de Tchebychev*, « MathSciNet » n.1, 2, 2011

J. Leo van Hemmen, *Neuroscience from a mathematical perspective: key concepts, scales and scaling hypothesis, universality*, in "Biological Cybernetics" Vol 10, p.701-712, 2014

D. Lancia, D. Rando, S. Pone, Reciprocal Implications Between Design and Construction Process of Timber Gridshell: Innovative Techniques of Representation in Architectural Design, in F. Bianconi, M. Filippucci (a cura di), *Digital Wood Design Innovative Techniques of Representation in Architectural Design*, Springer International Publishing, New York (Usa) 2019

J. Lienhard, *Bending-Active Structures*, PhD thesis, Stuttgart 2014

P. L. Nervi *Costruire correttamente*, Hoepli, Milano 1955

E. Pignatelli, G. Mirra, S. Pone, InFormer: designing forming actions in post-formed gridshells by means of MOGAs, in A. Bögle, M. Grohmann (eds. by), *Interfaces: architecture, engineering, science*, IASS editions, Madrid (Es) 2017

S. Pone, G. Mirra, E. Pignatelli, D. Lancia, S. Colabella, *Specialised algorithms for different project stages in a postformed timber gridshell design*, in Structures and Architecture, CRC press, 2016

S. Pone, *Strumenti digitali e sperimentazione di costruzioni realizzate con l'active bending*, in "Techne" n. 13, 2017

S. Pone, G. Mirra, E. Pignatelli, D. Lancia, S. Colabella, *Specialised algorithms for different project stages in a post-formed timber gridshell design*, in P. Cruz (eds. by), *Structures and Architecture*, Taylor & Francis, London 2016

S. Pone, S. Colabella, B. D'Amico, D. Lancia, A. Fiore, B. Parenti, *Timber Post-formed Gridshell: Digital Form-finding, Drawing and Building Tool*, in J. B. Obrebski, R. Tarczewski (eds by), *Beyond the limits of man*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław (Po) 2013

E. Schling, D. Hitrec, R. Barthel, *Designing Grid Structures Using Asymptotic Curve Networks*, Proceedings of "Humanizing Digital Reality. Design Modelling Symposium", Paris (Fr) 2018

D. Veenendaal, P. Block, *Comparison of form-finding methods*, in Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization, Routledge, London (UK) 2014

Appendice

Codice C# di GFFT 3.0

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using Rhino.Geometry;
namespace GridshellTools
{
    class DynamicRelaxationSolver
    {
        FiniteElementModel model;
        DynamicRelaxationSolverProperties Props { get; }

        // Action afterLoop;

        internal DynamicRelaxationSolver(FiniteElementModel model,
        DynamicRelaxationSolverProperties props)
        {
            this.model = model;
            Props = props;
        }

        internal void LogicLoop()
        {
            double deltaTime = Props.DeltaTime;
            double steps = Props.IterationSteps;
            double viscousDampingC = Props.ViscousDampingConst;
            bool kineticDampingActive = Props.KineticDamping;

            Dictionary<FEMNode, (Vector3d, Point3d)> velPosUpdates;
            Dictionary<FEMNode, List<Vector3d>> forces;
```

```
for (int i = 0; i < steps; i++)
{
    velPosUpdates = new Dictionary<FEMNode, (Vector3d, Point3d)>();
    forces = new Dictionary<FEMNode, List<Vector3d>>();
    bool kineticEnergyPeakDetected = false;
    foreach (var kvPair in model.AdjacencysList)
    {
        var node = kvPair.Key;
        var edgeSet = kvPair.Value;
        forces[node] = new List<Vector3d>();
        // Apply load P
        forces[node].Add(model.Load.Force);
        // Compute axial force F
        forces[node].Add(CalculateAxialForces(node));
    }
    // Compute shear force S
    foreach (var element in model.Elements)
    {
        for (int j = 0; j < element.Length; j++)
        {
            var currNode = element.Nodes[j];
            var prevNode = element.Nodes[(j - 1 + element.Length) %
element.Length];
            var nextNode = element.Nodes[(j + 1) % element.Length];
            if ((j == 0 && element.IsClosed) || j != 0)
            {
                if ((j == element.Length - 1 && element.IsClosed) || j !=
element.Length - 1)
                {
                    var shearForces = CalculateShearForces(prevNode, currNode,
nextNode, element);
                    forces[prevNode].Add(shearForces[0]);
                    forces[currNode].Add(shearForces[1]);
                    forces[nextNode].Add(shearForces[2]);
```

```

        }
    }
}
foreach (var kvPair in forces)
{
    var node = kvPair.Key;
    // Calculate Residual Force R
    Vector3d residualForce = Vector3d.Zero;
    foreach (var force in kvPair.Value) residualForce += force;
    // Compute velocity
    double C = viscousDampingC;
    double A = (1 - C / 2) / (1 + C / 2);
    double B = (1 + A) / 2;
    Vector3d nextVelocity = A * node.Vel + B * (deltaTime / node.Mass) *
residualForce;
    // Apply constraints (static and dynamic)
    nextVelocity = node.ApplyConstraints(nextVelocity);
    // Update geometry position
    Point3d nextPosition = node.Pos + deltaTime * nextVelocity;
    // Check if there has been an energy peak
    if (kineticDampingActive && nextVelocity.SquareLength <
node.Vel.SquareLength) kineticEnergyPeakDetected = true;
    velPosUpdates[node] = (nextVelocity, nextPosition);
    // node.SetPos(kineticEnergyPeakDetected ? node.Pos : nextPosition);
    // node.SetVel(kineticEnergyPeakDetected ? Vector3d.Zero :
nextVelocity);
}
foreach (var kvPair in velPosUpdates)
{
    var node = kvPair.Key;
    node.SetPos(kineticEnergyPeakDetected ? node.Pos :
kvPair.Value.Item2);

```

```
node.SetVel(kineticEnergyPeakDetected ? Vector3d.Zero :  
kvPair.Value.Item1);  
    }  
    }  
}
```

```
private Vector3d CalculateAxialForces(FEMNode node)  
{  
    var neighbors = model.AdjacencyList[node];  
    Vector3d neighborsContribution = Vector3d.Zero;  
    foreach (var neighbor in neighbors)  
    {  
        var edge = neighbor.Edge;  
        var neighNode = neighbor.Node;  
        var currLength = (neighNode.Pos - node.Pos).Length;  
        var tension = edge.Stiffness * (currLength - edge.InitialLength);  
        var contribution = (tension / currLength) * (neighNode.Pos - node.Pos);  
        neighborsContribution += contribution;  
    }  
    return neighborsContribution;  
}
```

```
private Vector3d[] CalculateShearForces(FEMNode nodeI, FEMNode nodeJ,  
FEMNode nodeK, FEMElement element)  
{  
    if (nodeI == null || nodeJ == null || nodeK == null) return null;  
    Vector3d[] forces = new Vector3d[3];  
    var ji = nodeI.Pos - nodeJ.Pos;  
    var jk = nodeK.Pos - nodeJ.Pos;  
    var ki = nodeI.Pos - nodeK.Pos;  
    var alpha = Math.PI - Vector3d.VectorAngle(ji, jk);  
    var sinAlpha = Math.Sin(alpha);  
    var radius = ((nodeI.Pos - nodeK.Pos).Length) / (2 * sinAlpha);  
    var moment = (element.Material.Young * element.I_x) / radius;
```



```
        var s_a = (2 * element.Material.Young * element.l_x * sinAlpha) / (ji.Length *
ki.Length);
        var s_b = (2 * element.Material.Young * element.l_x * sinAlpha) / (jk.Length *
ki.Length);
        Vector3d normal = Vector3d.CrossProduct(ji, jk);
        normal.Unitize();
        Vector3d iPerp = Vector3d.CrossProduct(ji, normal);
        iPerp.Unitize();
        Vector3d kPerp = Vector3d.CrossProduct(normal, jk);
        kPerp.Unitize();
        forces[0] = iPerp * s_a;
        forces[1] = (- iPerp * s_a) + (- kPerp * s_b);
        forces[2] = kPerp * s_b;
        return forces;
    }

private Vector3d CalculateResidualForce(FEMNode node, Vector3d extForce)
{
    var neighbors = model.AdjacencyList[node];
    Vector3d neighborsContribution = Vector3d.Zero;
    foreach (var neighbor in neighbors)
    {
        var edge = neighbor.Edge;
        var neighNode = neighbor.Node;
        var currLength = (neighNode.Pos - node.Pos).Length;
        var tension = edge.Stiffness * (currLength - edge.InitialLength);
        var contribution = (tension / currLength) * (neighNode.Pos - node.Pos);
        neighborsContribution += contribution;
    }
    Vector3d residualForce = extForce + neighborsContribution;
    return residualForce;
}
}
```

Codice C# GridMaker 3.0

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using Rhino.Geometry;
using Rhino.Geometry.Collections;
using Rhino.Geometry.Intersect;

namespace GridshellTools
{
    class ChebyshevNet
    {
        internal double gridSpan;
        Brep srf;

        internal Dictionary<(int, int), ChebyshevNode> nodes;
        /// <summary>
        /// Contains the nodes where we will iterate if they can be completed
        /// </summary>
        // Dictionary<(int, int), ChebyshevNode> nodes;
        Queue<ChebyshevNode> queueNodes;

        Dictionary<int, List<ChebyshevNode>> rows;
        internal Dictionary<int, List<ChebyshevNode>> Rows { get => rows; }

        Dictionary<int, List<ChebyshevNode>> columns;
        internal Dictionary<int, List<ChebyshevNode>> Columns { get => columns; }

        // Planar Rows and Columns
    }
}
```

```
Dictionary<int, List<ChebyshevNode>> planarRows;
internal Dictionary<int, List<ChebyshevNode>> PlanarRows { get => planarRows;
}

Dictionary<int, List<ChebyshevNode>> planarColumns;
internal Dictionary<int, List<ChebyshevNode>> PlanarColumns { get =>
planarColumns; }

Vector3d uDirection;
internal Vector3d UDirection { get => uDirection; }

public ChebyshevNet(List<Point> uPts, List<Point> vPts, List<Point> uNpts,
List<Point> vNpts, double gridSpan, Brep srf)
{
    this.gridSpan = gridSpan;
    this.srf = srf;
    nodes = new Dictionary<(int, int), ChebyshevNode>();
    queueNodes = new Queue<ChebyshevNode>();
    this.rows = new Dictionary<int, List<ChebyshevNode>>();
    this.columns = new Dictionary<int, List<ChebyshevNode>>();
    this.planarRows = new Dictionary<int, List<ChebyshevNode>>();
    this.planarColumns = new Dictionary<int, List<ChebyshevNode>>();

    // Add positive base points
    for (int i = 0; i < uPts.Count; i++)
    {
        (int, int) coords = (i, 0);
        nodes.Add(coords, new ChebyshevNode(this, coords, uPts[i].Location));
    }
    for (int i = 1; i < vPts.Count; i++)
    {
        (int, int) coords = (0, i);
        nodes.Add(coords, new ChebyshevNode(this, coords, vPts[i].Location));
    }
}
```

```
// Add negative base points
// U Negative
for (int i = 1; i < uNpts.Count; i++)
{
    (int, int) coords = (-i, 0);
    nodes.Add(coords, new ChebyshevNode(this, coords, uNpts[i].Location));
}
// V Negative
for (int i = 1; i < vNpts.Count; i++)
{
    (int, int) coords = (0, -i);
    nodes.Add(coords, new ChebyshevNode(this, coords, vNpts[i].Location));
}
}

internal bool QueueGhostNodes()
{
    Dictionary<(int, int), ChebyshevNode> tempNodes = new Dictionary<(int, int),
    ChebyshevNode>();

    foreach (var n in nodes)
    {
        if (n.Value.IsGhost || n.Value.IsOutOfSurface) continue;

        (int, int)[] nCoords = n.Value.NeighboursCoords;
        for (int i = 0; i < nCoords.Length; i++)
        {
            ChebyshevNode neighbour;
            if(!nodes.TryGetValue(nCoords[i], out neighbour))
            {
                if (!tempNodes.TryGetValue(nCoords[i], out neighbour))
                {
                    // If this ghost nodes doesn't exists, create it
                }
            }
        }
    }
}
```

```
ChebyshevNode newNode = new ChebyshevNode(this, nCoords[i]);

// Add neighbours to either of the nodes
newNode.AddNeighbour(n.Key, n.Value);
n.Value.AddNeighbour(nCoords[i], newNode);

tempNodes.Add(nCoords[i], newNode);
// nodes.Add(nCoords[i], new ChebyshevNode(this, nCoords[i]));
// nodes[nCoords[i]].AddNeighbour(n.Key, n.Value);
}
else
{
    // If it already exists, add n as a neighbour
    neighbour.AddNeighbour(n.Key, n.Value);
    n.Value.AddNeighbour(nCoords[i], neighbour);

    // If neighbour has two diagonal neighbours, exit from Ghost e go
into Queue
    if (neighbour.HasDiagonalNeighbours)
    {
        queueNodes.Enqueue(neighbour);
    }
} else
{
    // If it already exists, add n as a neighbour
    neighbour.AddNeighbour(n.Key, n.Value);
    n.Value.AddNeighbour(nCoords[i], neighbour);

    // If neighbour has two diagonal neighbours, exit from Ghost e go into
Queue
    if (neighbour.HasDiagonalNeighbours && neighbour.IsGhost)
    {
        queueNodes.Enqueue(neighbour);
    }
}
```

```
        }
    }
}

foreach(var n in tempNodes)
{
    nodes.Add(n.Key, n.Value);
}

return queueNodes.Any();
}

internal void CreateQueuedNodes()
{
    while(queueNodes.Any())
    {
        ChebyshevNode n = queueNodes.Dequeue();

        n.CreateGeometricNode(gridSpan, srf);
    }
}

internal bool TryExtendBorderNode()
{
    foreach (var n in this.nodes)
    {
        ChebyshevNode node = n.Value;
        // if (node.Neighbours.Length > 3 && !(node.nodeState ==
ChebyshevNode.NodeState.Real)) continue;
        // Now we know node is real and has less than 3 neighbours

        if (!node.IsGhost) continue;
```



```
// All ghost nodes in the dictionary are nodes that have only one neighbour
(or two opposite neighbours, very unlikely and edge case)
List<ChebyshevNode> neighbours = new List<ChebyshevNode>();
for (int i = 0; i < node.Neighbours.Length; i++)
{
    if (node.Neighbours[i] != null) neighbours.Add(node.Neighbours[i]);
}

// Get necessary points
// Calculate circle
// Get intersections
// Exclude old point
ChebyshevNode originNode = neighbours[0];
int ud = originNode.Coords.Item1 - node.Coords.Item1;
int vd = originNode.Coords.Item2 - node.Coords.Item2;
(int, int) directionPtCoord = (originNode.Coords.Item1 + ud,
originNode.Coords.Item2 + vd);
Point3d directionPt = nodes[directionPtCoord].location;
Point nextPt = GeodesicInitialValue.NextGeodesicPoint(srf,
neighbours[0].location, directionPt);

if (nextPt == null)
{
    node.nodeState = ChebyshevNode.NodeState.OutOfSurface;
    continue;
}

node.location = nextPt.Location;
node.nodeState = ChebyshevNode.NodeState.Real;

return true;
}
return false;
}
```

```
internal void CreateSurfaceEdgeNodes()
{
    foreach (var n in this.nodes)
    {
        ChebyshevNode node = n.Value;

        if (!node.IsReal) continue;

        List<ChebyshevNode> oosNodes = node.OutOfSurfaceNeighbours;

        foreach (ChebyshevNode oosN in oosNodes)
        {
            (int, int) pt2Coords = node.GetMirrorNodeCoords(oosN.Coords);
            ChebyshevNode pt2Node = this.nodes[pt2Coords];
            if (pt2Node == null) continue;

            double u, v;
            // srf.ClosestPoint(node.location, out u, out v);
            Vector3d normal;
            srf.ClosestPoint(node.location, out _, out _, out u, out v, 10d, out normal);
            Vector3d y = pt2Node.location - node.location;
            Plane plane = new Plane(node.location, normal, y);

            // Brep brep = srf.ToBrep();
            // BrepEdgeList edges = brep.Edges;
            BrepEdgeList edges = srf.Edges;

            List<Point3d> pts = new List<Point3d>();
            for (int i = 0; i < edges.Count; i++)
            {
```

```
CurveIntersections ci = Intersection.CurvePlane(edges[i].EdgeCurve,
plane, 0.001d);
if (ci!= null)
    foreach(IntersectionEvent intersection in ci)
    {
        if (!intersection.IsPoint) continue;
        pts.Add(intersection.PointA);
    }
}

// Select the closest by UV
Point3d closestIntersection = pts[0];
double ui, vi;

srf.ClosestPoint(pts[0], out _, out _, out ui, out vi, 10d, out _);
// double minUVDist = (new Point2d(u, v) - new Point2d(ui,vi)).Length;
double minUVDist = (node.location - closestIntersection).SquareLength;
for (int i = 1; i < pts.Count; i++)
{

    srf.ClosestPoint(pts[i], out _, out _, out ui, out vi, 10d, out _);
    // double uvDist = (new Point2d(u, v) - new Point2d(ui, vi)).Length;
    double uvDist = (node.location - pts[i]).SquareLength;
    if (uvDist < minUVDist)
    {
        minUVDist = uvDist;
        closestIntersection = pts[i];
    }
}

ChebyshevNode newEdgeNode = new ChebyshevNode(this,
(oosN.Coords), closestIntersection);
// node.AddExtensionNodeOld(newEdgeNode);
node.AddExtensionNode(newEdgeNode);
```

```
    }  
  }  
}  
  
internal void CalculateRowsAndColumns()  
{  
  foreach (var n in nodes)  
  {  
    ChebyshevNode node = n.Value;  
    if (!node.IsReal) continue;  
    // Add to rows  
    List<ChebyshevNode> row;  
    if (rows.TryGetValue(node.V, out row))  
    {  
      row.Add(node);  
    } else  
    {  
      rows.Add(node.V, new List<ChebyshevNode>());  
      rows[node.V].Add(node);  
    }  
    // Add to columns  
    List<ChebyshevNode> column;  
    if (columns.TryGetValue(node.U, out column))  
    {  
      column.Add(node);  
    }  
    else  
    {  
      columns.Add(node.U, new List<ChebyshevNode>());  
      columns[node.U].Add(node);  
    }  
  }  
  
  // Sort nodes of each row and column
```

```
        foreach (var r in rows)
        {
            List<ChebyshevNode> row = r.Value;
            ChebyshevNodeComparer uComparer = new
ChebyshevNodeComparer(true);
            row.Sort(uComparer);
        }
        foreach (var c in columns)
        {
            List<ChebyshevNode> column = c.Value;
            ChebyshevNodeComparer vComparer = new
ChebyshevNodeComparer(false);
            column.Sort(vComparer);
        }

// Planar rows and columns

// Calculate planar grid origin
Point3d origin = nodes[(0, 0)].location;
origin = origin - Vector3d.ZAxis * origin.Z;
// Calculate U and V directions for planar grid
Vector3d uDir = nodes[(1, 0)].location - nodes[(0, 0)].location;
uDir = new Vector3d(uDir.X, uDir.Y, 0);
uDir.Unitize();
// Vector3d vDir = Vector3d.CrossProduct(uDir, Vector3d.ZAxis);
Vector3d vDir = Vector3d.CrossProduct(Vector3d.ZAxis, uDir);

// Rows
foreach (var r in rows)
{
    planarRows.Add(r.Key, new List<ChebyshevNode>());
    foreach (var node in r.Value)
    {
```

```
        // planarRows[r.Key].Add(new Point3d(node.Coords.Item1 * gridSpan,
node.Coords.Item2 * gridSpan, 0d));
        node.SetPlanarLocation(GetPlanarizedNodePosition(node, origin, uDir,
vDir));
        PlanarRows[r.Key].Add(node);
    }
}
// Columns
foreach (var c in columns)
{
    planarColumns.Add(c.Key, new List<ChebyshevNode>());
    foreach (var node in c.Value)
    {
        // planarColumns[c.Key].Add(new Point3d(node.Coords.Item1 *
gridSpan, node.Coords.Item2 * gridSpan, 0d));
        node.SetPlanarLocation(GetPlanarizedNodePosition(node, origin, uDir,
vDir));
        PlanarColumns[c.Key].Add(node);
    }
}

// Add surface edge nodes
foreach (var r in rows)
{
    List<ChebyshevNode> row = r.Value;
    ChebyshevNode first, last;
    first = row[0].EdgeExtensions[0];
    last = row[row.Count - 1].EdgeExtensions[0];

    // Insert in surface grid
    row.Insert(0, first);
    row.Insert(row.Count, last);

    // Insert in planar grid
```

```

        InsertPlanarizedEdgeNodes(row[1], row[row.Count - 2], planarRows[r.Key],
Axis.U, origin, uDir);
    }
    foreach (var c in columns)
    {
        List<ChebyshevNode> column = c.Value;
        ChebyshevNode first, last;
        first = column[0].EdgeExtensions[1];
        last = column[column.Count - 1].EdgeExtensions[1];

        // Insert in surface grid
        column.Insert(0, first);
        column.Insert(column.Count, last);

        // Insert in planar grid
        InsertPlanarizedEdgeNodes(column[1], column[column.Count - 2],
planarColumns[c.Key], Axis.V, origin, vDir);
    }
}

internal Point3d GetPlanarizedNodePosition(ChebyshevNode node)
{
    return new Point3d(node.Coords.Item1 * gridSpan, node.Coords.Item2 *
gridSpan, 0d);
}

internal Point3d GetPlanarizedNodePosition(ChebyshevNode node, Point3d
origin, Vector3d uDir, Vector3d vDir)
{
    Point3d basePos = new Point3d(node.Coords.Item1 * gridSpan,
node.Coords.Item2 * gridSpan, 0d);
    return origin + uDir * basePos.X + vDir * basePos.Y;
}

static internal List<Point3d> GetNodeLocationList(List<ChebyshevNode> nodes)

```



```
{
    List<Point3d> posList = new List<Point3d>();
    foreach (var node in nodes) posList.Add(node.location);
    return posList;
}

static internal List<Point3d> GetNodePlanarLocationList(List<ChebyshevNode>
nodes)
{
    List<Point3d> posList = new List<Point3d>();
    foreach (var node in nodes) posList.Add(node.PlanarLocation);
    return posList;
}

private enum Axis { U = 0, V = 1 }

private void InsertPlanarizedEdgeNodes(ChebyshevNode first, ChebyshevNode
last, List<ChebyshevNode> planarRow, Axis axis, Point3d origin, Vector3d direction)
{
    int i = (int)axis;
    Vector3d d;

    ChebyshevNode firstExtension = first.EdgeExtensions[i];
    d = direction * (firstExtension.location - first.location).Length;
    firstExtension.SetPlanarLocation(first.PlanarLocation - d);
    planarRow.Insert(0, firstExtension);

    ChebyshevNode lastExtension = last.EdgeExtensions[i];
    d = direction * (lastExtension.location - last.location).Length;
    lastExtension.SetPlanarLocation(last.PlanarLocation + d);
    planarRow.Insert(planarRow.Count, lastExtension);
}
}
}
```