

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Architettura Costruzione Città

Tesi di Laurea Magistrale

Progettazione strutturale parametrica di strutture a volta:
il caso studio della moschea di Dakar – Senegal



Relatore:

Prof. A. Manuello Bertetto

Candidata:

Roberta Rivoli

Corelatori

Ing. J. Melchiorre

Arch. Fabrizio Fragomeli

Anno Accademico 2022/2023

Premessa

Negli ultimi anni, lo sviluppo sempre maggiore di nuove tecniche di progettazione assistita da computer, come la modellazione parametrica, ha facilitato il disegno di superfici 3D a forma libera nelle strutture rendendo le architetture sempre più accattivanti, creative e raffinate superando i vincoli e i limiti geometrici. La progettazione di nuove forme strutturali complesse combinata con l'utilizzo di nuovi strumenti di calcolo permettono la costruzione delle strutture garantendo delle prestazioni ottimali di progetto con costi e tempi ridotti. È di fondamentale importanza, infatti, la collaborazione costante tra le due cose, mettendo in seguito davanti al progettista diverse soluzioni orientate alla ricerca di un comportamento ottimizzato delle strutture sotto diversi punti di vista. In altre parole si possono mettere a confronto diverse soluzioni individuando la configurazione progettuale ottimale che, soggetta a vincoli, soddisfi i requisiti fornendo le migliori prestazioni.

Il caso studio di cui si occupa questa tesi è la copertura a doppia curvatura di una moschea progettata per la città di Dakar in Senegal dallo studio "Fragomeli+Partners" in collaborazione con la "Wafai Architecture". L'obiettivo sarà quello di addentrarsi nel campo della progettazione parametrica per la modellazione della copertura impostando un algoritmo composto da parametri messi in relazione tra di loro e che possono essere variati in maniera precisa e veloce. Successivamente alla progettazione parametrica la copertura a gridshell in acciaio sarà modellata utilizzando metodologie di form-finding e di Multi-Body Rope Approach in quanto sfruttano la forma stessa della struttura per la ricerca della più efficiente.

Nei primi capitoli sono analizzate diverse moschee, dalle più antiche (a partire da quella che viene definita la prima moschea costruita) alle più moderne, studiando quelli che sono gli elementi architettonici caratteristici che le compongono, quali sono le diverse tipologie di moschee e come variano in relazione ai luoghi in cui sono costruite. Sono identità complesse che permettono l'interazione e la coesistenza di diverse culture, tradizioni, arti e architetture internazionali e locali.

Successivamente saranno analizzate le architetture più importanti e gli architetti che maggiormente hanno contribuito allo sviluppo delle seguenti tipologie di strutture: le concreteshells, le brickshells e le gridshells.

Il fulcro della tesi è il quarto capitolo in cui ci si avvale dell'utilizzo di Grasshopper, plug-in di Rhino, uno degli strumenti di modellazione algoritmica più avanzati per la progettazione parametrica della copertura. Successivamente la copertura sarà modellata anche con metodo di form-finding (utilizzando il

plug-in di Grasshopper Kangaroo) e con il Multi-Body Rope Approach (studio innovativo sul form-finding per le gridshell) ottenendo come risultato finale tre geometrie simili tra di loro. Infine sarà eseguita l'analisi strutturale mediante il plug-in di Grasshopper Karamba3D di tutte e tre le geometrie precedentemente modellate le quali saranno soggette a dei carichi permanenti strutturali e non e a carichi variabili che saranno calcolati e affrontati nel dettaglio.

Indice

Introduzione	5
1. Storia e architettura delle moschee	6
1.1 Tipologia di moschee	6
1.2 Evoluzione delle moschee	11
1.3 Caso studio: la nuova moschea di Dakar	16
2. La forma	20
2.1 Dal sistema trilitico alle volte	22
2.2 Strutture a guscio	24
3. Multi-materiale	27
3.1 Concreteshell	27
3.2 Brickshell	31
3.3 Gridshell	34
3.3.1 Gridshell in legno	35
3.3.2 Gridshell in acciaio	37
3.3.3 Gridshell in tubi in cartone	38
3.3.4 Gridshell in bamboo	39
3.3.5 GFRP Glass Fiber Reinforced Polymer	40
3.4 Terra cruda in Africa	41
4. Modellazione della copertura della moschea	43
4.1 Progettazione parametrica	43
4.1.1 Grasshopper – Progettazione Parametrica della copertura della moschea	48
4.2 Form-finding	52
4.2.1 Kangaroo2	55
4.2.2 Kangaroo2 – Form Finding della copertura	57
4.3 Multi-Body Rope Approach	60
4.3.1 MRA per la copertura.	64
4.4 Ottimizzazione strutturale	66
5. Karamba3D	70
5.1 Analisi strutturale della copertura della moschea	73
5.1.1 Analisi strutturale della copertura della copertura parametrica	77
5.1.2 Analisi strutturale della copertura della copertura	

	In form-finding con Kangaroo	80
5.1.2	Analisi strutturale della copertura della copertura	
	In form-finding con MRA	83
	Conclusione	86
	Bibliografia e sitografia	88
	Bibliografia e sitografia delle figure	91

Introduzione

Architettura e struttura, due elementi imprescindibili, legati ed in continuo dialogo, che sono cambiati e si sono evoluti assieme alla società in cui si sviluppavano, possono essere definiti i soggetti della tesi. Partendo da un rapporto che vedeva la struttura definire l'architettura e quindi la forma, si arriva, nelle architetture contemporanee, ad una forma che definisce la struttura. Questo è stato reso possibile grazie all'evoluzione dei materiali da costruzione e all'evoluzione della conoscenza che si ha di essi costruendo un rapporto struttura-materiale in grado di permettere la costruzione di edifici con forme sempre più innovative e libere consentendone la maggiore espressione possibile. La struttura che prima veniva vista come un limite si è trasformata in una nuova possibilità di espressione grazie ad un uso dei materiali sempre più consapevole.

Il rapporto forma-struttura sarà ampiamente affrontato nel corso della tesi, la quale si occupa della modellazione della copertura di una moschea progettata per la città di Dakar. Una copertura che presenta un flesso, la cui forma ricorda quella di una duna in quanto ha l'obiettivo di integrarsi il più possibile con l'ambiente circostante. È inoltre una copertura di grandezza 63m x 56m a luce libera, non presenta pilastri intermedi ma poggia solo lungo il bordo della struttura stessa. Per questo motivo sarà realizzata in acciaio, sfruttando al massimo le sue proprietà di grande deformabilità e durezza, buona resistenza alla rottura a trazione e allo snervamento.

Saranno messi a confronto tre metodi di modellazione (utilizzando tecniche parametriche) diversi per la copertura i quali saranno affrontati e studiati nel dettaglio.

La tesi inizia con una visione generale sulla storia e sull'architettura delle moschee, architetture che nascondono un'identità complessa, che si sono modificate in seguito all'interazione tra le diverse culture e i diversi popoli nel tempo fino ad oggi, rendendo possibile la loro coesistenza.

1. Storia e architettura delle moschee

Allargando gli orizzonti visivi della nostra cultura, poniamo uno sguardo su quella che è l'arte, l'architettura islamica e la cultura araba, soffermandoci sulla storia e sull'architettura delle moschee, da quelle più antiche alle contemporanee essendo luogo simbolo di quest'arte e di quest'architettura.

Per iniziare a comprendere l'arte islamica è necessario comprendere gli aspetti principali della religione e le loro tradizioni: l'islam è una religione monoteista, la seconda religione al mondo per consistenza numerica dopo il cristianesimo e con un tasso di crescita molto significativo. Conta infatti circa 1,8 miliardi di fedeli presenti in maggioranza in Indonesia, in Asia meridionale, in Vicino Oriente e Medio Oriente, e in Africa subsahariana e minoranze comunque considerevoli sono in Europa, Cina, Russia e America.

Nella religione musulmana, Maometto è considerato l'ultimo dei profeti portatore del messaggio di Dio (Allah). Maometto, nato in Arabia nella città della Mecca, riceve la prima rivelazione da Allah nel 570 d.C. e trascrive per anni le sue parole nel libro del Corano. Quando inizia a divulgare ciò, viene perseguitato e si rifugia nella città di Medina nell'anno 622; quest'anno corrisponde all'anno zero del calendario musulmano.

L'arte islamica è un'arte aniconica prettamente religiosa basata sulle decorazioni di tipo geometrico o vegetale, molto colorate e rigogliose, e non sulla rappresentazione di figure umane così come accade nell'arte cristiana che è, al contrario, un'arte figurativa. È infatti vietato negli spazi sacri delle moschee, rappresentare figure umane che possano portare all'adorazione di oggetti o immagini al posto delle divinità.

1.1 Tipologie di moschee

Le moschee, luogo di preghiera, sono la maggior rappresentazione dell'arte islamica. Il primo modello di moschea sorge in Arabia; la storia narra che quando il profeta arrivò a Medina iniziò a costruirla come centro per la sua attività religiosa. Venne costruita in un recinto di mattoni d'argilla di forma quadrangolare, con una zona a sud coperta da un tetto di foglie, ramoscelli e travi di tronchi di palma. Ovviamente oggi non rimane alcuna traccia di essa. Questa moschea nasce come edificio semplice, privo di oggetti di culto, con uno spazio per pregare ed una corte aperta.

In seguito, con l'avvento dei numerosi califfati le moschee iniziano ad arricchirsi di nuovi elementi. La parola moschea deriva dalla parola araba masjid che

significa “luogo dove ci si prostra”; i fedeli pregano in ginocchio (su di un pavimento ricoperto di tappeti in direzione della Mecca il cui orientamento esatto viene segnalato da una nicchia decorata chiamata mihrab posta su di una parete chiamata qibla. Un altro spazio importante in una moschea oltre alla sala della preghiera è il cortile con fontane per le abluzioni, dei lavaggi per la purificazione di alcune parti del corpo prima della preghiera. Ultimo elemento caratteristico di una moschea è il minareto, una torre alta e snella a base quadrata (molto usata in nord Africa) o circolare (molto usata in Turchia) coperta da una piccola cupola di diverse forme e materiali (in base ai materiali locali disponibili), che ha lo scopo di richiamare i fedeli nelle ore di preghiera tramite un particolare canto.

Ancora, dal punto di vista architettonico, possiamo individuare 3 elementi tipicamente presenti in una moschea, ovvero la colonna, l'arco e la cupola, che insieme rappresentano quella che viene chiamata la sacra triade dell'architettura islamica. La cupola è un elemento simbolico molto forte in quanto va a coprire la sala della preghiera principale, è rappresentazione simbolica della volta celeste e convergendo verso un unico punto in alto simboleggia l'anelito del fedele verso l'unità divina.

Tra le più antiche e tradizionali individuiamo tre tipi di moschea:

- moschea a sala ipostila di tipo arabo;
- moschea con nicchie di tipo persiano;
- moschea con cupola di tipo ottomano.

La moschea a sala ipostila è chiamata così per le centinaia di colonne in fila trasversale che suddividono la sala della preghiera e rappresenta la più antica tipologia di costruzione. Di questa tipologia fa parte una delle più importanti architetture islamiche, ovvero la Moschea di Cordova costruita nel 785, trasformata in cattedrale e diventata patrimonio mondiale UNESCO nel 1984. La moschea è stata oggetto di molti ampliamenti nel corso dei secoli a causa della crescente popolazione. Il progetto originale vedeva uno schema di archi sovrapposti a dividere uno spazio separato da undici navate laterali al muro della qibla. Il progetto prevedeva anche il riutilizzo di alcuni componenti romani e visigoti ereditati dal passato; il pavimento originale era formato da terra compressa sovrastata da uno strato di malta molto spesso e le pareti erano costruite con conci di pietra calcarea.

Con le varie espansioni nel tempo furono costruiti il minareto di Al-Andalus, otto nuove navate, furono ampliati il cortile delle abluzioni e la sala della preghiera, finché non divenne più possibile continuare ad espandersi verso sud a causa della vicinanza con il fiume. L'espansione della moschea continuò

verso est con la costruzione di un nuovo padiglione per le abluzioni espandendo il cortile.

Ad oggi la moschea risulta espandersi lungo un perimetro di 180m x 130m, presenta delle mura esterne imponenti tanto da farla sembrare fortificata; quella che era la principale sala di preghiera della moschea è oggi divisa con 850 colonne che compongono le 19 navate formate da archi a doppio livello su cui poggia la struttura in legno del soffitto.



Figura1_moschea di
Cordova, sala
ipostila

Il secondo tipo di moschea, quella con le nicchie di tipo persiano, nasce tra l'XI e il XII secolo. Si compone di un cortile circondato da grandi nicchie decorate.

Tra le moschee Patrimonio dell'Unesco tra le più belle al mondo, la Moschea dello Scià costruita a partire dal 1611 viene considerata uno dei più grandi capolavori dell'architettura persiana. Per la costruzione di questo edificio si introdusse per la prima volta in Iran una decorazione con complessi mosaici con piastrelle già dipinte da assemblare secondo un modello prestabilito.

La porta della moschea è alta 27 metri, sono presenti 4 iwan (spazio solitamente voltato e murato su tre lati) che circondano la moschea e quattro minareti alti 42 metri (due sui lati dell' iwan presente all'ingresso e due sui lati dell' iwan più grande). L' iwan più grande e più bello è alto 33 metri ed è rivolto verso la qibla; dietro di esso c'è la sala della preghiera coperta da una cupola a doppio strato alta 55 metri.



Figura2_moschea
dello Scià, veduta
dei quattro iwan

Un esempio di moschea che vede l'incontro tra l'architettura persiana e quella araba dovuto alla ricostruzione di una parte di essa la ritroviamo in Iran ed è la Moschea di Tarik Khane a Damghan, si pensa costruita tra il 750 e il 790. Presenta un cortile quadrato di 25m su cui affacciano sale delimitate da spessi pilastri rotondi aventi un diametro di circa 1,6m e da muri spessi 1,5m. Tutto il complesso è stato costruito in mattoni rivestiti con intonaco di terra per attribuire lo stesso colore a tutta la superficie e al terreno. È evidente la mancanza di ornamenti su pilastri e pareti, ma inizialmente non venivano utilizzati di consueto. Sono evidenti i resti di un minareto quadrato senza ornamenti vicino al cortile sostituito molto tempo dopo, nel 1026, da un nuovo minareto rotondo molto diverso da quello che c'era prima. L'architetto infatti lo progettò con numerose decorazioni e motivi geometrici, posizionando i mattoni in vari modi e rendendo così ancora più evidente il contrasto tra la nuova struttura e il resto della moschea. Questo tipo di decorazione deriva da quella che è la tradizionale arte persiana. La moschea infatti ha una configurazione formale di tipo arabo ma per quanto riguarda le decorazioni e gli ornamenti presenti, questi sono certamente dovuti ad una configurazione di tipo persiana.

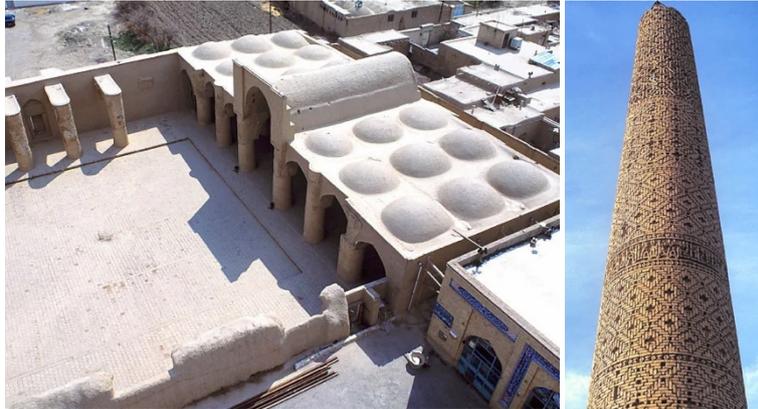


Figura3_moschea di
Tarik Khane

Figura4_minareto,
ricostruzione

Infine si analizza l'ultima tipologia di moschea tra quelle precedentemente citate, ovvero la moschea con cupola di tipo ottomano. Ritroviamo uno dei primi esempi ad Istanbul, in Turchia ed è la Moschea del Solimano costruita tra il 1550 e il 1557, caratterizzata da una grande cupola centrale che sovrasta la sala della preghiera, il cui peso viene scaricato lungo tutto il perimetro su cupole e semicupole più piccole. Il cortile esterno è tendenzialmente circondato da sottili minareti.

L'edificio si compone di un cortile interno delimitato da delle grandi arcate che fungono da porticato di ingresso all'edificio principale la cui copertura è formata dalla grande cupola sorretta da quattro pilastri centrali annessi alle mura e circondata da semicupole.



Figura5_moschea
del Solimano

1.2 Evoluzione delle moschee

Al susseguirsi delle precedenti moschee relazionate ai vari stili, viene ampliata l'analisi di alcune delle più importanti moschee al mondo costruite sino ad oggi in modo che ci si possa rendere conto di come cambino o restino invariati gli elementi caratteristici e lo stile architettonico.

In Africa occidentale, nel Mali, si trova l'edificio di fango più grande che sia stato costruito e si tratta della Moschea di Djennè, una delle più importanti architetture sudanese-saheliana.

La moschea odierna probabilmente è la terza ricostruzione della moschea originale; la prima dovrebbe essere stata costruita per ordine del sultano nel 1240, mentre i lavori della moschea odierna iniziarono intorno al 1906 per finire nel 1909.

L'edificio a pianta quadrata grande 75m x 75m e alto fino a 20m, è stato costruito completamente in mattoni di terra cruda che vengono appena bagnati prima di essere assemblati ed i quali sono composti da un impasto di argilla, sabbia e paglia essiccata al sole. L'utilizzo di questo materiale necessita di una manutenzione importante, in quanto con l'umidità, la pioggia e il sole, le pareti vengono danneggiate e si formano delle crepe che vengono riparate dalla popolazione stessa.

La moschea in questione si compone di due spazi molto grandi: un cortile interno aperto ed uno spazio coperto in cui i fedeli pregano richiamati dalle torri 5 volte al giorno. La ventilazione interna è garantita da ben 104 fori di areazione.

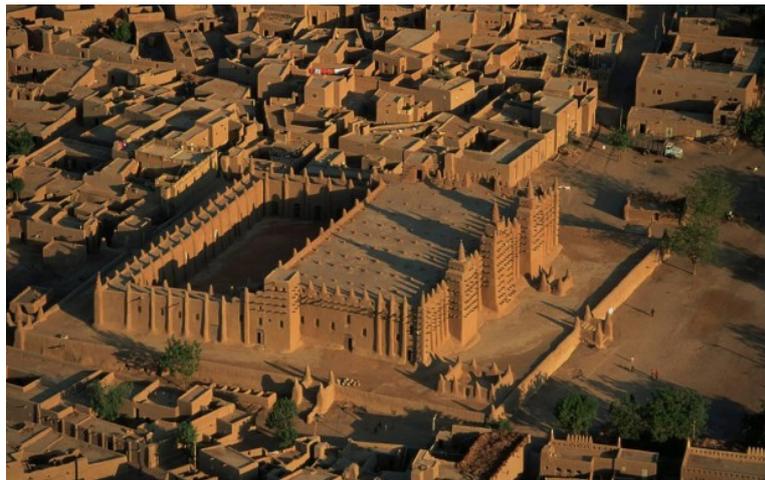


Figura6_moschea di
Djennè

In Marocco, la Moschea di Hassan II è una delle più grandi al mondo; presenta un minareto alto 200 m e una sala per la preghiera atta ad ospitare fino a 25.000

fedeli. Si trova a Casablanca, fu commissionata dalla casa reale per essere inaugurata nel 1993 con un'architettura di ispirazione arabo musulmana e utilizzando tecniche moderne, infatti la moschea è dotata di riscaldamento a pavimento, di una copertura mobile nella sala della preghiera e la Mecca viene indicata mediante un laser puntato dalla cima del minareto stesso. Le decorazioni dell'edificio richiesero il lavoro di tutti gli artigiani del regno per un risultato finale composto da rivestimenti in marmo e granito, intonaci scolpiti, applique in vetro di Murano alti fino a 10 m. Essendo stata costruita molto vicino l'oceano, i forti venti e la salinità dell'oceano rendono necessari costanti interventi di manutenzione per la moschea.



Figura7_moschea di
Hassan II

Spostandoci dall'Africa agli Emirati Arabi ritroviamo quella che viene definita una vera e propria opera d'arte architettonica: la Moschea dello Sceicco Zayed, anche nota come Moschea Bianca di Abu Dhabi ed è una delle più grandi al mondo.

Nel 1996 iniziano a costruire la moschea per ultimarla nel 2007 in stile ottomano mettendo insieme la cultura islamica e lo stile architettonico moderno. Il complesso, che comprende moschea, parcheggio, piazzale, tomba dello Sceicco, è grande 12 ettari. Sono state costruite 82 cupole in marmo bianco importato dalla Macedonia sorrette da 1096 colonne (di cui 96 in marmo bianco con incisione in madreperla) con capitelli d'oro e decorazioni di pietre preziose; le vasche d'acqua e le fontane circondano la struttura principale. Ai quattro angoli del cortile ci sono 4 minareti alti circa 107 metri e sono presenti tre sale di preghiera, una più grande e due più piccole che in tutto arrivano a contenere 10.000 credenti.



Figura8_moschea
dello sceicco Zayed

Un'altra tra le più recenti moschee costruite ritenute tra le più belle al mondo, è la Moschea di Cristallo in Malesia. Viene costruita tra il 2006 e il 2008, e come sarà possibile notare, i materiali utilizzati per la costruzione di questo edificio sono bel lontani da quelli tradizionalmente usati nel mondo islamico rendendola sicuramente unica nel suo genere. L'aspetto più tradizionale viene conferito dalla presenza di quattro minareti.

La struttura è in acciaio, è presente del cristallo ma gran parte del materiale trasparente di cui è composta è vetro e grazie all'illuminazione interna, sembra che le cupole in vetro possano risplendere.



Figura9_moschea di
Cristallo

Tra le tantissime moschee presenti al mondo, è possibile dividere le tre tipologie generali inizialmente analizzate in altre cinque sotto-tipologie di moschee

studiate in base al luogo di appartenenza. Questa analisi è stata condotta dagli studiosi M.J. Frishman e H-U. Khan.

- Arabia/Nord Africa: moschea caratterizzata da sala ipostila con coperture piana o a cupola di piccole dimensioni;
- Africa sub-sahariana: edificio spesso costruito utilizzando mattoni in terra cruda;
- Area ottomana e sud-est asiatico: la spazio centrale della moschea è coperto da una grande cupola o da una copertura piramidale;
- Iran e Asia centrale: complesso che segue l'andamento di una coppia di assi che portano a quattro iwan, elemento architettonico aperto su un lato e coperto che si trova alle estremità della moschea e sormontato da una grande arco;
- India: edificio principale sormontato da tre cupole e che affaccia su un grande cortile
- Cina: giardino murato attorno al quale trovano posto diversi padiglioni.

Figura10_tipologia di moschea prevalente in Arabia e Nord Africa

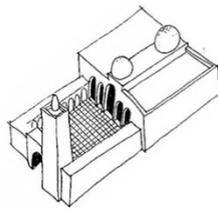


Figura11_tipologia di moschea prevalente in Africa sub-sahariana

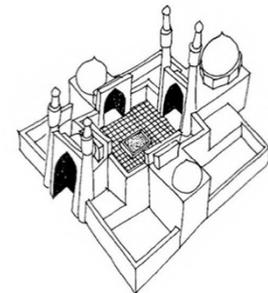
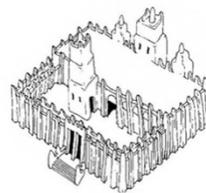


Figura12_tipologia di moschea prevalente in Iran e Asia centrale

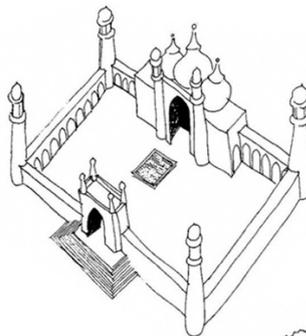


Figura13_tipologia di moschea prevalente in India

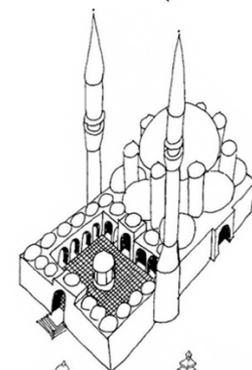


Figura14_tipologia di moschea prevalente in area Ottomana

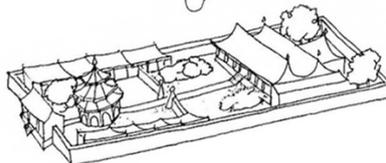


Figura15_tipologia di moschea prevalente in Cina

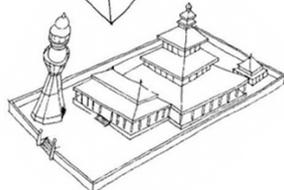
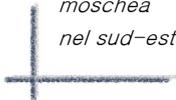


Figura16_tipologia di moschea prevalente nel sud-est asiatico



Confrontandoci con quella che è l'architettura islamica del XXI secolo si può notare come essa sia un'identità molto complessa dovuta all'interazione tra le diverse culture e tradizioni dei numerosi popoli, e allo stesso tempo si nota come questo tipo di arte renda possibile la coesistenza tra le diverse architetture internazionali e locali. Si può affermare che gli arabi hanno avuto funzione di intermediario tra le diverse culture, tra Europa, Asia e Africa. Gli architetti islamici contemporanei hanno iniziato un mutamento delle forme architettoniche islamiche, facendo un salto da quella che era un'architettura fortemente influenzata dai valori occidentali ad una nuova architettura influenzata da valori locali e forme tradizionali, il tutto incrementato con delle scelte più tecnologiche sostenibili per quanto riguarda i materiali di costruzione, i sistemi di raffrescamento, riscaldamento e di areazione.

1.3 Caso studio: la nuova moschea di Dakar

Il caso studio di cui si occupa questa tesi è la copertura della moschea di Dakar, in Senegal, progettata dallo studio “Fragomeli+Partners” in collaborazione con la “Wafai Architecture” con l’obiettivo di creare un punto di riferimento culturale e sociale per tutti, indipendentemente dalla propria fede religiosa. Si punta a creare un’atmosfera coinvolgente e inclusiva per poter utilizzare questi spazi come luoghi di culto, spazi sociali, hub di integrazione e spazi per dialoghi culturali costruttivi dando così la possibilità di poter confrontare e condividere i propri valori culturali.



Figura17_vista
frontale del progetto
della nuova moschea

Il concept del progetto si basa su tre elementi il cui significato viene associato agli elementi architettonici della moschea ovvero acqua, luce e terra.

L’acqua che nella religione simboleggia la purificazione e la rinascita si ritrova, prima di entrare nella moschea, in piccole cascate e specchi d’acqua che con il loro suono rilassante preparano alla meditazione. Delle grandi scalinate accompagnano il visitatore ad immergersi in un’atmosfera serena lasciando spazio alla riflessione, abbandonando momentaneamente il mondo caotico lasciandosi trasportare dal suono delle cascate. Inoltre nell’architettura della moschea viene utilizzata una pompa per il movimento dell’acqua come tecnologia per il raffrescamento della struttura tramite pavimento.

La luce, simbolo della fede in Dio, diviene elemento essenziale per il concept della cupola, infatti viene utilizzata per la produzione di energia per la moschea stessa tramite vetri fotovoltaici installati sulla copertura in acciaio; alternati a pannelli fotovoltaici in copertura ci sono vetri trasparenti che permettono l’ingresso della luce nella moschea definendo gli spazi per la preghiera all’interno della sala più grande.

Infine la terra, simbolo religioso che rappresenta l'uomo, viene sfruttata come elemento di isolamento naturale della moschea sotto il livello del suolo.

La disposizione spaziale della moschea vede una grande sala di preghiera come nucleo della struttura, circondata da una sequenza di spazi multifunzionali su tre lati in cui la comunità può riunirsi e socializzare. La sala di preghiera viene separata dagli altri spazi attraverso un porticato che corre lungo di essa.

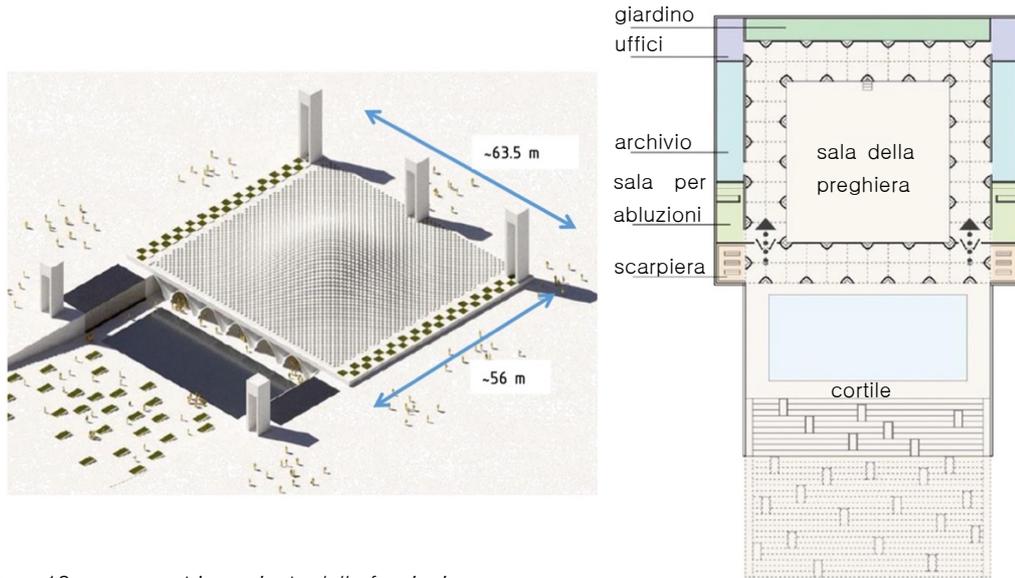
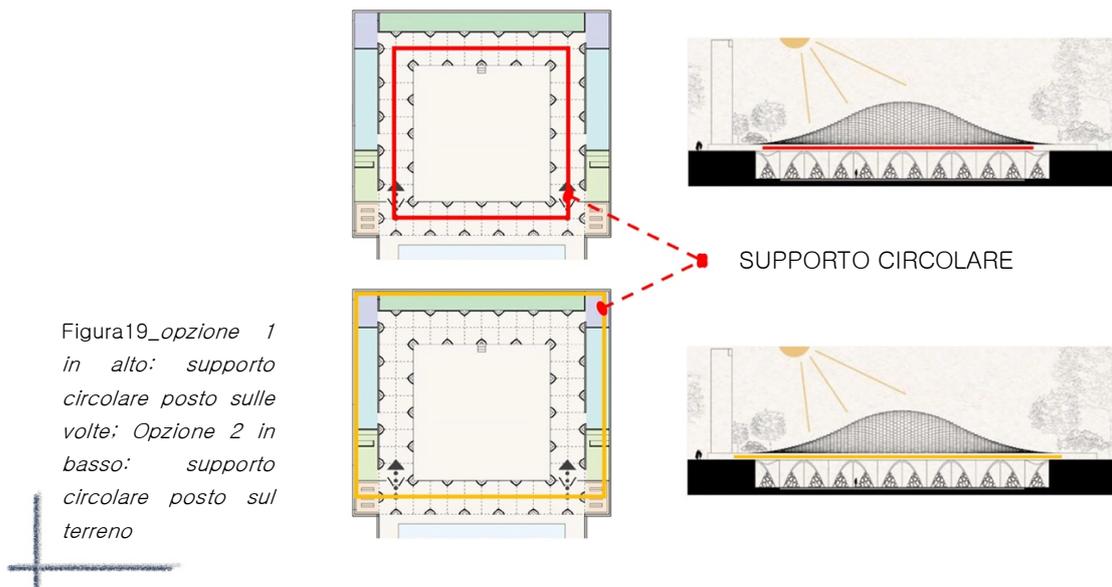


Figura18_assonometria e pianta delle funzioni

La struttura del tetto, l'unica parte visibile dall'esterno, si eleva dolcemente in una duna composta da centinaia di moduli cubici attraverso alcuni dei quali la luce può filtrare nella sala della preghiera. Questa forma del tetto a doppia curvatura è stata ottenuta tramite metodo di form-finding di cui si parlerà nei prossimi capitoli. La cupola poggia su un supporto circolare per cui sono state valutate due diverse opzioni (Figura19): prevedere il supporto posto direttamente sui tetti delle volte sottostanti oppure escludere il posizionamento diretto sulle volte facendo poggiare la struttura circolare sul terreno o su una struttura di supporto.



La struttura dei blocchi della copertura è formata da profili a L in alluminio con pannelli di facciata leggeri dotati di fori per i bulloni per poter adattare la loro posizione sul telaio in base alla forma complessiva della cupola. Quattro moduli sono tenuti assieme da una struttura primaria in acciaio HEA che permette una connessione continua tra telai e pannelli che sono tenuti insieme a loro volta da una struttura secondaria in acciaio ovvero da profili a U formati a freddo. Si alternano vetri fotovoltaici a vetri trasparenti, permettendo l'ingresso della luce, ancorati al montante del cubo imbullonando l'angolare che funge da supporto del vetro al montante. In aggiunta ai vetri fotovoltaici, sulla parte laterale dei cubi sono presenti delle griglie che permettono la ventilazione naturale (quando c'è vento) all'interno della moschea; altrimenti quando è presente un Surplus Energy dei pannelli, questa viene usata per il sistema di ventilazione ibrido per la regolazione del microclima interno.

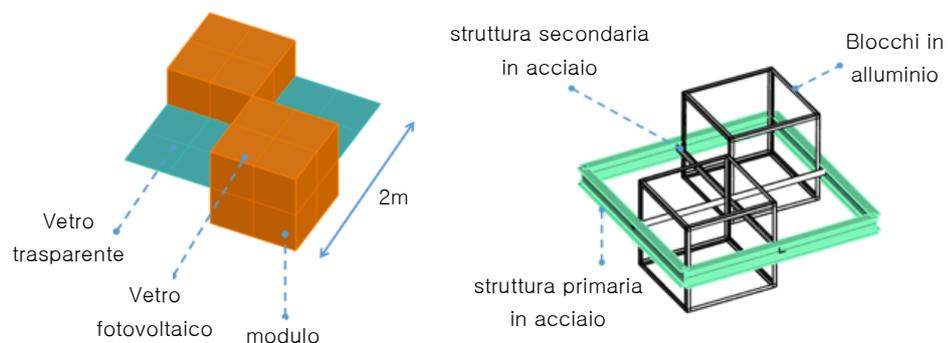


Figura20_telaio a pannelli modulari della copertura

Le volte che si vedono frontalmente e che sono presenti lungo tutto il perimetro della moschea sono strutture in cemento armato molto sottili, con un comportamento strutturale regolato da regime a membrana.^{1,2}



Figura21_volte in
cemento armato

Per il processo di form-finding di queste volte si è lavorato su paraboloidi iperbolici adattati alla geometria d'interesse. Come vedremo in seguito più nel dettaglio, il form-finding porta alla definizione di una forma particolare in cui le sollecitazioni sono ridotte al minimo per una data configurazione di carico. In questo caso, il metodo utilizzato per la definizione della forma si basa sul Multibody Rope Approach (MRA), metodo che verrà analizzato in dettaglio successivamente.

¹ Membrana: struttura spaziale che non ha resistenza a compressione, flessione e taglio ma solo a trazione dovuto allo spessore ridotto. Riesce comunque a sostenere carichi perpendicolari al proprio piano assumendo una configurazione tridimensionale che permette di generare sforzi di trazione interni la cui risultante si oppone al peso che devono sopportare.

² Regime a membrana: lo stato tensionale di una struttura soggetta ad una data configurazione di carico può essere in regime di membrana quando la risultante delle tensioni in ogni punto giace sulla superficie media che è posta in corrispondenza di metà spessore e quando le tensioni ortogonali alla superficie media sono costanti lungo lo spessore.

2. La forma

Uno degli obiettivi principali della tesi sarà la ricerca di forma della copertura della nuova moschea di Dakar, una gridshell a doppia curvatura che scarica il proprio peso lungo il perimetro esterno e sul terreno. La forma progettata richiama una duna in quanto ci si pone l'obiettivo di far integrare il più possibile l'architettura con il contesto.

La forma architettonica è un argomento molto importante nel campo della progettazione, è da sempre uno degli obiettivi principali caratterizzata da una costante comunicazione con l'ambiente circostante, con cui deve integrarsi senza però farsi limitare. Le architetture sono destinate a modificare la realtà nella quale si inseriscono.

È interessante aprire una parentesi sul concetto di decostruzione della forma, che ci allontana dalla concezione di forma basata sull'ordine, sull'armonia e sull'equilibrio; questa dissoluzione della forma avviene dematerializzando l'involucro creando una stretta relazione con l'ambiente naturale permettendo alle pareti di assumere trasparenza, leggerezza, luminosità e comunicazione, facendo diventare lo spazio naturale uno spazio interno all'architettura.

Grazie all'avanzata tecnologia moderna e all'utilizzo di nuovi software di calcolo, si è potuto introdurre innovazioni nella metodologia progettuale della progettazione architettonica rendendoci in grado di aggiungere alla dicotomia forma-funzione e tecnica-estetica, la dicotomia spazio-supporto digitale. Queste nuove tecnologie ci permettono di realizzare forme prima impensabili perché troppo difficili da calcolare, disegnare o visualizzare.

“Se la smaterializzazione della forma architettonica è una linea presente in tutta la storia dell'architettura, è con l'affermazione dell'industria che subisce un forte impulso, portando al graduale alleggerimento fisico e percettivo della costruzione e alla progressiva specializzazione tecnica, funzionale ed espressiva delle parti che compongono l'edificio. Una nuova architettura, fondata sui paradigmi progettuali della precarietà, dinamicità e reversibilità, si concretizza attraverso l'assemblaggio a secco di materiali e componenti costruttivi discreti, dotati spesso di una propria autonomia formale e funzionale, l'impiego di sistemi a telaio o di involucri costituiti da pannellature, la prefabbricazione dei prodotti, la coordinazione modulare e l'ottimizzazione dei tempi e costi di trasporto e lavorazione.” [P. D'Angelo, “La tecnologia delle Gridshell: Sperimentazione di un sistema di copertura automontante”, [Dottorato in Tecnologia dell'Architettura], Napoli, Università degli studi di Napoli “Federico Secondo”, 2011, pp. 10]

Nel campo delle grandi coperture, gli ingegneri Gaudì e Isler, effettuando simulazioni di resistenza su forme, ne hanno individuato alcune desunte da forme già presenti in natura, fondate sull'equilibrio di forze secondo il principio di Form-Finding.

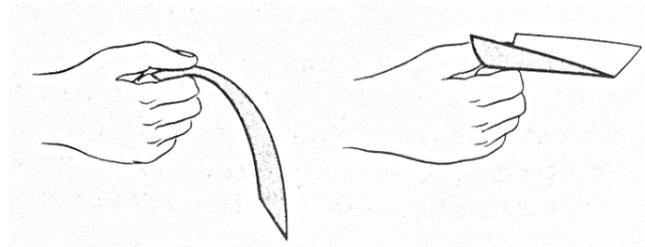
Le tecniche di progettazione assistita da computer che si sono sviluppate, permettono di focalizzare l'attenzione sugli aspetti strutturali, sulla metodologia di form-finding, sulle connessioni e sull'ottimizzazione.

Nelle architetture contemporanee, i progettisti iniziano a pensare ad una configurazione e forma degli edifici innovativa e libera. Bisogna fare una distinzione all'interno di queste architetture moderne considerate libere per forma, le quali possono essere realizzate con struttura "tradizionale" o con struttura "non tradizionale". Come struttura tradizionale consideriamo un guscio esterno, caratterizzato solo dal rivestimento esterno, collegato ad una struttura interna costituita da travi e pilastri. Nella categoria di architetture non tradizionali consideriamo tutte quelle strutture che possono essere considerate innovative, ovvero strutture in cui il sistema trave-pilastro non è sempre facilmente riconoscibile.

Rispondono molto bene a questi requisiti le strutture a guscio e le gridshell, tipologia di strutture resistenti per forma di spessore molto sottile che permettono di coprire grandi luci senza l'utilizzo di pilastri intermedi.

Il comportamento strutturale di elementi sottili è particolare; la loro rigidità e resistenza può essere aumentata aumentando lo spessore, tenendo conto che seguirà un aumento del materiale impiegato, oppure conferendo a questi elementi delle forme curve. Possiamo riuscire a comprendere meglio questo comportamento pensando ad un foglio di carta: tenendo un foglio di carta per uno dei suoi quattro lati questo si piegherà verso il basso; dotandolo invece di una certa curvatura riuscirà a sostenersi diritto da solo e acquisterà anche una certa resistenza per un eventuale carico. Queste nuove resistenza e rigidità a flessione non sono state ottenute aumentando il materiale usato ma semplicemente dando al foglio la giusta forma.

Figura22_ese
mpio
per la
comprensione del
comportamento
strutturale di
elementi sottili



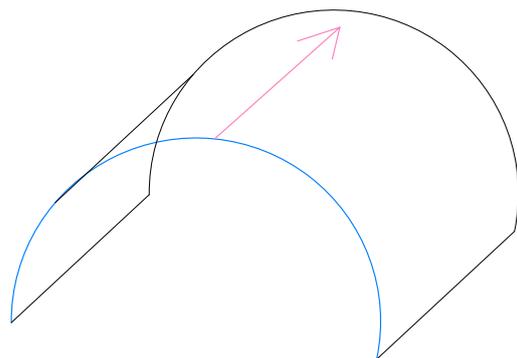
2.1 Dal sistema trilitico alle volte

Le strutture a superfici curve permettono la progettazione e la realizzazione di strutture con forme complesse. La forma curva stessa è definita come strutturalmente resistente caratterizzata da capacità portante e stabilità strutturale. Partendo da quella che è una geometria che definiamo “di base” come l’arco, ci sono due modi in cui possono essere generate le superfici curve: per traslazione dell’arco e per rotazione dell’arco attorno ad un asse.

A seconda degli elementi con cui si lavora e in base a come gli elementi vengono combinati tra loro possono essere generate diverse tipologie di superficie curve. Possono essere combinati elementi rettilinei con elementi curvilinei oppure solo elementi curvilinei.

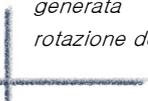
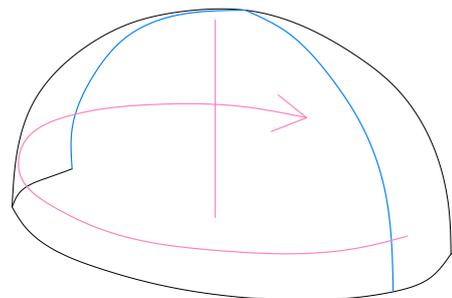
Immaginando di generare una superficie curva per traslazione consideriamo la combinazione di un arco come curva generatrice della superficie e una retta come direttrice della superficie. Si ottiene una volta a botte, una tipologia di struttura definita a curvatura semplice.

Figura23_volta a botte generata dalla traslazione dell'arco



Immaginando invece di generare una superficie curva dalla rotazione di un arco attorno ad un asse rettilineo verticale, il risultato sarà una cupola, una struttura definita a doppia curvatura perché generata da due curve.

Figura24_cupola generata dalla rotazione dell'arco



La progettazione di questo tipo di strutture è avvenuta gradualmente nei secoli per poterle adattare alle necessità del tempo: si è partiti dal sistema trilitico, fino ad arrivare all'arco, alle volte e ai gusci.

L'architrave, che poteva essere in legno, piuttosto che in pietra o in metalli, è stata una delle prime soluzioni ideate per coprire un'apertura: scarica i carichi tramite i suoi punti di appoggio. Superando i limiti dell'architrave nel tempo si arriva ad una nuova soluzione ingegnosa: la costruzione delle prime volte circolari. Ne era prevista la costruzione disponendo una serie di conci l'uno sopra l'altro, in cui il concio superiore veniva posto un po' più avanti rispetto al concio sottostante. Col tempo per sopperire alla richiesta di coprire luci sempre maggiori, venne utilizzato l'arco, struttura che scarica i carichi verticali e contrasta le spinte orizzontali sulle murature d'appoggio, per la realizzazione delle volte. Gli elevati valori di spinta orizzontale che caratterizzano una struttura ad arco richiedono la presenza di una struttura con una sezione trasversale importante che diventa quindi anche pesante e non adatta a strutture circolari. La soluzione a questo problema è stata trovata utilizzando l'arco in maniera diversa nelle volte dando vita alle volte costolonate in cui l'arco si trova tra le murature parallele che vengono dimensionate in maniera tale da poter reggere i carichi, e tra i due archi lo spazio viene chiuso dalle volte, rendendo così la struttura molto più leggera. Nei punti di intersezione tra le volte, vengono realizzati dei costoloni per migliorare la stabilità.

Questo tipo di volta, nel tempo, si è evoluta e ha dato origine a numerose varianti che si adattavano alle esigenze del momento. Nei paesi in cui non si poteva trovare legno a sufficienza per la costruzione delle centine necessarie per poter costruire gli archi e le volte vennero realizzate le cupole, delle strutture che non avevano bisogno di sostegni durante la costruzione.

È dal XX secolo che grazie alle innovazioni tecnologiche, numerosi studi e ricerche che le strutture a volta e ad arco hanno raggiunto dimensioni grandiose, e sempre più negli anni vengono studiate le proprietà dei materiali affinché possano essere sfruttate al massimo per la realizzazione di strutture dalla forma sempre più complessa.

2.2 Strutture a guscio

Definiamo come guscio una struttura bidimensionale caratterizzata da uno spessore sottile che può essere a semplice o a doppia curvatura, il quale va a delimitare un volume di cui costituisce la copertura.

I gusci sottili sono strutture resistenti per forma, riescono sostenere i carichi grazie alla loro forma incurvata che permette l'incremento della capacità portante della struttura. Questa tipologia di guscio si può ritrovare in legno, in acciaio, in materie plastiche, ma anche in calcestruzzo armato, dipende dalla tipologia di struttura che si intende realizzare. Ovviamente la loro efficienza strutturale dipenderà dalla curvatura e dalle distorsioni che subirà la superficie, o meglio, la forma.

Per comprendere meglio il funzionamento dei gusci partiamo dalle membrane, strutture spaziali che non riescono a resistere a sforzi quali compressione, flessione e taglio. Al contrario riescono però a resistere a carichi ortogonali deformandosi assumendo una configurazione tridimensionale definita funicolare del carico. Immaginando di ruotare questa membrana invertendo la curvatura si otterrà una nuova configurazione definita antifunicolare, che è ciò che caratterizza una struttura a guscio sottile. *“I gusci sottili sono strutture spaziali “opposte” alle membrane, in quanto resistono a sole azioni di compressione. Poiché, per sopportare i carichi applicati, le membrane ed i gusci sottili devono essere dotati di una curvatura, essi possono essere definiti come strutture resistenti per forma”* [M. Carrieri, “Membrane e gusci”, http://costruirecorrettamente.org/site/approfondimento/schede_meccanismi/index.php?doc_id=220].

Figura25_membrana
soggetta ad una forza
ortogonale al suo piano

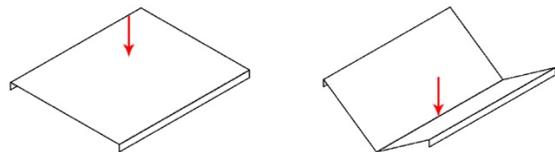


Figura26_inizio
deformazione della
membrana

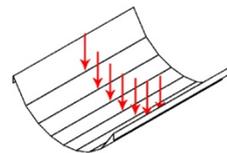


Figura27_configurazione
funicolare

Figura28_configurazione
antifunicolare

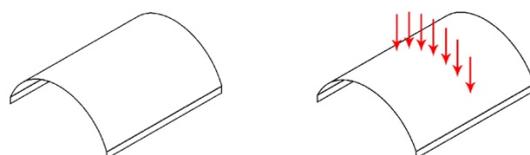


Figura29_struttura
a guscio resistente a
compressione



Apriamo una piccola parentesi più generale, la forma di un guscio si può ottenere da superfici di rivoluzione ottenendo superfici sferiche, ellittiche e paraboliche. Può essere ottenuta tramite unione di barre corte e rigide, ne sono un esempio le cupole geodetiche. Ancora, può essere data da una superficie rigata ovvero una superficie ottenuta dall'unione di rette, ciascuna delle quali è definita generatrice della rigata, come nel caso del paraboloide iperbolico.

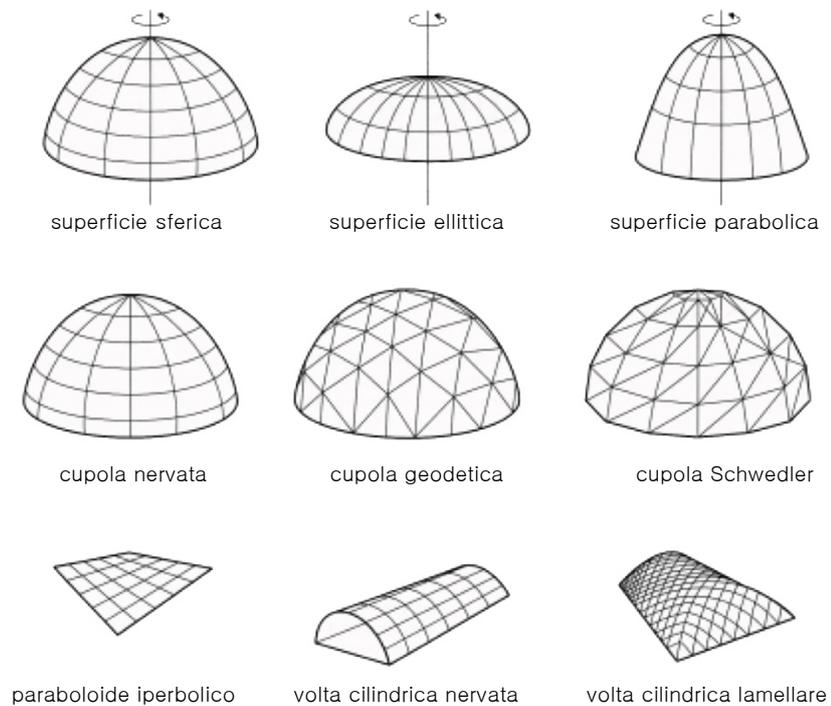


Figura30_ diverse tipologie di forme a guscio

Il passo in avanti rispetto a queste geometrie tradizionali prefissate e analiticamente note è la ricerca della forma; bisogna fare un'inversione concettuale dell'approccio tradizionale partendo da pochi parametri fissati a priori. Stabilendo valori come luci da coprire, condizioni di carico, altezza massima, si deve ricercare la forma che meglio riesce a rispondere al suo compito. Per riuscire nell'obiettivo, negli anni si sono quindi sviluppate tecniche di Form-Finding sempre più avanzate che analizzeremo nei prossimi capitoli. Tendenzialmente le strutture a guscio non sono le più adatte a sostenere carichi concentrati, al contrario reagiscono molto bene in presenza di carichi distribuiti. *“Questi vengono trasferiti a terra attraverso lo sviluppo di sforzi di trazione e di compressione agenti nel piano tangente in ogni punto della superficie”* [“Strutture a guscio”, Università degli studi Mediterranea di Reggio Calabria, https://www.unirc.it/documentazione/materiale_didattico/1464_2014_377_21219.pdf]

Considerando un guscio sferico soggetto a sforzi interni per carichi distribuiti, si sviluppano azioni dirette secondo un sistema di riferimento che valutiamo lungo i paralleli e i meridiani della sfera stessa. In particolare, gli sforzi diretti secondo i meridiani sono sempre di compressione, mentre gli sforzi diretti lungo i paralleli possono essere sia di compressione che di trazione. Nell'immagine successiva si può notare come nella parte bassa della sfera i meridiani tendano ad aprirsi perciò per contenere questo movimento si sviluppano forze cerchiati di trazione; al contrario, nella parte alta della sfera i meridiani tendono a chiudersi, perciò per contenere questo movimento si sviluppano forze cerchiati di compressione.

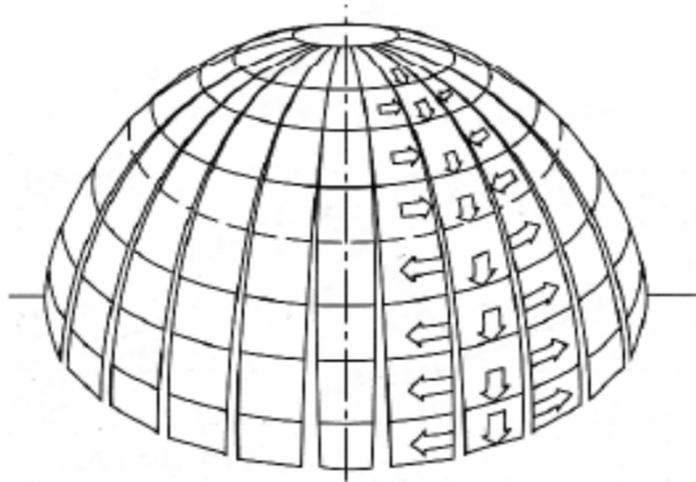


Figura31_distribuzione degli sforzi interni di un guscio sferico

Essendo quindi le forze secondo i meridiani di compressione, le azioni che il guscio trasmette alle fondazioni saranno dirette verso l'esterno, quindi per poter contenerle si può pensare ad un anello di fondazione di contenimento che, per effetto delle forze trasmesse dal guscio sarà sempre in trazione, assorbendo quelle che sono le spinte orizzontali del guscio e trasmettendo i carichi al suolo. In alternativa all'anello di fondazione i gusci hanno bisogno di un sistema di contrafforti per poter assorbire le spinte. In generale è proprio lungo i bordi che possono presentarsi dei fenomeni critici per questa tipologia di struttura, bisogna evitare che si formino fenomeni flessionale che metterebbero a rischio la stabilità strutturale.

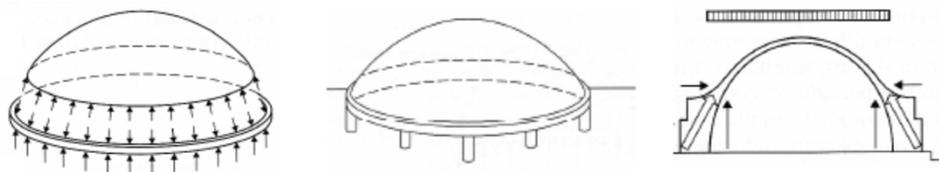


Figura32_contenimento delle azioni del guscio trasmesse alle fondazioni

3. Multi-Materiale

“Il rapporto che lega la scelta dei materiali alle sollecitazioni cui possono essere sottoposti, non solo, ma anche l'intensità delle stesse, genera una forma, una struttura, che di per sé tende ad essere l'ottimale: e nella progettazione e nell'evoluzione storica delle forme strutturali, l'architetto ha inteso fare “il più con il meno” sfruttando sempre al massimo le sue conoscenze fisico-meccaniche, le tecniche costruttive e le potenzialità dei materiali” [P. D'Angelo, “La tecnologia delle Gridshell: Sperimentazione di un sistema di copertura automontante”, [Dottorato in Tecnologia dell'Architettura], Napoli, Università degli studi di Napoli “Federico Secondo”, 2011, pp.35, concetto tratto dal libro “La forma delle strutture” di Francesco Abbate]

Da questo concetto si capisce l'importanza della scelta del materiale nelle strutture; è infatti possibile associare il materiale più adatto per una determinata struttura studiandone le sue caratteristiche fisico-meccaniche. Svolgendo un'attenta analisi delle sollecitazioni e dei carichi a cui la struttura sarà sottoposta si può verificare se le prestazioni offerte dal materiale soddisfano o meno i requisiti strutturali richiesti. Questo per evitare che, in fase di montaggio, la struttura non crolli sotto il carico delle sollecitazioni imposte per la sua messa in forma.

Come verrà affrontato nei prossimi paragrafi ci sono tantissime metodologie e materiali differenti con cui poter costruire strutture a guscio, facendo in primis una distinzione tra gusci continui e gridshell.

3.1 Concreteshell

Il calcestruzzo armato è ritenuto uno dei materiali più elastici nel campo delle costruzioni dopo il legno e l'acciaio. Già a partire dall'Ottocento, molte furono le sperimentazioni effettuate sull'utilizzo del calcestruzzo armato per la costruzione di superfici curve e sempre più sottili fino ad arrivare, negli anni Trenta del Novecento, a realizzare strutture a guscio in grado di svilupparsi lungo grandi luci senza l'utilizzo di appoggi intermedi, con un modesto quantitativo di materiali, realizzando forme fino ad allora sconosciute e raggiungendo ottime prestazioni statico-resistenti con uno spessore minimo.

Si definisce quindi guscio *una “struttura di spessore sottile che costituisce una superficie curva, delimitando un volume al suo interno. [...] Un elemento portante tridimensionale (o a due dimensioni nello spazio) capace di coprire*

vaste aree con uno spessore minimo: 5 – 8 cm per 40 – 50 m di portata, cioè lo stesso rapporto tra spessore e larghezza del guscio dell'uovo" [P. D'Angelo, "La tecnologia delle Gridshell: Sperimentazione di un sistema di copertura automontante", [Dottorato in Tecnologia dell'Architettura], Napoli, Università degli studi di Napoli "Federico Secondo", 2011, pp. 18]

L'utilizzo del calcestruzzo nelle strutture a guscio presenta numerosi vantaggi:

- possono superare luci libere importanti con spessori estremamente ridotti;
- la superficie continua permette di evitare nodi di collegamento complicati;
- offre un'elevata rigidità con peso e uso di materiale ridotto;
- è facile da lavorare perciò ideale per la costruzione di forme libere.

Ha anche alcuni svantaggi:

- soprattutto nella costruzione di gusci potrebbero sorgere dei problemi se il calcestruzzo si asciugasse troppo velocemente;
- è un buon conduttore termico, caratteristica non ottimale in climi molto caldi;
- il guscio in calcestruzzo non è adatto a reggere carichi concentrati (mentre offre ottime prestazioni in presenza di carichi distribuiti).

Per quanto riguarda le sollecitazioni maggiori, queste si determinano prevalentemente lungo i bordi delle strutture, perciò affinché queste vengano assorbite, ciò che si potrebbe fare sarebbe trasformare il bordo in una trave. Un'altra questione da tenere in considerazione in relazione al guscio in calcestruzzo è il taglio della superficie continua per l'ingresso della luce naturale e degli stessi fruitori. Per questo possono essere adottate delle strategie come traforare la lamina strutturale in base al regime tensionale interno o sollevare e inspessire i bordi. Tutti i precedenti temi saranno affrontati nelle analisi delle successive opere architettoniche.

Un contributo determinante per l'evoluzione di questa tipologia di costruzione è quello dell'ingegnere, artista, tecnico e professore Eduardo Torroja. Il Mercato di Algeciras (1934-1935) fu la sua prima struttura a guscio in cemento armato con pianta ottagonale di lati di 28,20 m. La calotta sferica di 42,20 m di diametro è tagliata da otto lunette formate da piccole volte cilindriche che ne definiscono il contorno poggiando sui pilastri collegati tra loro da un anello poligonale post-teso. Sui pilastri perimetrali scaricano gli sforzi della copertura apportando così rigidità alla struttura a guscio. Quest'ultima è continua e presenta uno spessore di 9 cm arrivando a 50 cm sugli appoggi. Sulla sommità presenta un lucernario ottagonale in calcestruzzo armato permettendo l'ingresso della luce naturale.

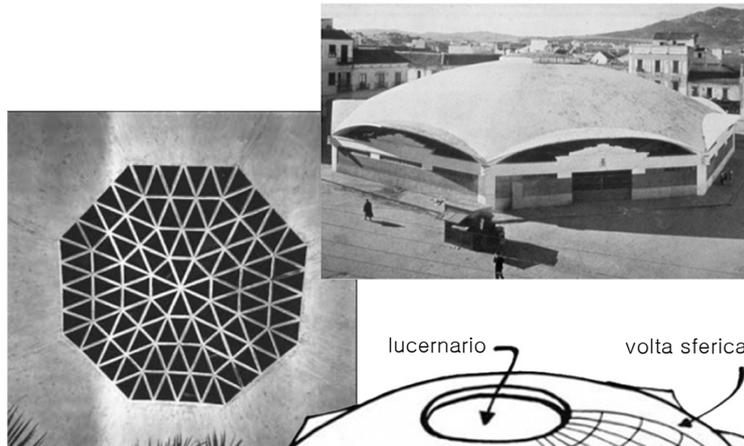


Figura33_facciata del mercato di Algeciras



Figura34_lucernario, vista dal basso

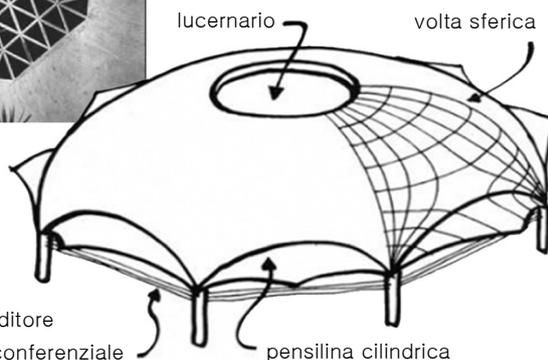


Figura35_schema grafico delle componenti architettoniche e strutturali del Mercato di Algeciras

Un altro progetto rilevante di Eduardo Torroja è il Frontón Recoletos costruito a Madrid 1935 destinato al gioco della pelota basca. L'edificio subisce gravi danni durante i bombardamenti della guerra civile del 1939. La copertura è tra le più innovative e singolari progettate dall'ingegnere stesso. Si trattava di una copertura a guscio cilindrica ad ali di gabbiano formata dall'intersezione di due segmenti di circonferenze di raggio di 12,20 m e 6,40 m. La lunghezza copriva una luce di 55 m e non presentava appoggi intermedi, scaricando principalmente sui muri frontali e in piccola parte su quelli laterali. Per l'ingresso della luce naturale viene smaterializzata parte della lamina in calcestruzzo per permettere la costruzione di due lucernari longitudinali lunghi quanto l'edificio formati da una maglia di triangoli equilateri con i lati di 1,40 m.

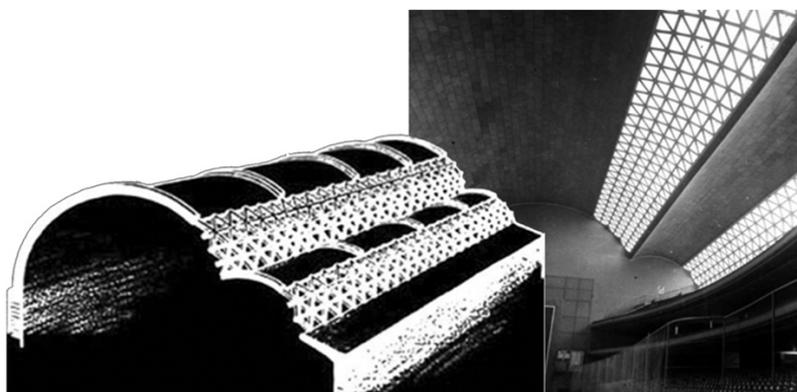


Figura36_copertura a guscio cilindrica del Fronton Recoletos, vista dei lucernari

L'architetto spagnolo Felix Candela ha dato, anch'egli, un importante contributo nella realizzazione delle strutture a guscio, progettando in Messico nel 1958 il ristorante Los Manantiales che viene definito come un'opera d'arte strutturale, efficiente, elegante e duratura.

Candela iniziò a sperimentare su vasta scala la costruzione di strutture a guscio e, mentre le sue abilità in questo campo si stavano solidificando, nasce il progetto del guscio sottile in cemento armato del ristorante. L'architetto lavora con forme le cui sollecitazioni potevano essere ricavate da una semplice equazione senza fare affidamento sulla matematica complessa; lavora intensamente con i paraboloidi iperbolici.

La singolare forma scultorea della superficie dell'edificio è stata oggetto di continue indagini geometriche. L'edificio con pianta radialmente simmetrica si compone dall'aggregazione radiale di otto spicchi di paraboloidi iperbolici che si incontrano lungo otto diagonali anch'esse iperboliche per formare uno sbalzo parabolico inclinato captando la luce naturale. Le interazioni tra le forme vengono inspessite con travi a "V" rinforzate in acciaio nascoste, in quanto in quei punti vengono trasportate le maggiori forze della membrana. Così facendo non è stato necessario l'utilizzo di travi di irrigidimento lungo i bordi.

Per la realizzazione del getto in calcestruzzo come casseforme sono state utilizzati degli elementi lignei lineari che seguono l'andamento della superficie. Ad oggi Los Manantiales è ancora gestito come ristorante ma è molto cambiato rispetto a quando è stato costruito, nonostante ciò la conchiglia è però strutturalmente intatta.

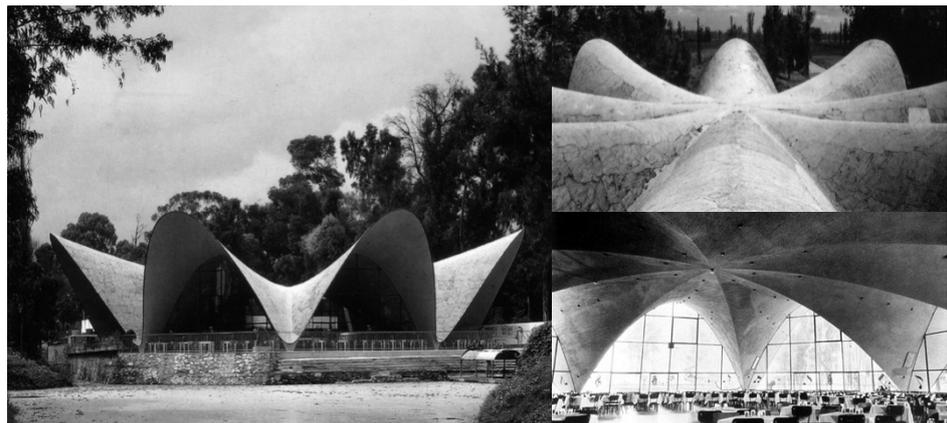


Figura37_vista frontale, vista dall'alto e vista dall'interno della copertura del ristorante Los Manantiales

3.2 Brickshell

Questo tipo di costruzione trova il suo riferimento principale nella tipologia edilizia della volta catalana.

La costruzione di queste volte avviene disponendo i mattoni in un preciso ordine: si sovrappongono due volte il cui orientamento dei mattoni è diverso nell'uno rispetto all'altro con l'utilizzo di casseforme minime. In questo modo si ottiene una struttura sottile e resistente allo stesso tempo grazie anche al tipo di mattone utilizzato che risulta essere più sottile rispetto ai laterizi tradizionali. È visibile in Figura38 la differenza tra una volta tradizionale a sezione semicircolare costruita con cassero e la volta catalana molto più sottile; inoltre questo tipo di volta consente di coprire luci anche fino ai 30 m.

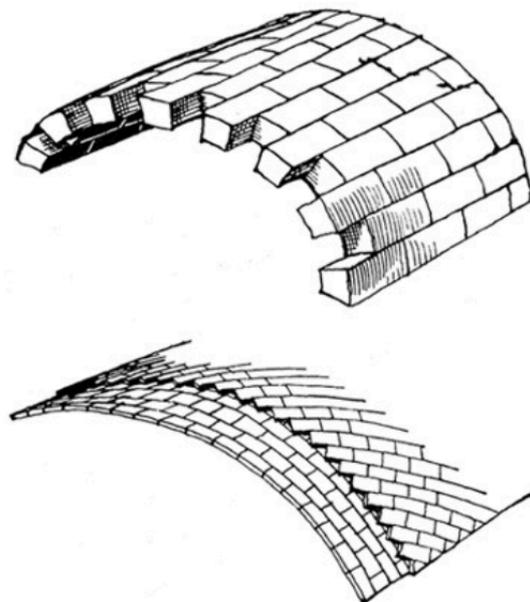


Figura38_differenza tra
una volta tradizionale
in mattoni (sopra) e
una volta catalana
(sotto)

L'architetto Rafael Guastavino viene considerato uno degli esponenti principali nell'innovazione di questa tecnica costruttiva sostituendo la malta di calce con la malta in cemento Portland per rendere la muratura più resistente e introducendo anche il ferro come rinforzo per le tensioni della muratura. Una delle costruzioni più famose è la Fabbrica Batlló di Barcellona del 1868; la struttura si compone da volte in piastrelle emisferiche che poggiano su colonne metalliche e forate sulla sommità per permettere l'ingresso della luce.



Figura39_Fabbrica Batlló

La volta catalana è stata oggetto di studi per il Swiss Block Research Group dell'Università di Zurigo che ha sviluppato nuovi strumenti di progettazione ad alta tecnologia e utilizzando materiali a bassa tecnologia come il cartone. L'obiettivo è la costruzione di un prototipo di una volta catalana con forma libera complessa ottenendo una struttura a conchiglia ottimizzata ed espressiva. Sono stati sperimentati diversi materiali per costruire queste strutture in maniera sostenibile ed economica. Il metodo di costruzione sviluppato è definito sostenibile in quanto utilizza una quantità di materiale decisamente inferiore rispetto alla costruzione con tecniche tradizionali.

Per la costruzione di questo tipo di volta è fondamentale la ricerca di una forma che permetta lo spessore minimo del guscio. È un progetto di ricerca importante nel campo della ricerca di forma e dei metodi di costruzione per strutture funicolari.

Per la realizzazione di queste nuove forme, i ricercatori utilizzano un sistema di casseforme continue in cartone, fabbricabili in maniera rapida ed economica; è un materiale leggero e veloce da montare, riciclabile e riutilizzabile e permette la costruzione di volte sottili con forme libere.

Questo sistema di casseforme si compone di scatole sorrette da sacchi di pellet posti l'uno sopra l'altro e i cui distanziatori poggiano su dei tubi di plastica; il pellet permette sia di ridurre il volume di carta da utilizzare che di facilitare la realizzazione della forma finale.

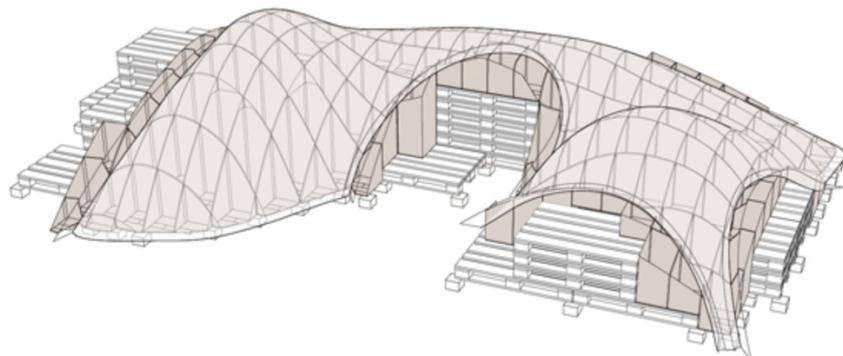


Figura40_modello
di costruzione
della volta

Per la rimozione finale delle casseforme dopo la posa in opera dei mattoni bisogna fare particolare attenzione in quanto l'intera cassaforma dovrebbe essere rimossa tutta contemporaneamente. Questo per evitare carichi asimmetrici provenienti dal basso in quanto essendo una struttura di sola compressione sarebbe soggetta a flessione con successiva formazione di crepe e cedimenti. Per questo motivo sono stati utilizzati i tubi al di sotto dei distanziali, all'interno di essi viene fatta passare dell'acqua che satura il cartone provocando l'abbassamento in contemporanea della cassaforma.



Figura41_forma finale
della volta in mattoni

3.3 Gridshell

Quando si parla di gridshell si fa riferimento a strutture autoportanti composte da una trama sottile di aste la cui maglia può essere quadrangolare o rettangolare; risulta essere stabile in quanto presenta forma e rigidità di un guscio differenziandosi da esso per la superficie che non è continua ma discreta. Le aste che costituiscono gli elementi strutturali sono collegate tra loro mediante nodi e vengono disposte in modo da seguire la curvatura del progetto.

Le gridshell rappresentano una totale fusione tra forma e struttura in grado di coniugare ottime prestazioni strutturali con qualità estetiche con un design basato su tecniche di form-finding e di ottimizzazione strutturale. Queste strutture sono resistenti per forma, riescono a coprire grandi luci con sistemi leggeri sfruttando la forza intrinseca di un guscio a doppia curvatura. Questa configurazione finale a guscio (shell) a doppia curvatura è data dalla deformazione graduale del graticcio (grid) piano in cantiere.

Il processo costruttivo si articola in diverse fasi, le quali si differenziano a seconda che si tratti di soluzione post-configurate o pre-configurate.

Il concept delle gridshell post-configurate, ovvero formate in sito, può essere definito come un reticolo regolare e planare, privo di rigidità a taglio, che viene deformato elasticamente fino ad ottenere una forma mirata con l'ausilio di tiranti, quindi controventato e rivestito. Questo è possibile in quanto le giunzioni tra le aste non vengono serrate e si comportano come cerniere fino a che non raggiungono la forma desiderata. Questo tipo di gridshell, noto come "griglia elastica", offre un modo molto elegante per materializzare forme libere da una griglia inizialmente piatta e regolare.

Nel caso di gridshell pre-configurate invece, le aste vengono deformate in officina, vengono numerate e portate in cantiere, mantenendo invariata la forma data per tutta la fase del montaggio. La griglia assume quindi fin da subito la configurazione finale

Lo scheletro di queste strutture reticolari viene costruito con materiali come l'acciaio, il legno, materiali compositi e può essere rivestito con materiali da costruzione tessili, vetro o altri materiali. È in grado di coprire grandi luci con un peso proprio basso e utilizzando una quantità di materiale inferiore rispetto alle strutture a guscio continuo.

In seguito saranno analizzati numerose gridshells, tra le più famose, costruite con materiali diversi e analizzate per poterne comprendere il funzionamento.

3.3.1 Gridshell in legno

Capostipite di questa tipologia strutturale è l'architetto e ingegnere Frei Otto il quale progetta la Multihall di Mannheim nel 1975 come struttura temporanea multifunzionale per una fiera orticola, utilizzando il legno, in particolare legno di cicuta occidentale, che raggiunge altezze fino ai 60 m, sfruttando le ottime proprietà elastiche.

Per la realizzazione di queste strutture possiamo, in grandi linee, definire tre fasi: una prima fase di assemblaggio dei pezzi in piano rispettando il progetto; la griglia piana viene poi deformata per flessione curvandola fino a raggiungere la forma definitiva; si passa poi al fissaggio con cavi d'acciaio o assi in legno arrivando così alla rigidità strutturale finale e alla forma desiderata.

Il progetto del padiglione prevedeva la realizzazione di una copertura in free-form del padiglione che andasse a coprire tre spazi separati tra cui la Multihall, ovvero la sala principale di dimensioni 60 m x 60 m.

Il processo di form-finding per la Mannheim Multihall prevedeva un modello a catena sospesa, modello efficace per creare forme di pura tensione che, una volta invertite diventavano risultati di pura compressione a conchiglia. La copertura era stata inizialmente progettata come un guscio a griglia a doppio strato con una sezione trasversale di listelli di 50 mm x 50 mm, ma dopo diversi test risultava essere insufficiente per riuscire a fronteggiare il carico, per questo motivo, per evitare di inspessire i listelli, gli ingegneri decisero di raddoppiare i listelli l'uno sopra l'altro, creando quattro, invece che due, strati di listelli in legno.

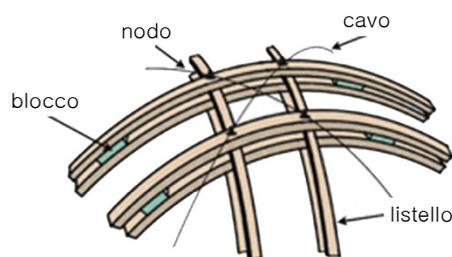


Figura42_schema concettuale della costruzione della gridshell per la Mannheim Multihall

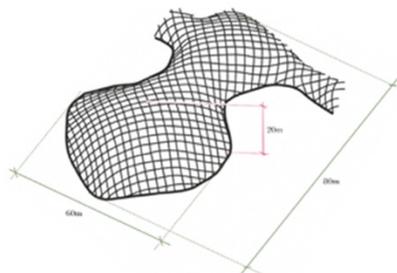


Figura43_Mannheim Multihall, vista dall'interno della struttura



Nel 2002 inizia la collaborazione tra il gruppo di progettazione “Edward Cullinan Architects” e una società di ingegneria per la costruzione del Weald & Downland Open Air Museum nel Sussex, in Inghilterra. La struttura a guscio è in legno di quercia, lunga 50 m, larga 12 m e alta 10 m realizzata con una griglia a doppio strato con asticelle di sezione trasversale 20x40 mm, connesse ogni 40 cm con più di 1000 bulloni. Anche in questo caso la griglia prefabbricata è stata deformata fino al raggiungimento della configurazione a doppia curvatura desiderata.



Figura44_struttura a doppia curvatura del Weald & Downland Open Air Museum

3.3.2 Gridshell in acciaio

La strada verso le sperimentazioni delle gridshell sempre più complesse per forma e per materiali parte dall'opera strutturale di Frei Otto, vista precedentemente, arrivando ad usare materiali sempre più resistenti come l'acciaio. Gridshell di questo tipo possono essere pre-configurate o post-configurate partendo da sottili aste d'acciaio; è un materiale che, rispetto agli altri, si curva più difficilmente, quindi potrebbe essere necessario l'utilizzo di macchinari speciali per trasformare una griglia piana in una griglia a doppia curvatura. Inoltre bisogna tener conto che una volta curvato il singolo elemento strutturale, conserverà quella forma nel tempo quindi non saranno possibili eventuali futuri aggiustamenti

Le Gridshell a forma libera sono strutture che vengono ampiamente utilizzate per edifici pubblici e molte sono delimitate da curve complesse che includono vuoti interni. Ne è un esempio la Queen Elizabeth II Great Court, al centro del British Museum progettato da Foster and Partners. La copertura, (una gridshell pre configurata) che racchiude uno spazio con al centro la Sala di lettura, è in vetro e acciaio composto da 3.312 singoli pannelli di vetro tutti di forme diverse tra di loro, e si trova ad un'altezza di 26,3 m dal pavimento. Copre un'area rettangolare di 70 m x 100 m; la sala di lettura ha forma cilindrica con diametro di 44 m. Le aste utilizzate per la griglia variano di dimensioni da 1 a 3 m. La superficie originale è stata divisa in 4 seguendo le diagonali del rettangolo principale formando delle sottosuperfici per ognuna delle quali si è formata una griglia, e in seguito sono state fuse formando la griglia finale con motivo triangolare.

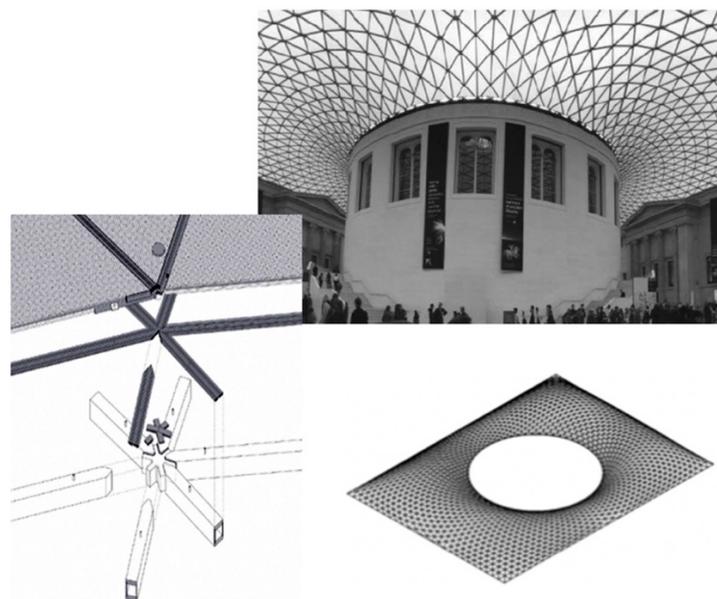


Figura45_copertura
in acciaio e vetro
della Queen
Elizabeth II Great
Court



3.3.3 Gridshell in tubi di cartone

Nel campo delle gridshell, se pensiamo all'utilizzo di materiali da costruzione molto leggeri, eco-compatibili, riciclabili, possiamo fare riferimento ai tubi di cartone e capiamo come vengono utilizzati dagli architetti come Shigeru Ban e Frei Otto nei loro progetti.

Si parte dallo studio dell'innovativo Japanese Pavillion per L'Expo di Hannover nel 2000, incarico affidato a Shigeru Ban che si avvale della consulenza di Frei Otto e dell'ingegnere Buro Happold. Il tema centrale dell'Expo era l'ambiente, quindi l'obiettivo era progettare un padiglione con materiali riciclabili o riutilizzabili riducendo al minimo il numero di rifiuti industriali utilizzando, allo stesso tempo, metodi a bassa tecnologia per la costruzione.

La struttura del padiglione è un guscio a griglia di linee curve con rientranze lungo la lunghezza della struttura che misurava 74 m x 25 m e alta 16 m; è composta da tre cupole realizzate intrecciando tubi di cartone tenuti insieme con lacci di stoffa. Il guscio era composto da 440 tubi continui di cartone del diametro di 120 mm con pareti spesse 22 mm e i lacci di stoffa permettevano la rotazione dei tubi durante il processo di montaggio. La struttura è stata rinforzata con archi in legno lamellare sottoforma di scale e con travi che corrono longitudinalmente.

La membrana interna viene realizzata in 5 strati di polietilene ignifugo, carta non combustibile e al centro un tessuto in fibra di vetro, mentre la membrana esterna è in tessuto di poliestere trasparente rivestito di PVC.



Figura46_struttura del guscio del Japanese Pavillion in tubi di cartone

3.3.4 Gridshell in bamboo

Strutture a guscio costruite con materiali eco-sostenibili possono essere anche in bamboo, un materiale che garantisce grande resistenza e flessibilità e, allo stesso tempo, leggerezza; viene anche definito “acciaio vegetale”. L'utilizzo del bamboo nelle costruzioni ha numerosi vantaggi: essendo un materiale che si rigenera in breve tempo la rende una risorsa versatile, economica, rinnovabile ed ecosostenibile; crescendo così velocemente (più di 60 cm in un solo giorno), ha un'elevata capacità di assorbire CO₂ rilasciando il 35% di ossigeno in più rispetto agli alberi. Risulta avere anche una maggiore resistenza al fuoco rispetto al legno, la combustione avviene infatti a temperature più elevate. Da non dimenticare però che non esistono colture intensive di bamboo perciò il suo trasporto richiede costi di gestione molto alti.

Con un design ispirato al fiore di loto viene costruita la Bamboo Sports Hall nel 2017 in Thailandia, progettata dalla Chiangmai Life Construction con l'aiuto di due ingegneri, rispettando gli standard di sicurezza per resistere ai venti locali ad alta velocità, ai terremoti e a tutte le altre forze naturali.

La struttura si basa su capriate di bamboo prefabbricate con campata di 17 m senza rinforzi e connessioni in acciaio. La durata della vita della sala di bamboo dovrebbe essere di almeno 50 anni.



Figura47_struttura
della Bamboo
Sport Hall

3.3.5 GFRP Glass Fiber Reinforced Polymer

Gridshell con un comportamento meccanico molto simile a quello dei veri gusci possono essere realizzate con lunghi tubi in fibra di vetro, attraversando grandi campate con una bassa quantità di materiale. I GFRP presentano buone capacità di flessione liberando i progettisti dal problema delle giunzioni come si hanno, ad esempio, nel legno. La standardizzazione del processo costruttivo, nodi di connessione standard e profili standard, garantisce dei vantaggi pratici. La Ephemeral Cathedral of Créteil è una struttura a griglia costruita come edificio temporaneo a Parigi nel 2013 dai parrocchiani stessi. È un edificio di 350 m² destinato ad ospitare i parrocchiani durante i due anni di ristrutturazione della loro cattedrale permanente. La struttura a griglia è realizzata con tubi in fibra di vetro fissati con giunti girevoli; questi tubi sono organizzati in tre strati: i primi due formano la griglia primaria e il terzo funge da rinforzo, il tutto è coperto da un rivestimento in PVC. La struttura è ancorata ad un basamento in cemento tramite un sistema di acciaio che permette il trasferimento dei carichi al suolo.

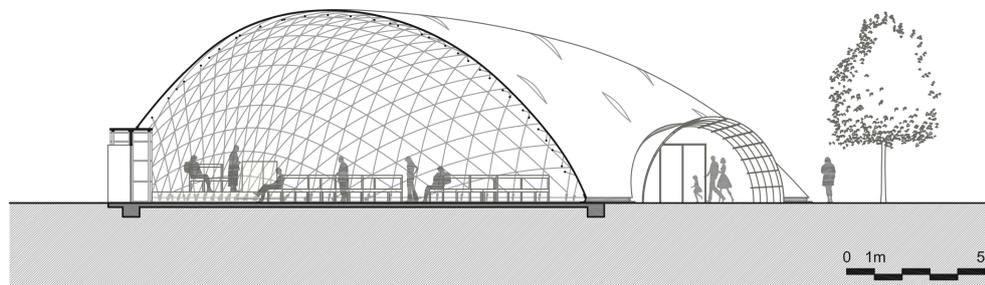


Figura48_progetto della Ephemeral Cathedral con griglia in GFRP

Nel 2017, sempre a Parigi, l'École des Ponts Paris Tech ha realizzato un prototipo di gridshell elastica in materiali compositi cercando di utilizzare un'alternativa alla copertura a membrana arrivando ad un nuovo concetto di ibridazione con una struttura composta da un guscio elastico a griglia rinforzato con un involucro di cemento, usando la griglia come cassaforma per il calcestruzzo di spessore minimo.

3.4 Terra Cruda in Africa

In numerosi contesti, come in alcune zone dell'Africa, dove la manodopera non ha modo di essere qualificata, bisogna evitare l'utilizzo di risorse in esaurimento come il legno per ridurre la costante desertificazione e si rifiuta l'impiego di ferro e cemento visti come elementi "alieni" ed inadeguati al contesto, trova spazio l'utilizzo della terra cruda.

Una minoranza di architetti e ingegneri si oppone all'utilizzo preponderante del cemento armato nelle costruzioni in Paesi come l'Africa rivolgendosi a quello che è invece il sapere tradizionale, utilizzando tecniche di costruzione rispettose dell'ambiente. In Africa, la maggior parte degli edifici presenti in contesti urbani sono costruiti in calcestruzzo (materiale apparentemente più a buon mercato rispetto ad altri) ritenuto però da alcuni non propriamente adatto per essere utilizzato in climi molto caldi in quanto tende ad assorbire il calore. Un design urbano bioclimatico con l'utilizzo di materiali locali e la terra cruda non è un approccio innovativo, al contrario può essere definito un ritorno alle origini, infatti in Senegal le abitazioni tradizionali erano in fango. La terra cruda è un materiale che presenta ottime proprietà igrotermiche e isolanti, che sono fondamentali in climi caldo arido dove le temperature superano i 40 gradi, e che di conseguenza limitano il consumo di energia.

L'architetto Fabrizio Carola ha sperimentato la costruzione di cupole ogivali in terra cruda. Nella tradizione costruttiva di molte aree africane sono molto frequenti le coperture a forma curvilinea; nelle regioni più calde la copertura a semisfera è quella più utilizzata in quanto la radiazione solare che colpisce questa superficie è la minima rispetto alle altre forme e favorisce il raffrescamento in quanto che l'aria calda tende ad andare verso l'alto. La maggior parte di queste coperture sono impostate su murature verticali rettilinee.

Con la cupola ogivale Carola riesce sia ad evitare l'utilizzo di una cassetta in legno necessaria per la realizzazione delle cupole a tutto sesto sia, come è possibile vedere nell'Ospedale di Kaedi da lui progettato, a scoprire la ricchezza formale e spaziale che si può avere modulando, ruotando ed intersecando cupole ogivali di diverse dimensioni. Accanto all'utilizzo della terra cruda Carola ha dovuto utilizzare anche il mattone cotto, in quanto gli edifici costruiti esclusivamente in terra cruda hanno bisogno di attività di manutenzione periodica che non poteva essere trascurata.

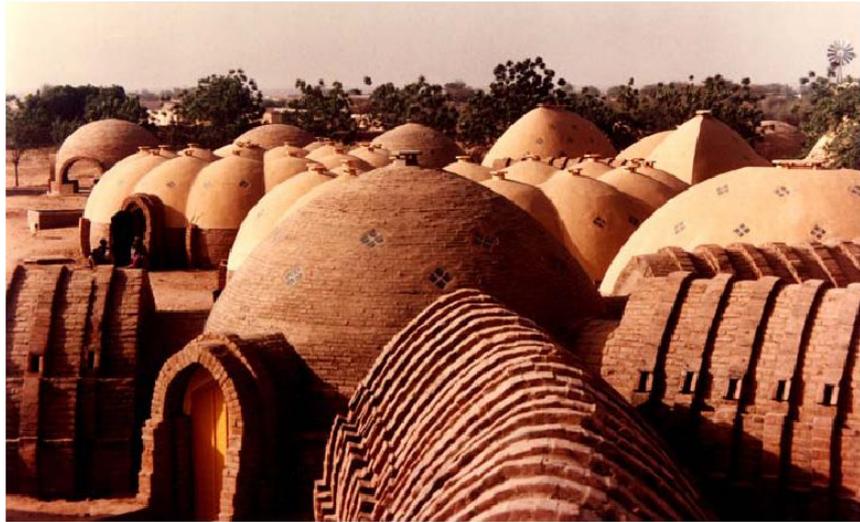


Figura49_cupole ogivali in terra cruda

4. Modellazione della copertura della moschea

L'obiettivo della tesi sarà quello di addentrarsi nel campo della progettazione parametrica per la modellazione della copertura della moschea di Dakar, impostando un algoritmo composto da parametri messi in relazione tra di loro e che possono essere variati in maniera precisa e veloce. Per questo tipo di progettazione saranno utilizzati tre diversi metodi: per prima cosa la copertura verrà modellata utilizzando Grasshopper, plug-in di Rhino, uno degli strumenti di modellazione algoritmica più avanzati, in maniera parametrica. Successivamente la copertura sarà modellata anche con metodo di form-finding (utilizzando il plug-in di Grasshopper Kangaroo) e con il Multi-Body Rope Approach (studio innovativo sul form-finding per le gridshell).

4.1 Progettazione Parametrica

Il disegno convenzionale, alla fine del XIX secolo è stato affiancato da un nuovo approccio, ovvero la ricerca di una forma delle strutture che miri ad un'ottimizzazione dal punto di vista dell'utilizzo di materiali, forma e strutture. Da una modellazione fisica monoparametrica, l'ottimizzazione strutturale si è evoluta verso la ricerca di forma multiparametrica considerando geometrie, forze dinamiche e ambiente.

Il termine "architettura parametrica" è attribuibile all'architetto Luigi Moretti, derivato da una ricerca sul rapporto tra parametri e dimensioni del 1939. Questa ricerca è stata sviluppata per i suoi modelli di stadi sportivi per tentare di ottimizzare la forma dello stadio utilizzando parametri quali: gli angoli di visuale da ogni posizione dello stadio e il costo del calcestruzzo. Queste versioni dello stadio sono state presentate alla Triennale di Milano del 1960. Moretti anticipa quelle che saranno le considerazioni sui rapporti forma-struttura che saranno studiati successivamente.

Moretti sostiene: *"I parametri e le loro interrelazioni diventano [...] il codice del nuovo linguaggio architettonico, la "struttura" nel senso originario del termine [...]. L'impostazione dei parametri e la loro relazione deve essere supportata dalle tecniche e dagli strumenti offerti dalle scienze più attuali, in particolare dalla logica, dalla matematica[...]e dai computer. I computer danno la possibilità di esprimere i parametri e le loro relazioni attraverso una serie di routine (autocorrettive)".* [A. Tedeschi, "AAD_Algorithms-Aided Design: parametric strategies using grasshopper", Le Penseur, settembre 2014 pp. 20].

Dopo la seconda guerra mondiale, il concetto di progettazione parametrica viene ampliato da architetti come Frei Otto e Felix Candela.

In alcuni dei loro progetti come nel Los Manantiales di Felix Candela (analizzato in precedenza), la progettazione parametrica coincide con il form-finding: viene sfruttata la forma della struttura per ottimizzare l'utilizzo di materiale. Questi approcci però verranno poi separati focalizzando il design parametrico sulla la definizione di forme nuove e complesse non necessariamente più efficienti.

Il programma parametrico era una caratteristica innovativa per la progettazione che facilitava molto il collegamento tra gli oggetti; ad esempio, tracciando due rette da uno stesso punto A, ogni variazione di A comportava la variazione delle rette stesse.

Alla fine degli anni '80, il progresso più profondo avviene sviluppando una modellazione che si basa su linguaggi di programmazione che esprimono istruzioni passo passo attraverso la formulazione di un algoritmo con l'obiettivo di trovare soluzioni e forme inesplorate. L'aggettivo algoritmico è sinonimo di parametrico e fa riferimento al fatto che i software di modellazione parametrica sfruttano algoritmi matematici per descrivere i processi e le azioni che si traducono in modelli tridimensionali. Questo tipo di progettazione mette quindi in relazione le varie componenti del modello tra loro o con numeri o con caratteristiche che vengono definiti parametri che permette quindi di modificare con rapidità e precisione le componenti del progetto.

Quindi, nel design che possiamo definire "classico", se dovesse esserci un elemento da modificare all'interno del progetto bisognerebbe rifarlo dall'inizio; l'elemento innovativo e potenziale all'interno della progettazione parametrica è che se cambia un parametro, il progetto non deve essere rifatto da zero. Nel primo caso il modello è definito dal designer, mentre nel secondo caso il modello è definito dal software dopo che il progettista fornisce gli input e le relazioni al programma.

I vantaggi della modellazione parametrica sono diversi:

- velocità di modellazione su geometrie semplici o complesse;
- velocità di modifiche sulle geometrie permettendo una visione immediata delle alternative di progetto;
- sicurezza del dato inserito, essendoci una programmazione a cui far fronte;
- diminuzione dei rischi di errori dovuti ad operazioni manuali e ripetitive da parte di un operatore sono minimizzati;
- rapporto tempi/costi migliorato, questo dovuto al fatto che, mentre per la progettazione tradizionale per ridurre le tempistiche di creazione si assumono nuove risorse aumentando quindi i costi finali, per la

progettazione parametrica si garantiscono automatismi di rielaborazione in poco tempo e quindi con costi inferiori.

Sono nati molti software dedicati alla progettazione parametrica come Revit, ArchiCAD e Rhinoceros ma ciò che li differenzia è che i primi due sono specifici per l'architettura, mentre Rhino oltre che per l'architettura è specifico per il design in generale permettendo di definire forme complesse altrimenti difficili da realizzare. Rhinoceros fornisce un editor di script che permette di eseguire calcoli algoritmici da computer consentendo agli utenti di scrivere le istruzioni e formulare un algoritmo. Parte del successo di questo software è attribuibile al plug-in Grasshopper per la progettazione parametrica, per la generazione ed il controllo di forme tridimensionali complesse.

Grasshopper è uno degli strumenti di modellazione algoritmica più popolari e avanzati che rende possibile la progettazione su in contemporanea alla visualizzazione del modello in Rhinoceros. Presenta innumerevoli comandi, dai più semplici come le geometrie di base ai più specifici come le funzioni. Verrà utilizzato questo software per la modellazione parametrica della copertura della moschea.

Questa tipologia di modellazione permette di descrivere le forme da un punto di vista matematico e geometrico tramite sistemi dinamici e modificabili in tempo reale variando i parametri precedentemente definiti che, a cascata, modificano tutti i successivi parametri collegati in maniera veloce e minimizzando i rischi di errore.

Il potenziale di questo tipo di progettazione sta oggi sempre più diffondendosi; negli ultimi anni infatti le strutture sono disegnate in maniera sempre più irregolare e cercando di dotarle della maggiore spazialità possibile. Perciò risulta molto utile poter modellare elementi curvi in maniera parametrica inserendo "regole" che permettono alla struttura di modellarsi autonomamente adattandosi alle necessità stabilite dal progettista facilitando così le operazioni fatte dai tecnici; ovviamente fare ciò con software tradizionali richiede conoscenze ampie e specifiche da parte degli operatori e potrebbero esserci errori nel risultato finale.

L'interfaccia di grasshopper è composta dal Canvas che rappresenta l'area di lavoro in cui inserire ed elaborare il proprio algoritmo e dal pannello dei componenti che possiamo definire come l'insieme degli elementi con cui viene strutturato l'algoritmo.

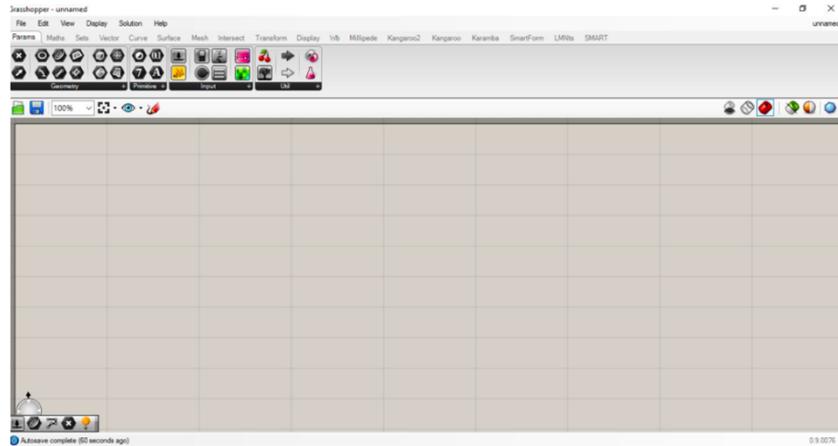


Figura50_immagine del Canvas di Grasshoper

Gli elementi del pannello dei componenti possono essere trascinati dal pannello stesso nel Canvas per la definizione dell'algoritmo; ogni componente (B) presenta sulla sinistra un insieme definito di input (A) molto specifici che servono per soddisfare i requisiti generando un risultato che si traduce in degli output (C) ben definiti e portando alla realizzazione della geometria desiderata.

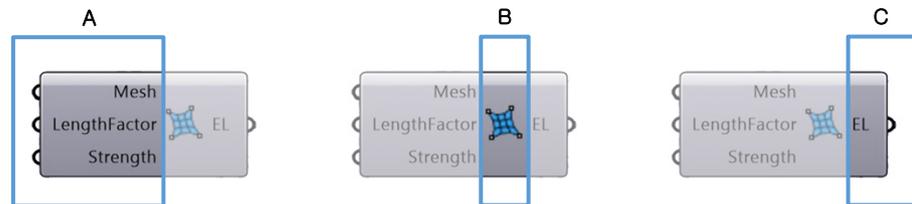


Figura51_parti di un componente

L'algoritmo può essere definito come un insieme non ambiguo di istruzioni correttamente definite, questo significa che gli algoritmi dipendono dalle istruzioni immesse e se queste non saranno definite correttamente, se verranno saltate o invertite, il risultato non sarà corretto.

Nel momento in cui le operazioni precedenti non sono state svolte correttamente, l'algoritmo segnalerà un errore producendo messaggi di avviso all'interno dell'editor specifico.

Andando ad analizzare più nello specifico i componenti, questi assumono colori diversi in base al loro stato: quando si vuole segnalare un avviso diventano arancioni, quando si vuole segnalare un errore assumono colore rosso, un

componente che invece non contiene né errore né avvisi viene mostrato in grigio.

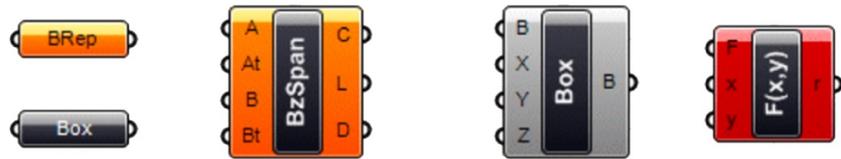


Figura52_ stato delle componenti

L'output finale può essere considerato come un modello geometrico interattivo che risponde alle variazioni degli input modificando l'intera struttura. Possiamo quindi dire che la progettazione parametrica consente agli utenti di modificare un processo piuttosto che un singolo oggetto.

4.1.1 Grasshopper – progettazione parametrica della copertura della moschea

Uno degli obiettivi di questa tesi è quello di progettare la copertura della moschea in maniera parametrica usando Grasshopper. Per fare ciò si è stata intersecata una sfera di raggio variabile R con un piano delle dimensioni di $63 \times 56 \text{m}$ di cui sono stati impostati l'origine e il dominio (per definire il lato più grande e il lato più piccolo dello stesso) per porlo in relazione con il massimo raggio che può assumere la sfera; così facendo la grandezza della sfera rimarrà nei confini imposti dal piano. Oltre ad avere raggio variabile, essa può assumere anche un'altezza variabile rispetto al piano che può essere modificata variando l'apposito "Number Slider".

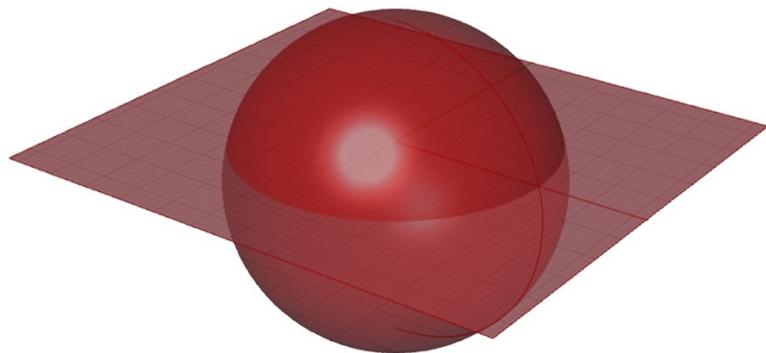
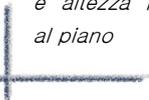


Figura53_sfera
parametrica
variabile in raggio
e altezza rispetto
al piano



Il passo successivo è il disegno parametrico del flesso tra la sfera e il piano: per far ciò si è pensato alla creazione di una superficie tra tre cerchi, i quali si sovrastano l'un l'altro. Il primo passo per ottenere il primo e l'ultimo cerchio parametrici è stato l'intersezione della sfera con due piani ottenendo il cerchio inferiore sul piano principale "Piano1" e il cerchio superiore sul piano "Piano3" di altezza h che varia al variare dell'altezza della sfera.

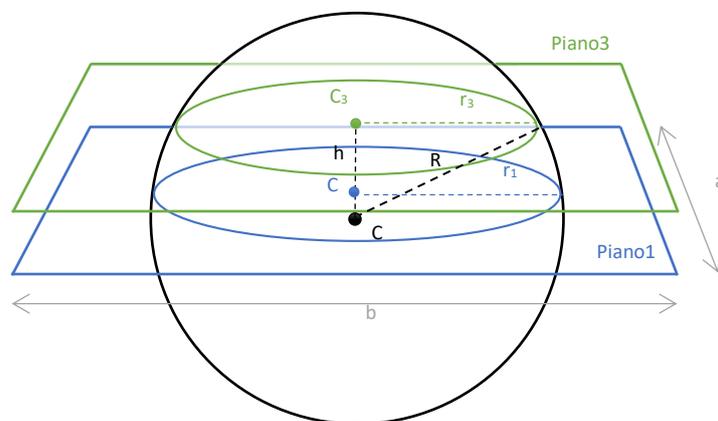
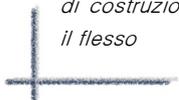


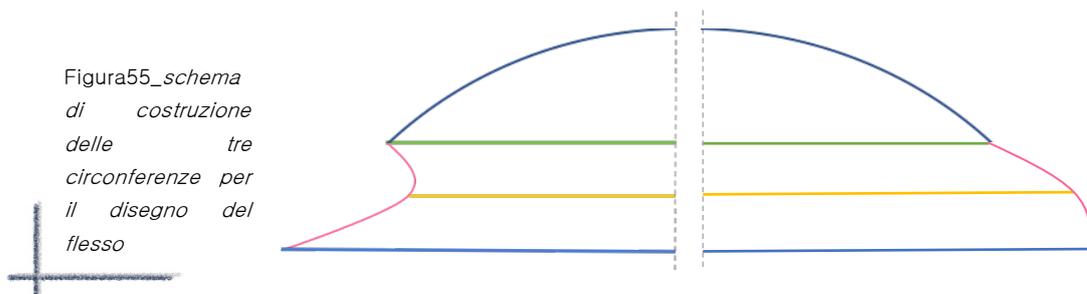
Figura54_schema
di costruzione per
il flesso



Per calcolare il raggio r_3 della circonferenza data dall'intersezione della sfera di raggio R con il Piano3, bisogna tener conto del fatto che la sfera si può alzare e abbassare di un valore h . Come si può vedere dalla Figura45 il raggio r_3 può essere considerato come un cateto del triangolo rettangolo che si forma partendo dal centro della sfera C la cui ipotenusa è data dal raggio della sfera R mentre l'altro cateto corrisponde all'altezza h che è variabile, per cui possiamo ricavarci $r = \sqrt{R^2 - h^2}$. Questo valore ci servirà in seguito per determinare la circonferenza centrale.

Per poter avere un flesso simile a quello della moschea la circonferenza di raggio r_1 non potrà esser data dalla semplice intersezione piano-sfera perché altrimenti si formerebbe un flesso poco percettibile; quindi verrà stabilito un valore F come fattore di scala del raggio r_1 , associato ad un nuovo dominio tale per cui, ancora una volta, le dimensioni della circonferenza non superino quelle del piano. Questo è possibile grazie alla componente "Remap Numbers" che sposta i valori da un dominio numerico ad un altro permettendo che determinate misurazioni rientrino nel dominio dell'obiettivo. Quindi, stabilendo che il valore massimo di $R = a/2$, il fattore per cui posso moltiplicare al massimo r_1 è $F = (a/2)/R$. Il dominio comprenderà tutti i valori da 1 a F .

Per quanto riguarda invece il raggio per la circonferenza centrale bisogna tenere in considerazione quegli che sono i limiti imposti dalle altre due circonferenze affinché il flesso possa essere della forma voluta, ovvero che non spanci verso l'esterno o che non si curvi troppo verso l'interno come mostrato nel disegno delle viste frontali delle circonferenze.



Per cominciare l'altezza della circonferenza centrale sarà pari ad $h/2$; al fine di avere il flesso desiderato stabiliamo che R_2 non sia maggiore del valore di $x = (R_1 - R_3)/2$ e non inferiore al valore di R_3 . Per trovare un valore approssimativo di x utilizziamo il metodo dell'interpolazione lineare che permette di trovare un valore compreso tra due valori noti. In pratica consideriamo i dati come punti di una funzione in cui passa un segmento di retta e considereremo il valore cercato su tale segmento.

Figura56_schema di costruzione della circonferenza centrale



L'equazione di una retta passante per due punti è $y = mx + q$ e le coordinate dei due punti sono riportate nella seguente matrice i cui valori verranno sostituiti nell'equazione:

$$\begin{pmatrix} x & y \\ 0 & h \\ R_1 - R_3 & 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} \rightarrow h = q \\ \rightarrow 0 = m(R_1 - R_3) + q \end{matrix} \rightarrow m = -\frac{h}{R_1 - R_3} \rightarrow y = \left(-\frac{h}{R_1 - R_3}\right)x + h$$

Nel nostro caso la circonferenza del centro ha un valore di $y = h/2$, perciò per avere il valore massimo che può assumere la x per quella circonferenza sarà pari a:

$$\frac{h}{2} = \left(-\frac{h}{R_1 - R_3}\right)x + h \rightarrow -x = \left(\frac{h}{2} - h\right)\left(\frac{R_1 - R_3}{h}\right) \rightarrow x = \frac{R_1 - R_3}{2}$$

Per evitare che si formi invece che un flesso una retta, si rimarrà leggermente al di sotto di questo valore limite.

Una volta ottenute le tre circonferenze, la sfera principale verrà tagliata dal Piano3 mediante la componente "Trim Solid" e verrà individuato un punto appartenente ad ogni circonferenza attraverso i quali verrà fatta passare una curva di interpolazione che rappresenterà la linea guida del flesso (Figura48). Questa curva verrà fatta ruotare attorno ad un asse Z stabilito con origine al centro della sfera ottenendo la superficie finale del flesso voluto.

Per far sì che la copertura inizi ad alzarsi dai bordi è stato creato un loft tra il piano principale e la prima circonferenza variando la sua coordinata lungo l'asse z.

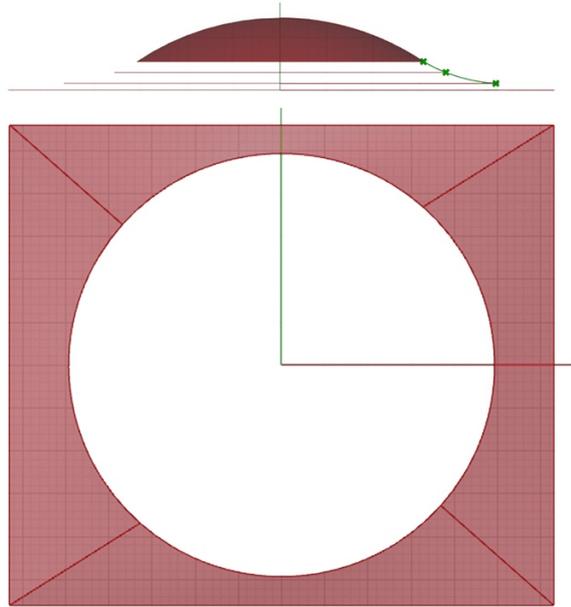
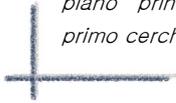


Figura57_linea guida del flesso ottenuta

Figura58_loft tra piano principale e primo cerchio



Ottenuta così lo forma finale della copertura costruita parametricamente, mediante la componente “mesh” è stata disegnata la griglia quadrangolare che rappresenta la struttura.

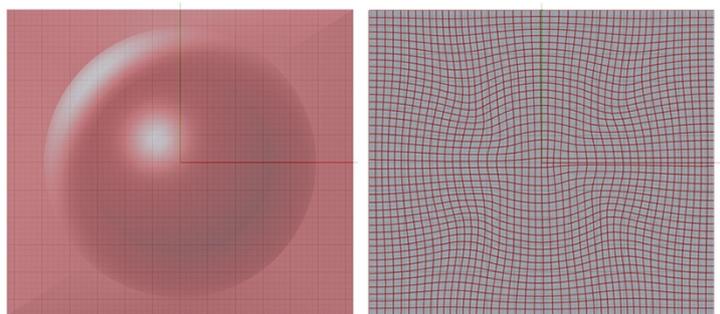
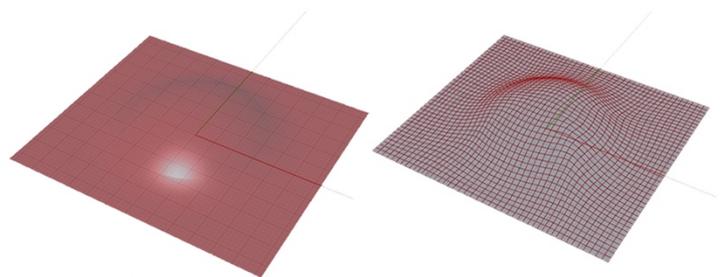


Figura59_mesh e griglia quadrangolare della copertura parametrica. Vista dall'alto, frontale e assonometrica



4.2 Form–Finding

La sperimentazione e l'utilizzo di nuovi materiali nel mondo delle costruzioni necessitano di possedere software sempre più potenti e interattivi per riuscire ad occuparsi di free-form³. Non è sempre possibile riuscire a descrivere queste tipologie di strutture geometricamente; ci si può aiutare mediante costruzione di superfici con una mesh oppure con le NURBS, acronimo che sta per Non Uniform Rational B–Splines. Le Nurbs sono rappresentazioni matematiche della geometria 3D che definiscono tutte le forme (linea, cerchio, arco, curva, solido, superficie a forma libera ecc) con precisione e flessibilità. Più che la definizione di una geometria nel caso di strutture complesse, è più utile definire un algoritmo che verrà di volta in volta implementato per ottimizzare le operazioni evitando le operazioni manuali.

Un software che trova posto all'interno di questo nuovo modo di progettare è Rhinoceros, un software applicativo commerciale realizzato da Robert McNeel & Associates, in cui tutte le entità geometriche sono rappresentate come NURBS. All'interno di Rhino sono disponibili diversi plug-in tra cui Grasshopper e Kangaroo che sono quelli che verranno usati per la modellazione della copertura della Moschea.

“In architettura e ingegneria strutturale, 'form–finding' identifica il processo di progettazione di forme strutturali ottimali utilizzando strumenti e strategie sperimentali, ad esempio modelli fisici per simulare uno specifico comportamento meccanico” [A. Tedeschi, “AAD_Algorithms–Aided Design: parametric strategies using grasshopper”, Le Penseur, settembre 2014, pp. 355]. Possiamo definirlo come una strategia di ottimizzazione in cui viene ricercata la forma più efficiente di un edificio che vada a ridurre al minimo i momenti flettenti nella struttura portante, minimizzando la parzializzazione della sezione degli elementi strutturali in maniera tale che la maggior parte dell'area resistente reagisce ad un solo tipo di sollecitazione: a compressione o a trazione.

Il processo di form–finding si basa su una tecnica ingegnosa, ovvero sul Reverse Hanging Method, che è la tecnica più antica e diffusa di ricerca di forme per archi, volte e conchiglie. Prima che fossero impiegate le nuove tecniche computazionali, venivano utilizzati modelli fisici definiti “sospesi” per la ricerca delle forme ottimali delle strutture.

³ Free form: forme architettoniche complesse, articolate e inconsuete che non seguono primitive geometriche classiche.

Fu lo scienziato inglese Robert Hooke a scoprire, nel 1675, la relazione tra una catena sospesa e un arco a compressione scoprendo che *“la forma della corda, sotto un insieme di carichi e soggetta a forme di pura trazione, se irrigidita e capovolta, corrisponde a un “linea di spinta” di forze di compressione per un arco che supporta lo stesso insieme di carichi.”* [A. Licari, “Il design parametrico per l’ottimizzazione di una copertura reticolare”, Torino, Politecnico di Torino, 2021, pp. 21]. Prendendo una rete e applicando dei carichi sui nodi la rete assumerà una forma di equilibrio dove tutte le funi sono in tensione e che prende il nome di “funicolare”. La geometria viene poi modificata e invertita assumendo una configurazione soggetta a pura compressione, che è l’azione migliore per strutture a guscio o ad arco. Una curva funicolare anche definita “catenaria” è una curva matematica soggetta solo a stati di trazione o di compressione e non a momento flettente, e questo permette di progettare strutture molto sottili e allo stesso tempo molto resistenti.

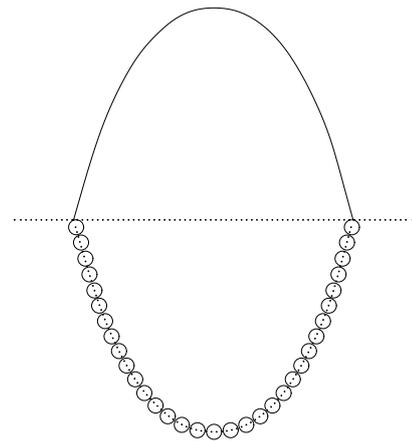
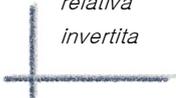


Figura60_curva funicolare e la relativa forma invertita



Forme ideali di un arco soggetto a sola compressione possono variare in base a due condizioni al contorno: il carico applicato e il rapporto campata/alzata.

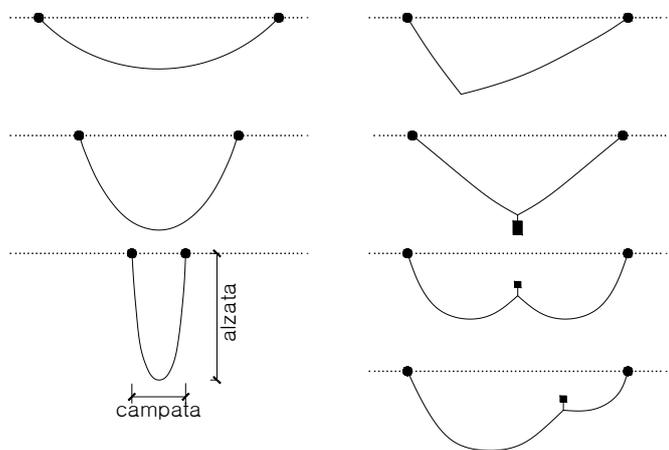
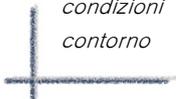


Figura61_diverse forme di un arco al variare delle condizioni al contorno



I primi esempi di form-finding sono stati realizzati attraverso la costruzione di modelli fisici della struttura, la cui forma veniva determinata dalla forza di gravità a cui era soggetta la struttura stessa, fino a raggiungere una condizione di equilibrio.

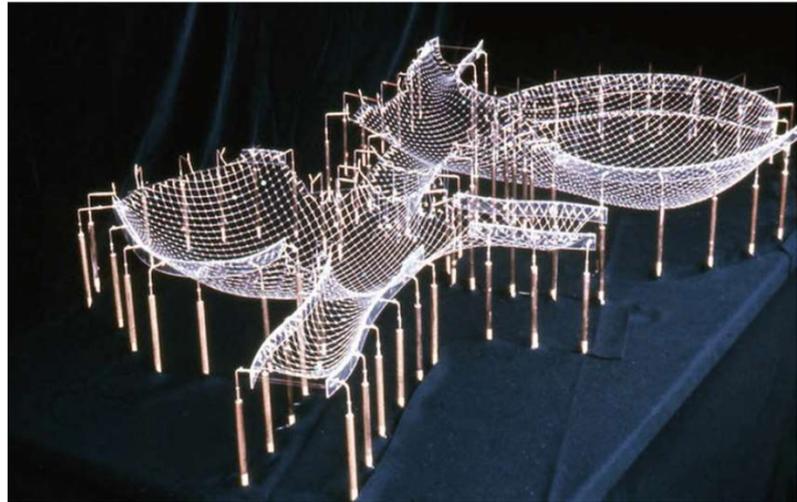


Figura62_modello
a catena sospesa
finale della
Mannheim
Multihall di F. Otto

Possiamo attribuire ad Antoni Gaudì, architetto spagnolo di cultura catalana, quello che può essere definito il primo esempio di form-finding sviluppato all'inizio del XX secolo il cui obiettivo principale era la progettazione di forme geometriche molto complesse associate a momenti flettenti molto bassi. Questo metodo fu abbandonato per circa cinquant'anni finché l'architetto Frei Otto e l'ingegnere Heinz Isler decidono di ispirarsi al modello di Gaudì per progettare strutture leggere facendo buon uso dei materiali. F. Otto voleva esplorare e ottimizzare la forma delle strutture; sviluppa geometrie che dimostrano elevate prestazioni strutturali associate ad un'elevata efficienza del materiale.

H. Isler, nel 1955 realizza un modello fisico sospeso per la ricerca della forma di volte e gusci in cemento armato; tale simulazione è stata realizzata attraverso la sospensione di pezzi di tessuto o membrana bagnati, che sono state successivamente congelate ed invertite. Da questo modello è scaturito anche come cambiando il tipo di tessuto utilizzato, si ottenevano risultati diversi il che ci fa capire l'importanza delle proprietà dei materiali in questo processo.

4.2.1 Kangaroo2

Grasshopper, come abbiamo, da una parte è un potente strumento di modellazione algoritmica utilizzato per generare e controllare forme complesse tramite parametri, formando una sorta di sistema elettrico in cui le varie parti dell'algoritmo iniziano a comunicare fra di loro scambiandosi i dati. È un plug-in in continua evoluzione infatti esistono moltissimi tools prodotti da esperti, tra questi c'è Kangaroo che si occupa di ricerca di forma e che verrà usato per la modellazione in Form-Finding della copertura della moschea, cercando una relazione tra la forma geometrica, i materiali usati e la struttura nel suo comportamento elastico.

Kangaroo si occupa di simulare il comportamento elastico delle strutture facendo un'analogia con sistemi di funi e membrane; viene infatti definito un "laboratorio fisico" da Arturo Tedeschi [A. Tedeschi, "AAD_Algorithms-Aided Design: parametric strategies using grasshopper", Le Penseur, settembre 2014, pp. 485]

Ogni elemento viene considerato come un insieme di masse concentrate definite "particles" che sono collegate tra loro da molle elastiche definite "springs". Queste due componenti possiamo definirle all'interno del Particle-Spring System, sistema che simula il comportamento dei corpi deformabili.

Definendo con maggior precisione i componenti del Particle-Spring System:

- Le Particles sono masse concentrate che cambiano posizione e velocità quando inizia la simulazione.
- Le Springs sono connessioni lineari, quindi senza massa, tra le particles; hanno una loro lunghezza iniziale e una loro rigidità.
- Le Forze (intese come carichi esterni) sono rappresentate da vettori che possono essere applicati solo sulle Particles; nel momento in cui queste forze vengono applicate ogni Particles (o nodo) insieme alle molle che le collegano iniziano a muoversi. Queste forze possono essere dovute alla gravità o ai carichi applicati, ma possono anche essere forze interne dovute alle molle che collegano i nodi. Questi carichi infine serviranno ad elevare o a deprimere la struttura in fase di calcolo.
- I Punti di Ancoraggio sono particles che non cambiano la loro posizione nel corso della simulazione.

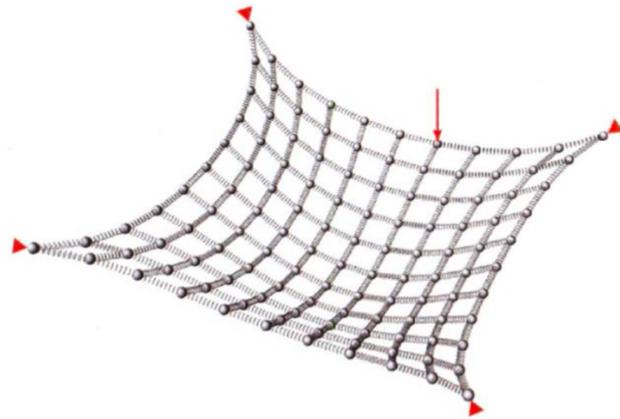


Figura63_componenti
del Particles Spring
System

Questi dati verranno utilizzati dal componente “Solver” che ci farà ottenere la soluzione in termini di calcoli e a video, il quale necessita dei seguenti input:

- carichi applicati sulle Particles;
- punti di ancoraggio;
- componente “Edge Length” per impostare le lunghezze dei bordi di una mesh

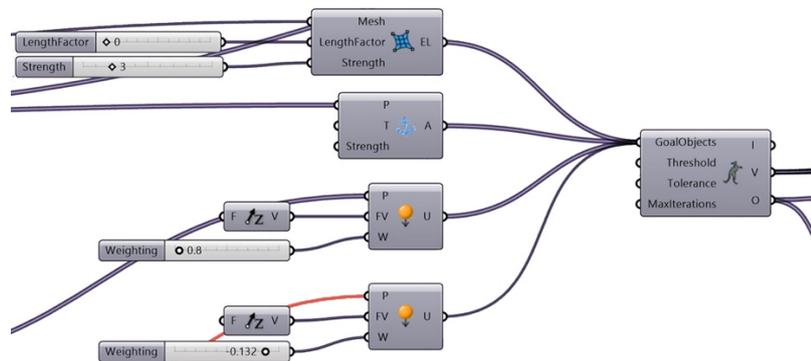


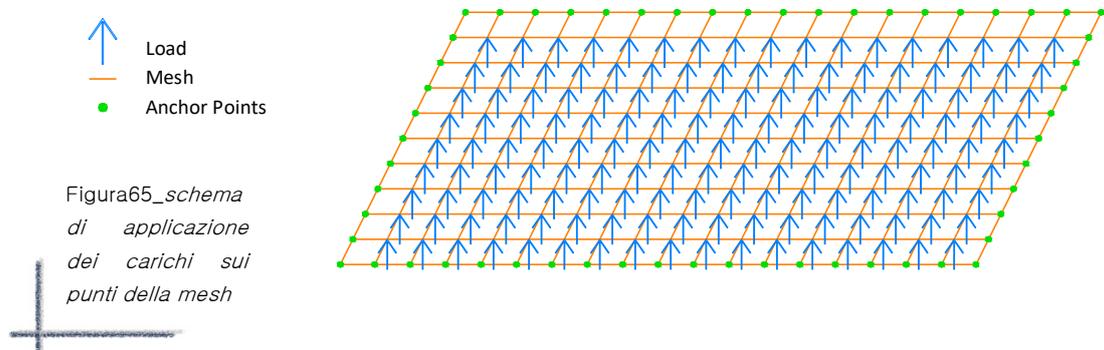
Figura64_componente
Solver di Kangaroo

Tutti questi elementi che interagiscono tra loro, assumeranno una forma finale di equilibrio in cui tutte le forze saranno bilanciate e che sarà in grado di sopportare tutti i carichi applicati.

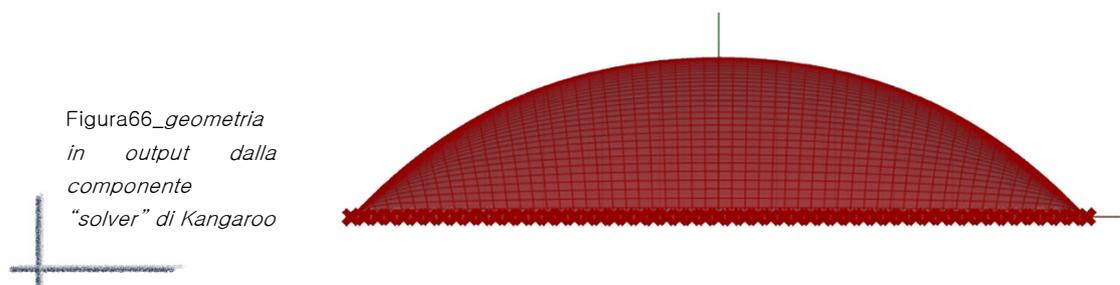
4.2.2 Kangaroo2 – Form Finding della copertura

La forma finale della copertura a doppia curvatura della moschea è stata ricavata, come visto in precedenza, mediante il metodo di form-finding. In questa tesi è stato utilizzato Kangaroo2 per la modellazione in form-finding della copertura per poter fare poi un confronto con quella che è la copertura progettata esclusivamente con Grasshopper.

Sono stati fatti diversi tentativi prima di riuscire a trovare il metodo giusto per la configurazione voluta. Come per la modellazione precedente si è costruito un piano di dimensione 56x63 in modo da renderlo più simile possibile al progetto della copertura della moschea; sulla base di questo piano è stata creata una mesh mediante la componente “Mesh Plane” alla quale sono stati dati come input i valori di grandezza del piano ed il piano stesso. Come punti di ancoraggio sono stati utilizzati tutti i punti presenti sui bordi esterni appartenenti alla mesh in maniera tale che restino fermi nel momento in cui viene lanciata la simulazione. A tutti i restanti punti all’interno della mesh è stato applicato un carico in direzione lungo l’asse Z in maniera tale che la geometria iniziasse a sollevarsi.



Collegando all’input GoalObjects della componente “Solver” la mesh, i punti di ancoraggio, il carico verticale e la componente “Edge Lengths”, si può lanciare un primo calcolo con Kangaroo2. Quello che si ottiene è la seguente forma:



Per poter progettare il flesso per la copertura si è pensato di disegnare una circonferenza di raggio variabile al centro del piano a cui applicare un ulteriore carico orizzontale. Per poter far ciò si sono selezionati i punti della mesh più vicini alla circonferenza a cui è stato applicato il carico. Per poter dare la forma radiale al carico la sua direzione è data dal vettore che parte da ogni punto del cerchio al centro del cerchio stesso. Il flesso ottenuto in questa maniera però non è quello desiderato in quanto risulta essere troppo stretto.

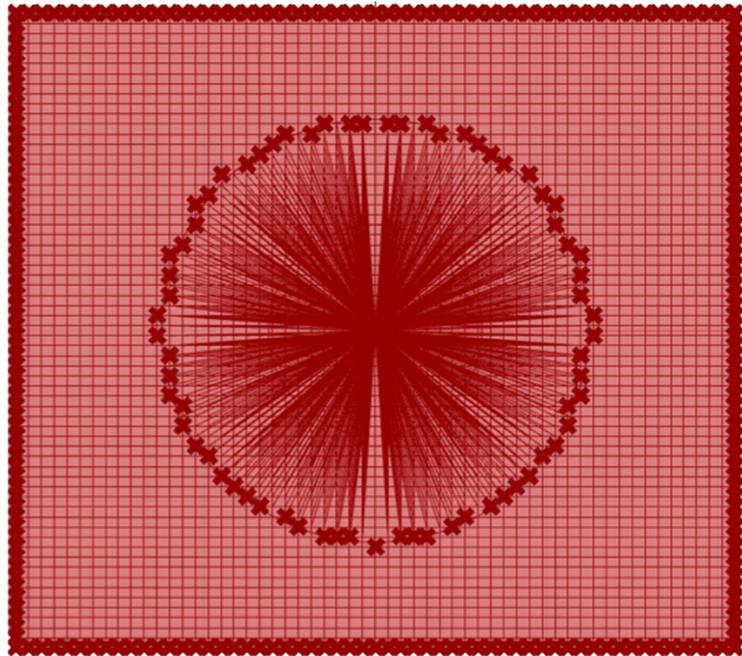
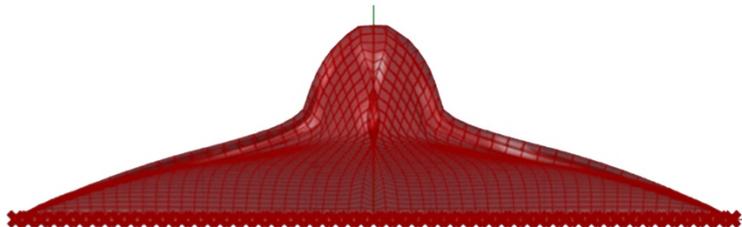


Figura67_applicazione
radiale dei carichi

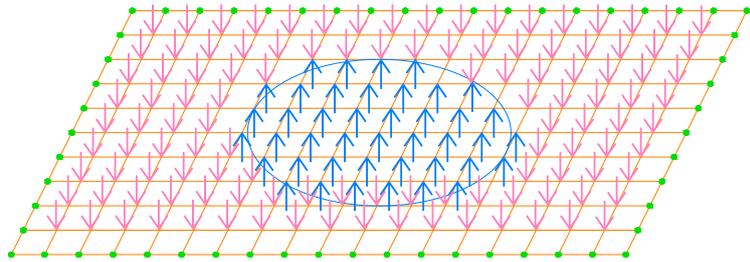
Figura68_geometria
finale in output dal
solver



Un tentativo risolutivo è stato svolto cambiando la direzione di applicazione dei carichi. Prima di tutto mediante la componente “loft” si è creata una superficie tra il piano principale e la circonferenza di cui prima spostata lungo l’asse Z. I punti della mesh racchiusi all’interno della circonferenza sono soggetti a delle forze dirette verso l’alto, in maniera tale che la geometria possa alzarsi, mentre tutti i restanti punti della mesh hanno una direzione di carico opposte, cioè verso il basso. I valori dei due carichi sono diversi e modificabili in base al flesso che si preferisce ottenere.

-  Load
-  Mesh
-  Anchor Points

Figura69_schema
di applicazione
dei carichi sui
punti della mesh



I nuovi carichi sono stati inseriti nella componente "solver" al posto dei precedenti e si sono bilanciati i valori dei carichi fino a raggiungere una forma della copertura il più simile all'originale.

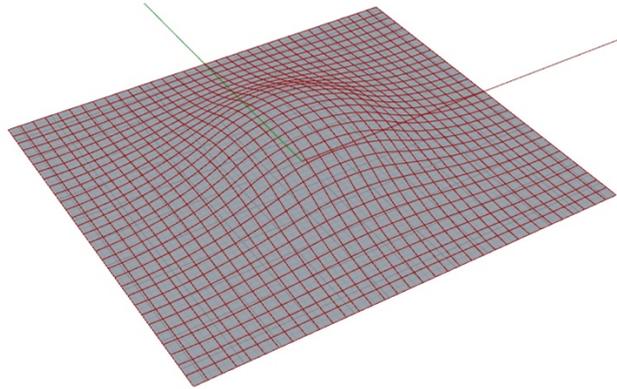
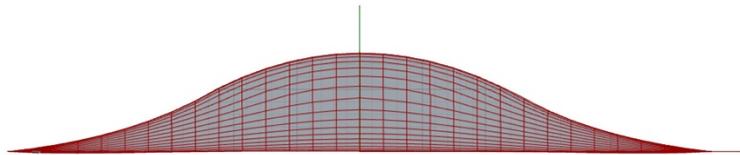


Figura70_geometria
in output dalla
componente solver



4.3 Multi-Body Rope Approach

Il Multi-Body Rope Approach è una metodologia sviluppata dall'Arch. A. Manuello Bertetto in seguito a numerosi studi e ricerche che si pone l'obiettivo di trovare la forma ottimale delle gridshell a maglia quadrangolare e delle volte riducendo le sollecitazioni interne per una data configurazione di carico. Ad oggi lo studio delle free-form combinato all'ottimizzazione strutturale è sicuramente un campo di ricerca molto innovativo.

La ricerca di forma ha subito notevoli sviluppi nel corso dei secoli sulla base dei quali possono essere fatte le successive riflessioni. Già a partire dal XVIII secolo, R. Hooke riconosce che per la ricerca di forma delle strutture che lavorano a compressione, le forme di tensione nelle stesse condizioni di carico potevano essere invertite. Questo argomento continua ad essere approfondito nel XX secolo da A. Gaudi il quale utilizza modelli sospesi nel suo processo di ricerca di forma per i suoi progetti. Ancora F. Otto negli anni '70 sviluppa modelli fisici per la definizione di una metodologia di form-finding, modelli poi promossi come i più appropriati per la definizione delle forme da Heinz Isler.

Negli ultimi anni sono stati effettuati ulteriori studi con nuovi programmi in relazione all'ottimizzazione della forma dei gusci; uno degli obiettivi del metodo è l'ottimizzazione delle strutture al fine di minimizzare il momento flettente all'interno degli elementi resistenti. L'utilizzo delle gridshell e dei gusci a doppia curvatura è stata una svolta importante nel mondo delle costruzioni perché permettono di coprire grandi luci senza l'utilizzo di pilastri intermedi, combinando così estetica, innovazione e funzionalità strutturale. Prima di tutto è importante scegliere la tipologia di griglia da dare al guscio. Quando parliamo di superfici curve, il modo più semplice per la configurazione di una griglia è l'utilizzo di griglie triangolari; ma il fatto che sia più semplice non la rende una scelta efficiente sia da un punto di vista dei costi generali (il prezzo al mq è abbastanza elevato), sia dal punto di vista strutturale (non tutti gli elementi avrebbero una funzione strutturale). Una valida alternativa per questa tipologia di costruzione sono le griglie quadrangolari con facce piane.

Lo studio innovativo sul Multi-Body Rope Approach, pubblicato nel 2004, è stato oggetto di ulteriori studi e rivisitazioni.

Forme diverse sono state ottenute con l'utilizzo del MRA che prevede una simulazione numerica dinamica di una rete sospesa soggetta a forza di gravità formata da funi inestensibili che collegano tra loro delle masse le quali sono soggette a diversi parametri quali il grado delle condizioni di vincolo e il

coefficiente di lasco⁴. Tutte le analisi effettuate con questo approccio per la ricerca di forma sono state eseguite modificando il valore dello spostamento verticale ai nodi. Attraverso la risoluzione del modello matematico⁵ del sistema si ottiene la configurazione statica della rete sospesa e delle masse che la costituiscono definendo in seguito il modello invertito corrispondente al passo finale della rete stessa.



Figura71_ *griglia
sospesa in
laboratorio*

Questo metodo per il calcolo delle forme sospese mira al raggiungimento di una soluzione che vede il momento flettente della struttura a griglia ridotto al minimo.

Lo svantaggio nell'utilizzo del Multi Body Rope Approach affiora nel momento in cui bisogna eseguire il calcolo su un elevato numero di nodi in quanto il tempo di calcolo per questo modello richiederebbe molto tempo. Una soluzione a questo problema può essere la combinazione del metodo MRA con le superfici NURBS le quali raggiungono una configurazione molto simile alla forma sospesa finale.

La forma ottimizzata, durante la progettazione, necessita di analisi di stabilità in quanto potrebbe essere soggetta a collassi e a fenomeni di instabilità totali o parziali. Le gridshell sono strutture che possono essere soggette a tre tipi di instabilità:

- instabilità dell'asta: singolo elemento di tutta la struttura si deforma ma senza intaccare la struttura stessa;

⁴ Coefficiente di lasco: rapporto tra la lunghezza finale della corda e la lunghezza iniziale

⁵ modello matematico basato sul metodo risolutivo Runge-Kutta, metodo per l'approssimazione delle soluzioni delle equazioni differenziali.

- instabilità locale: uno o più nodi possono essere soggetti allo snap-through;
- instabilità globale: la struttura si deforma nel suo insieme.

Ci sono opinioni diverse per verificare una struttura in relazione alle instabilità viste in precedenza. Alcuni studi sostengono che l'operazione giusta da fare sia calcolare la struttura come un modello agli elementi finiti; in altri studi l'opinione è quella che non sia sufficiente un fenomeno di instabilità di un singolo elemento per provocare il collasso della struttura. Altri studi condotti ancora sostengono che il collasso per instabilità di una gridshell è dovuto alla combinazione di fenomeni di instabilità, in cui il singolo elemento della gridshell assume un ruolo preoccupante quando soggetto a imperfezioni geometriche.

Il Multi Body Rope Approach può essere considerata una valida alternativa, innovativa e sperimentale, per il form-finding delle gridshell come già accennato in precedenza, soprattutto quando si deve gestire un numero molteplice di nodi come nel caso di gusci in legno e acciaio.

Un altro dei vantaggi nell'utilizzo di questo metodo è che lavorando con corde inestensibili, è possibile stabilire in anticipo la lunghezza delle corde che corrispondono alle travi delle gridshell nella forma rovesciata; il che è di particolare interesse quando si progettano strutture con elementi standardizzati.

“Il metodo MRA per il form-finding garantisce, nella forma sospesa finale della rete, solo elementi di trazione anche con configurazioni di carico molto complesse. Ciò garantisce solo elementi compressi nella configurazione capovolta”. [A. Manuello, “Multi-body rope approach for grid shells: Form-finding and imperfection sensitivity”, 2020, Elsevier].

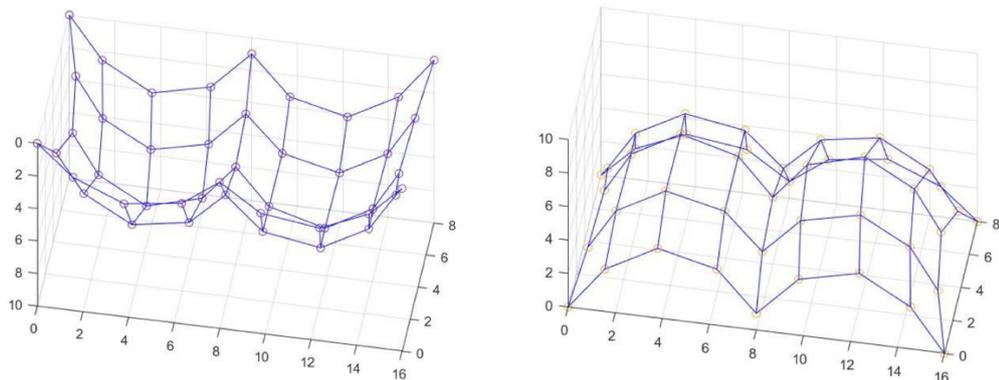


Figura72_ forma sospesa (a sinistra) e forma capovolta (a destra)

Questo metodo è stato sviluppato su MATLAB e configurato per Python, un linguaggio di programmazione, e potrà essere utilizzato in Grasshopper per la visualizzazione della forma.

Il Multi-body Rope Approach verrà messo a confronto per la modellazione della copertura in form-finding ottenuto con il Particle-Spring System tramite Kangaroo. La principale differenza tra i due metodi è il calcolo del sistema di forze che agiscono sui nodi. Nel primo caso, per il calcolo della risultante delle forze su ciascun nodo vengono considerate, insieme al carico esterno, anche le forze dovute agli irrigidimenti elastici e la flessione a cui il nodo viene sottoposto. Nel caso del Multi-body Rope Approach, i nodi sono collegati tra loro da funi tale per cui:

- quando la distanza tra i nodi è inferiore alla lunghezza della fune, questa non darà nessuna reazione;
- quando la lunghezza della fune è uguale alla distanza tra i due nodi, si svilupperanno due forze uguali e contrarie e non viene applicata nessuna flessione.

La configurazione finale della rete sospesa si ottiene mediante equazioni di equilibrio ai nodi, le cui coordinate sono associate ad un passo temporale (Time Step) e caratterizzate dalla velocità con cui i nodi (che hanno una propria massa) cadono con una certa accelerazione. Raggiungono la condizione di equilibrio quando le sollecitazioni risultano essere minimizzate per una data configurazione di carico.

Per la costruzione di edifici con forme libere, il form-finding è uno strumento molto importante, in quanto permette sia la modellazione di forme ottimizzate in termini di distribuzione di forze, sia l'ottimizzazione del numero di elementi di uguale lunghezza che compongono la struttura. Quest'ultimo punto in particolare è un concetto chiave del metodo, ovvero la ricerca di forma caratterizzata da aste aventi il più possibile stessa lunghezza, in quanto è davvero utile nella progettazione di strutture complesse caratterizzate da ampie campate.

4.3.1 MRA per la copertura

Per l'applicazione del metodo del Multi-body alla copertura saranno utilizzate due componenti specifiche: la componente "Multi-body Rope Approach" e la componente "GhcMRAplot". Nella prima dovranno essere specificate in input tutti i dati necessari relativi all'applicazione del metodo su di una data struttura, come lunghezza massima degli elementi ("Max Lengths"), la loro rigidezza ("Stiffness"), la loro massa ("Mass") e le iterazioni massime che modificano lo stato degli elementi ("Max Iterations"). Bisognerà inoltre assegnare i carichi stabilendo i punti sui cui questi carichi saranno applicati ("Loaded Points") e la direzione dei carichi stessi tramite vettori ("Loaded Vectors"). Per gli input "UnConPointS" e "UnCoinPointE" saranno assegnati tutti i punti che sono liberi di spostarsi fino a raggiungere la configurazione finale, mentre agli input "ConPointS" e "ConPointE" saranno assegnati tutti i punti di ancoraggio. Come ultimo input si inserisce il "Boolean Toggle" che possiamo immaginare come una sorta di interruttore che avvia e interrompe il calcolo.

Infine gli output della componente MRA, la quale genererà un insieme di punti che compongono la forma finale, fungeranno da input per la componente "GhcMRAplot" in cui verrà specificata nuovamente la lunghezza degli elementi generando le funi e i nodi della struttura.

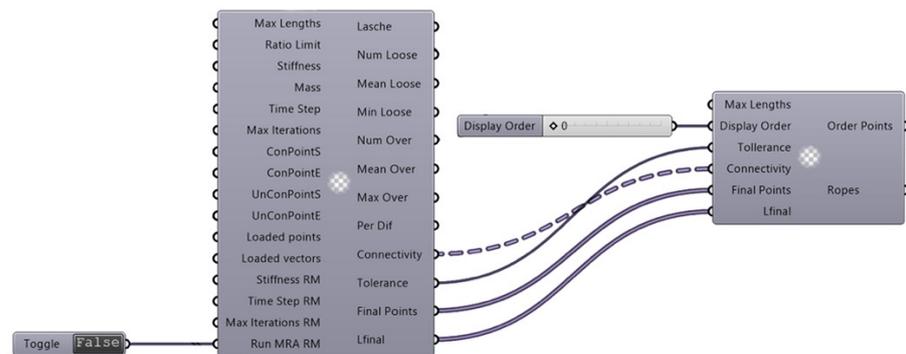


Figura73_componenti del Multi-Body Rope Approach

Per la copertura della moschea è stato disegnato il piano principale di grandezza 63x56 su cui è stata generata una mesh quadrangolare. Per l'assegnazione dei carichi sui punti è stato eseguito lo stesso procedimento fatto per il form-finding con Kangaroo, ovvero selezionando tutti i punti all'interno di una circonferenza appartenente al piano a cui verrà assegnato un

carico lungo z rivolto verso l'alto per permettere alla geometria di alzarsi, e ai restanti punti verrà assegnato un carico lungo z rivolto verso il basso per permettere la formazione del flesso. Questi valori verranno inseriti nella componente MRA per il calcolo ancorando tutti i punti più esterni lungo il piano e permettendo a tutti gli altri lo spostamento. Le prime voci di input della componente per il calcolo della copertura saranno fissate così come mostrato in Figura66 dopo aver fatto diversi tentativi per trovare il giusto equilibrio tra i nodi per la formazione del flesso.

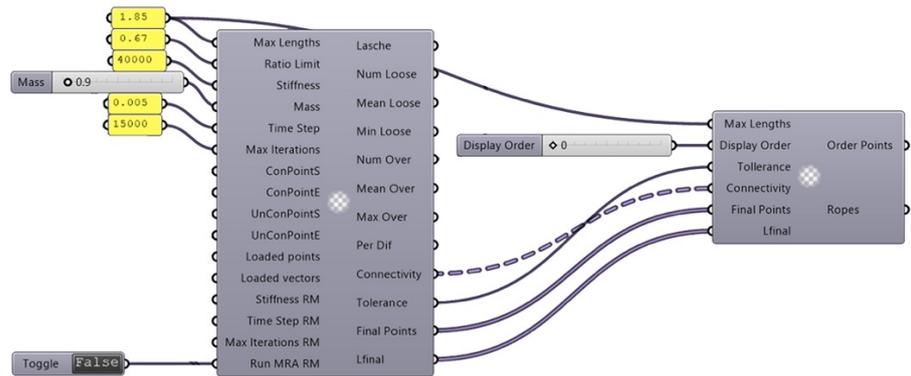


Figura74_valori inseriti nella MRA per generare la forma della copertura della moschea

La forma finale che si ottiene da questo approccio è molto simile a quella ottenuta con il form-finding utilizzando Kangaroo.

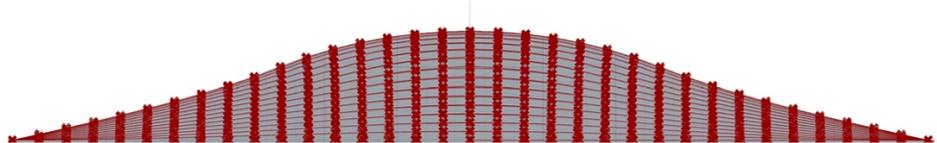


Figura75_forma finale della copertura con MRA

4.4 Ottimizzazione strutturale

Attraverso l'ottimizzazione e l'utilizzo di tecniche sempre più efficienti, si possono ottenere soluzioni ottimali e vantaggiose in relazione al raggiungimento di un determinato fine. Non saranno svolti calcoli veri e propri di ottimizzazione strutturale per la copertura della moschea di cui si occupa questa tesi, ma sarà comunque tenuto in considerazione dal punto di vista pratico e teorico il concetto di ottimizzazione, ed in particolare l'ottimizzazione di forma durante la modellazione con form-finding della copertura.

Entrando nel merito dell'ottimizzazione strutturale, possiamo definirla come *“la ricerca di forma, dimensione e tipologia ottimale di un determinato componente o di una struttura al fine di aumentarne la resistenza o la rigidità oppure ridurre il peso, la freccia massima o il costo di produzione. Nella sua accezione più generale, fa parte dell'ottimizzazione strutturale anche l'ottimizzazione dei materiali: in base alle proprietà prestazionali dei materiali stessi, l'ingegnere deve selezionare ed eventualmente progettarli o modificarli per una specifica applicazione”* [A. Licari, “Il design parametrico per l'ottimizzazione di una copertura reticolare”, [tesi di laurea], Torino, Politecnico di Torino, 2021]

L'applicazione dell'ottimizzazione strutturale permette di individuare la soluzione progettuale più adatta per poter fornire le migliori prestazioni in relazione ad un determinato obiettivo da raggiungere variando, ad esempio, le sollecitazioni sugli elementi strutturali, il materiale utilizzato e quindi anche il materiale di scarto generato da forme non ottimizzate. Esistono in particolare tre tipi di ottimizzazione strutturale: l'ottimizzazione delle dimensioni, l'ottimizzazione topologica e l'ottimizzazione di forma. Tra i vari metodi ci sono grandi differenze concettuali ma utilizzano una procedura simile che consiste nella definizione della geometria iniziale, definizione delle condizioni al contorno, definizione dell'algoritmo ed esecuzione dell'algoritmo e forma finale.

L'ottimizzazione dimensionale è la più utilizzata ed è solitamente eseguita sugli elementi strutturali per cercare di sfruttare al massimo quelle che sono le caratteristiche geometriche dell'elemento stesso come spessore, area, momento d'inerzia ricercando un rapporto tra sollecitazione applicata e sollecitazione massima compreso tra 80% e 90%. È un vero e proprio dimensionamento della struttura, quindi si va ad agire su quelle che sono le dimensioni dei componenti strutturali. Una volta noti la forma geometrica della struttura e le proprietà geometriche degli elementi che la compongono precedentemente citati, si può definire quella che sarà la combinazione ottimale

di ciascun elemento cambiando quella che è la dimensione finale degli elementi stessa con quelle più consone.

Per poter comprendere meglio questa tipologia di ottimizzazione viene illustrato un esempio il quale prevede una trave reticolare soggetta a dei carichi e a condizioni di vincolo in cui bisogna determinare il dimensionamento ottimale della struttura, come ad esempio il diametro degli elementi della trave che riesce a minimizzare o massimizzare una grandezza fisica come la cedevolezza.

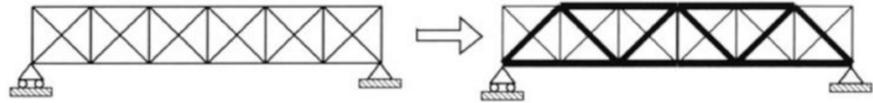


Figura76_ esempio di ottimizzazione dimensionale

Questo tipo di ottimizzazione viene eseguita tendenzialmente in seguito all'ottimizzazione topologica o di forma, in quanto si tratta di definire quella che è la sezione trasversale che ci permette di raggiungere i risultati ottimali.

In particolare, quando ci troviamo di fronte ad un guscio, preso come esempio perché uno dei più pertinenti rispetto all'argomento di tesi, quello che può essere considerato una "variabile di progetto" è lo spessore (variabile o costante). Sappiamo infatti che dal punto di vista strutturale lo spessore di un guscio sottile è un fattore fondamentale del comportamento strutturale in termini di robustezza, fragilità e stabilità; l'obiettivo è quello di riuscire ad avere una distribuzione delle tensioni interne più uniforme possibile, proprio per andare ad evitare quelli che possono essere dei comportamenti a flessione non desiderati.

Una volta note condizioni di progetto come dominio, condizioni al contorno, configurazione geometrica iniziale, interviene quella che è l'ottimizzazione di forma. *L'ottimizzazione di forma* si effettua appunto per determinare la forma migliore e più conveniente, come ad esempio la forma in cui i momenti flettenti sono minimi, la forma con il minor numero di elementi diversi, la forma con la minima richiesta di materiale. Vengono poi registrati e valutati tutti i parametri di forma finali scegliendo la più adatta; è difficile riuscire a trovare la forma perfetta ma attraverso modifiche delle caratteristiche e migliorie dei modelli analizzati si arriva a trovare la struttura ottimizzata.

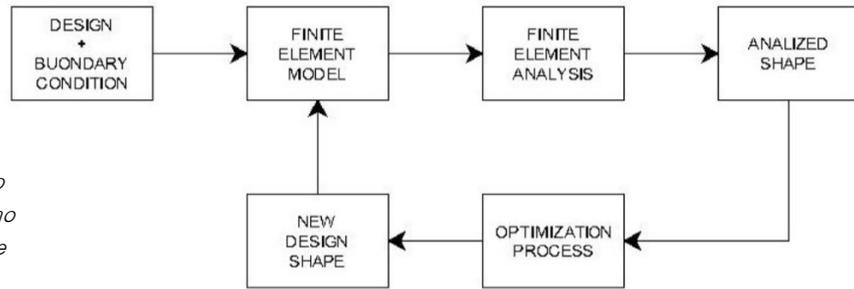


Figura77_ esempio di algoritmo dell'ottimizzazione di forma

Le variabili di progetto che possono essere considerate per questa tipologia di ottimizzazione possono essere ad esempio il diametro di un foro piuttosto che ad esempio il raggio di curvatura. Si parte da quella che è una prima configurazione geometrica su cui si effettuano delle analisi fino ad arrivare ad una geometria ottimizzata.

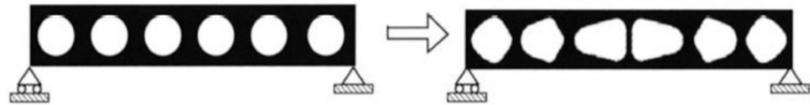


Figura78_ esempio di ottimizzazione di forma

Possiamo anche definire questo processo come “ricerca di forma” proprio in relazione a quello che è l’obiettivo, ovvero la ricerca della forma ottimale per una struttura che rispetti le condizioni e i requisiti di progetto.

Ad oggi per raggiungere i risultati desiderati utilizziamo delle tecniche computazionali avanzate; prima dell’avvento di queste tecniche venivano impiegati modelli fisici che andavano a simulare il comportamento delle strutture. Tra tutte, *l’ottimizzazione topologica* è la tipologia di ottimizzazione strutturale più generale, e consiste nel trovare la miglior distribuzione spaziale possibile del materiale all’interno dello spazio di design, mettendo in relazione quelli che sono i vuoti e i pieni della figura stessa della struttura.

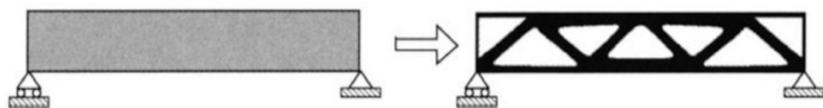


Figura79_ esempio di ottimizzazione topologica

Quando parliamo di densità come in questo caso, non facciamo riferimento al vero e proprio peso del materiale o dell’elemento stesso, ma alla rigidezza che l’elemento riesce a dare alla struttura stessa.

L’ottimizzazione topologica è un metodo di ottimizzazione che non si basa sulla geometria degli elementi ma sul confronto di cifre derivate dall’analisi agli

elementi finiti⁶. Possiamo definirlo come l'unione dei due metodi di ottimizzazione precedenti il cui obiettivo è quello di trovare una forma di una struttura che sia ottimizzata in relazione alle sollecitazioni che dovrebbero sopportare.

La messa in atto di queste tecniche di ottimizzazione è oggi facilitata, ma soprattutto resa possibile, grazie a quelle che sono le innovazioni tecnologiche e cioè grazie al design computazionale che rende possibile l'utilizzo della progettazione parametrica.

Abbiamo già discusso di quella che è la progettazione parametrica e in campo dell'ottimizzazione possiamo utilizzare le variabili parametriche come variabili di ottimizzazione.

Si intuisce quindi il vantaggio di questo metodo rispetto a quelli che sono i metodi tradizionali in quanto si passa da quella che è la logica di rappresentazione della struttura a quella che è la simulazione della stessa mediante algoritmi.

I metodi tradizionali di progettazione strutturale basati su strumenti per il calcolo degli elementi finiti sono sicuramente validi e precisi per quanto riguarda l'analisi delle strutture, ma non permettono di modificare facilmente e soprattutto velocemente il modello come invece è possibile con il modello parametrico. Così facendo si riesce infatti a studiare e analizzare diverse alternative e soluzioni per arrivare alla forma ottimale.

Per poter arrivare a quello che è un design ottimizzato bisogna tenere una considerazione due passaggi fondamentali, ovvero:

- la realizzazione di un design parametrico, individuando parametri per la descrizione del modello;
- lo studio per la configurazione ottimale, al fine di trovare la struttura che meglio andrà a rispondere alla necessità.

⁶ Analisi agli elementi finiti, altrimenti detta FEA – Finite Element Analysis oppure FEM – Finite Element Method, si intende una serie di strumenti software che permettono di effettuare simulazioni ingegneristiche. Tali strumenti riproducono un banco di prova vero e proprio, dove l'elemento analizzato viene sottoposto a sollecitazioni statiche o dinamiche, potendo quindi deformarsi. Come in un banco di prova, siamo interessati alla verifica dei requisiti di progetto da parte del pezzo meccanico. L'ambiente FEM è un ambiente virtuale, dove il prototipo, che è formato direttamente dal file CAD 3D, può essere modificato in pochi istanti e subire un nuovo test di funzionamento.

5.Karamba3D

La copertura della moschea, come abbiamo visto nei precedenti capitoli, è stata modellata utilizzando tre differenti metodi che hanno portato a tre geometrie molto simili tra loro. Ognuna di esse sarà sottoposta ad un'analisi strutturale per stabilire quale sezione, data la forma complessa, riesce a resistere alle condizioni di carico a cui sarà sottoposta. Per svolgere questa analisi viene utilizzato Karamba3D, uno strumento di ingegneria strutturale parametrica e plug-in di Grasshopper. È un prodotto della "Clemens Preisinger" in collaborazione con lo studio "Bollinger und Grohamann ZT GmbG" di Vienna. *"Karamba 3D è un solutore FEM parametrico, ossia capace di comprendere il linguaggio del codice di input, di processare i dati mediante FEA, ottimizzando il tempo di calcolo e le operazioni e, di decodificare il codice per rendere accessibili le informazioni e il contenuto."* [M. Salamino, "Field-Driven Optimization of an aggregated Free Form Structure", Torino, Politecnico di Torino, 2020, pp. 57] .

Il codice richiede come input delle geometrie, che vengono analizzate e trasformate in elementi strutturali per essere sottoposti ad una simulazione strutturale statica la quale calcola il modo in cui la struttura reagisce alle forze e ai carichi applicati. L'algoritmo che viene generato restituisce la forma, le sollecitazioni a cui sarà soggetto ogni elemento e gli spostamenti che subirà la struttura.

Nella barra degli strumenti di Karamba3D sono presenti tantissime componenti, ma saranno analizzate nel dettaglio quelle che saranno utili per la tesi.

Si può definire la componente "Assemble" come una delle componenti fondamentali che sono state usate in quanto raccoglie tutti i dati da prendere in considerazione per l'analisi strutturale come: gli elementi su cui eseguire l'analisi (possono essere monodimensionali come linee ma anche bidimensionali), i carichi, i vincoli, la tipologia di trave, la sua dimensione e il relativo materiale.

Gli elementi linea intesi come aste della struttura passano dalla componente "Line to Beam" per la definizione degli elementi trave che saranno soggette a forze assiali, di taglio e di momento flettente.

Per la simulazione del comportamento strutturale devono essere inseriti i carichi che andranno ad influire sulla struttura. Ci sono diverse tipologie di componenti di carico che fanno parte di Karamba; quella che verrà utilizzata nella tesi è la componente "Loads" nella quale è possibile decidere il tipo di carico da applicare da un menù a tendina. In questo caso sarà selezionata la voce "Gravity" per il carico permanente strutturale, che calcola la forza dovuta al

peso proprio di tutti gli elementi di cui si compone la struttura. Per tutti gli altri carichi permanente non strutturali e variabili come carico vento, carico neve, carico di manutenzione, verrà selezionata la voce “Points” in “Loads” in cui saranno necessari il valore del carico e i punti in cui assegnarlo come input.

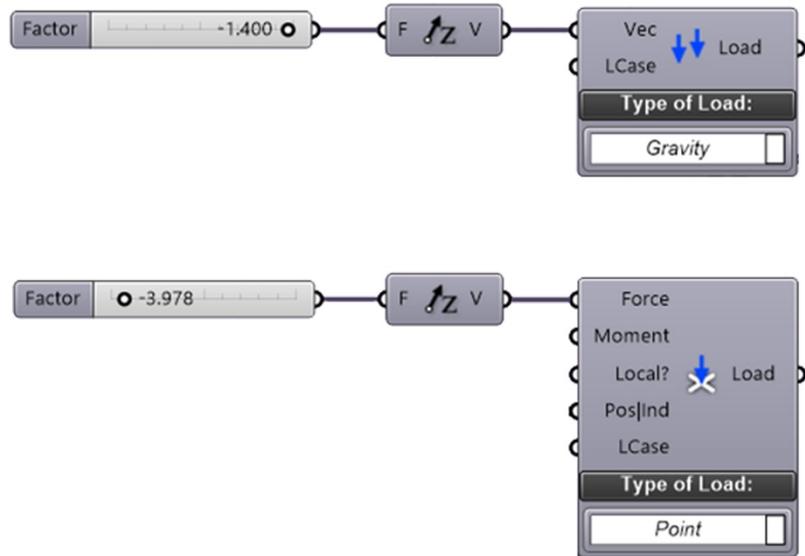


Figura71_componenti di carico di Karamba3D

Importanti per la l’analisi sono i punti in input nella componente “Support” ovvero i punti in cui la struttura è vincolata. Si possono selezionare fino a 6 gradi di libertà che corrispondono a tre traslazioni T_x, T_y, T_z e tre rotazioni R_x, R_y, R_z . Anche questi punti saranno input dell’”Assemble”.



Figura72_componente Support di Karamba3D

Karamba permette la definizione delle proprietà strutturali come il materiale e la sezione trasversale essendoci già preimpostata una libreria di Karamba. Per la selezione del materiale si utilizza la componente “MatSelect” grazie al quale si possono selezionare sia il materiale che le diverse proprietà del materiale. Per la definizione della sezione trasversale è possibile specificarla nella componente “CrosSecRSelect”; anche per questo Karamba dispone già di una sua libreria in cui si possono definire i parametri “Country”, “Shape” e “Family”.

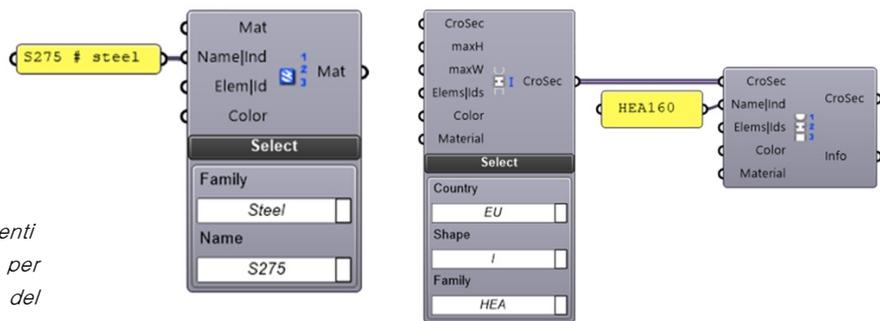
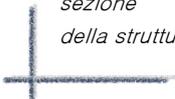


Figura73_componenti
di Karamba3D per
l'assegnazione del
materiale e della
sezione trasversale
della struttura



Una volta definiti tutti questi parametri e dati come input in “Assemble Model” viene generato un modello come output che verrà inserito nella componente “Analyze” per l’analisi FEM da cui sarà poi possibile studiare gli spostamenti, le deformazioni e sollecitazioni utili per le verifiche di resistenza.

5.1 Analisi strutturale della copertura della moschea

Per l'analisi FEM con Karamba3D della gridshell della moschea, è stato eseguito il medesimo procedimento per le tre geometrie modellate. Come prima cosa sono stati trasformati in travi tutte le linee che compongono le tre geometrie mediante il "LineToBeam". Sono stati definiti come "Support" tutti i punti più esterni che compongono la copertura e aventi coordinata Z pari a zero e sono stati bloccati per le rotazioni e per le traslazioni. Come materiale è stato inserito nell'input del "MatSelect" l'acciaio S275 e si sono considerate le travi HEA con una sezione che sarà da verificare.

Per quanto riguarda i carichi bisogna considerare che oltre al carico permanente strutturale bisogna calcolare il carico permanente non strutturale di cui la copertura si compone: pannelli in vetro alternati a pannelli in vetro fotovoltaico. I pannelli in vetro hanno un peso di $2,5 \text{ kg/m}^2$ ogni mm di spessore, e in questo caso è stato considerato un vetro di spessore 10 mm; per i vetri fotovoltaici è stato considerato un peso di 35 kg/m^2 .

Per il calcolo del peso permanente non strutturale su ogni nodo è stata considerata una lunghezza di riferimento tra i nodi di 1,85m calcolata in modo approssimativo mediante la componente "Length".

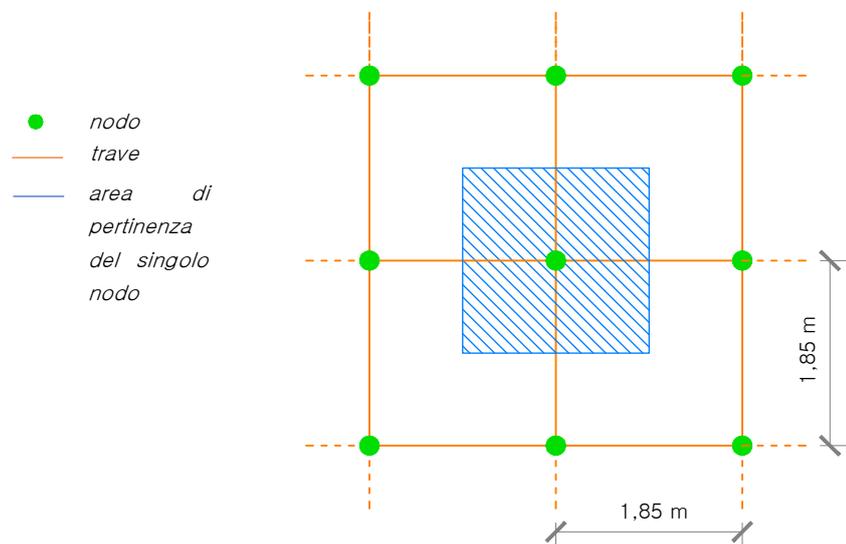


Figura74_schema
per il calcolo del
carico sul singolo
nodo

Calcolo dei carichi permanenti non strutturale:

- pannelli in vetro
 $2,5 \text{ kg/m}^2 * 10 = 25 \text{ kg/m}^2$
 $25 \text{ g/m}^2 * (1,85 \text{ m})^2 = 85,56 \text{ kg}$

- pannelli in vetro fotovoltaico
 $35 \text{ kg/m}^2 * (1,85 \text{ m})^2 = 119,78 \text{ kg}$

Metà della superficie totale della copertura è composta da pannelli in vetro, l'altra metà da pannelli in vetro fotovoltaico. Per il calcolo su del carico su di un nodo generale viene considerato metà peso del vetro e metà peso del vetro fotovoltaico. Perciò si avrà un valore di carico permanente non strutturale pari a: $G_2 = 102,67 \text{ kg} = 1,02 \text{ kN}$.

È stato considerato come carico variabile il carico di manutenzione pari a $q_k = 0,5 \text{ kN/m}^2$ come da normativa riferita a "Coperture accessibili per sola manutenzione e riparazione". Sul singolo nodo sarà applicato un carico di manutenzione pari a $Q = 0,5 \text{ kN/m}^2 * ((1,85 \text{ m})^2) = 1,71 \text{ kN}$.

Il calcolo strutturale con Karamba è stato fatto calcolando una combinazione di carico allo stato limite ultimo così da calcolare le azioni nel modo più sfavorevole per la struttura, moltiplicando i carichi per i coefficienti di sicurezza di seguito riportati.

$$F_d = \gamma_{G1}G_1 + \gamma_{G2}G_2 + \gamma_QQ$$

G_1 = carichi permanenti strutturali [kN]

G_2 = carichi permanenti non strutturali [kN]

Q = carichi variabili [kN]

γ = coefficienti di sicurezza:

- $\gamma_{G1} = 1,3$
- $\gamma_{G2} = 1,5$
- $\gamma_Q = 1,5$

In questo caso, dovendo inserire i carichi all'interno di Karamba3D, il carico permanente strutturale (G_1) e non strutturale (G_2) saranno considerati separatamente, in quanto la componente "Load Gravity" di Karamba calcola in automatico il carico strutturale in base al tipo di sezione trasversale selezionata. Quindi alla precedente componente verrà aggiunto un fattore di moltiplicazione pari al coefficiente di sicurezza dei carichi permanenti. Nel calcolo manuale dei carichi allo SLU verrà considerato solo quello permanente non strutturale.

$$F_d = \gamma_G G_2 + \gamma_Q Q = (1,5 \text{ kN} * 1,02) + (1,5 * 1,71 \text{ kN}) = 4,095 \text{ kN}$$

Il valore ottenuto sarà inserito nella componente "Load Point" lungo l'asse z in direzione verso il basso.

Una volta stabiliti tutti questi valori e dati in input alla componente "Assemble" può essere eseguita l'analisi per verificare le sezioni trasversali selezionate.

Per le verifiche di resistenza strutturale viene utilizzata la componente “BeamForces” la quale restituisce i valori di sforzo normale N, taglio T e momento flettente M. Al fine di eseguire tale verifica le tensioni nei punti maggiormente sollecitati devono essere inferiori al limite di snervamento f_{yk} che in questo caso risulta essere di 275 N/mm^2 diviso per il coefficiente di sicurezza $\gamma_{M0} = 1,05$ che rappresenta il coefficiente di sicurezza per la resistenza e la stabilità.

Le successive operazioni saranno svolte allo stesso modo per tutte e tre le coperture modellate con i tre diversi metodi.

Per la verifica della resistenza a compressione viene selezionato il valore più grande di sforzo normale a cui è soggetto il singolo nodo tale per cui:

$$\sigma_x = \frac{N}{A} < f_{yk}/\gamma_{M0}$$

N = sforzo normale [kN]

A = area della sezione portante [m^2]

Per la verifica della resistenza a flessione della copertura viene considerato il momento flettente massimo in un dato nodo tale per cui:

$$\sigma_z = \frac{M}{W} < f_{yk}/\gamma_{M0}$$

M = momento flettente [kNm]

W = modulo di resistenza [m^3]

Una volta calcolate e verificate singolarmente le resistenze alle tensioni relative allo sforzo normale e al momento flettente, viene effettuata la verifica di resistenza alla pressoflessione, combinando le due precedenti.

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{W} < f_{yk}/\gamma_{M0}$$

Mediante l'applicazione della formula di Jourawsky viene effettuato il calcolo delle tensioni tangenziali della sezione sollecitata a taglio.

$$\tau = \frac{T * S_x}{I_x * b} < f_{yk}/\gamma_{M0}$$

T = taglio [kN]

S_x = momento statico [m^3]

I_x = momento di inerzia [m^4]

B = larghezza della sezione [m]

Infine, mediante l'applicazione della formula di Von Mises saranno combinati i valori delle tensioni σ e τ rispetto alla sezione resistente. La formula è di seguito riportata:

$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_z + 3\tau^2} < f_{yk}/\gamma_{MO}$$

5.1.1 Analisi strutturale della copertura parametrica

Per la copertura parametrica costruita su Grasshopper, dopo varie prove con le diverse tipologie di sezioni trasversali, risulta verificata la sezione HEA 160. Il nodo più sollecitato a compressione è soggetto a valore massimo di sforzo normale pari a $N = -576,25$ kN.

L'area della sezione risulta essere pari a $A = 38,8$ cm².

Ricordiamo il limite di snervamento pari a $f_{yk} = 275$ N/mm²

Viene calcolata la resistenza a compressione della copertura:

$$\sigma_x = \frac{N}{A} = \frac{576.250 \text{ N}}{3880 \text{ mm}^2} = 148,51 \text{ N/mm}^2 < f_{yk}/\gamma_{M0}$$

Il valore massimo di momento flettente calcolato risulta essere pari a $M = 18$ kNm.

Il valore del modulo di resistenza per tale sezione trasversale risulta essere pari a $W = 220$ cm³.

Viene calcolata la resistenza a flessione della copertura:

$$\sigma_z = \frac{M}{W} = \frac{18.000.000 \text{ Nmm}}{220.000 \text{ mm}^3} = 81,81 \text{ N/mm}^2 < f_{yk}/\gamma_{M0}$$

Si verifica la resistenza a pressoflessione della sezione:

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{W} = 148,51 \text{ N/mm}^2 + 81,81 \text{ N/mm}^2 = 230,32 \text{ N/mm}^2 < f_{yk}/\gamma_{M0}$$

Il valore massimo di taglio risulta essere pari a $T = 26$ kN.

Il momento statico S_x viene calcolato come:

$$S_x = y_G * A$$

y_G = coordinata baricentro

A = area della sezione trasversale

Per una sezione di tipo HEA 160 $S_x = 76 \text{ mm} * 3880 \text{ mm}^2 = 294.880 \text{ mm}^3$.

Il momento di inerzia $I_x = 1673$ cm⁴ e la larghezza della sezione $b = 160$ mm.

Viene calcolata la resistenza alle sollecitazioni di taglio della copertura:

$$\tau = \frac{T * S_x}{I_x * b} = \frac{26.000 \text{ N} * 294.880 \text{ mm}^3}{16.730.000 \text{ mm}^4 * 160 \text{ mm}} = 2,86 \text{ N/mm}^2 < f_{yk}/\gamma_{M0}$$

Per la combinazione delle tensioni si applica la formula di Von Mises, come visto nel paragrafo precedente, in diversi punti della sezione resistente che risultano distribuiti nel seguente modo:

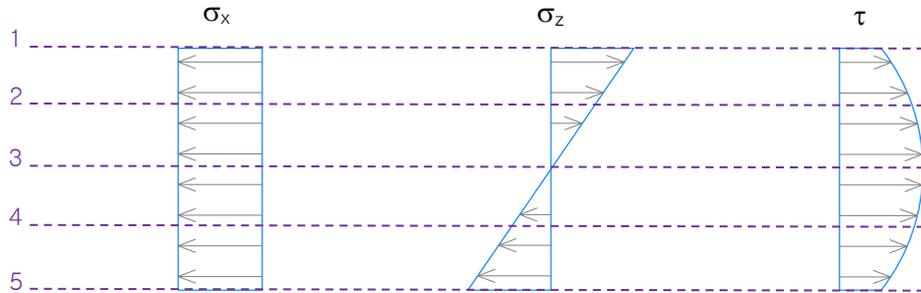


Figura75_diagramma delle tensioni

1. $\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_z + 3\tau^2} < f_{yk}/\gamma_{MO}$
 $\sqrt{(-148,51 \text{ N/mm}^2)^2 + (81,81 \text{ N/mm}^2)^2 - (-148,51 \text{ N/mm}^2 * 81,81 \text{ N/mm}^2) + 3(2,86 \text{ N/mm}^2)^2} = 202,29 \text{ N/mm}^2$
2. $\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_z + 3\tau^2} < f_{yk}/\gamma_{MO}$
 $\sqrt{(-148,51 \text{ N/mm}^2)^2 + (81,81/2 \text{ N/mm}^2)^2 - (-148,51 \text{ N/mm}^2 * 81,81/2 \text{ N/mm}^2) + 3(2,86 + 1,43 \text{ N/mm}^2)^2} = 172,79 \text{ N/mm}^2$
3. $\sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau^2} < f_{yk}/\gamma_{MO}$
 $\sqrt{(-148,51 \text{ N/mm}^2)^2 + 3(2,86 * 2 \text{ N/mm}^2)^2} = 148,84 \text{ N/mm}^2$
4. $\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_z + 3\tau^2} < f_{yk}/\gamma_{MO}$
 $\sqrt{(-148,51 \text{ N/mm}^2)^2 + (-81,81/2 \text{ N/mm}^2)^2 - (-148,51 \text{ N/mm}^2 * (-81,81/2 \text{ N/mm}^2)) + 3(2,86 + 1,43 \text{ N/mm}^2)^2} = 150,75 \text{ N/mm}^2$
5. $\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_z + 3\tau^2} < f_{yk}/\gamma_{MO}$
 $\sqrt{(-148,51 \text{ N/mm}^2)^2 + (-81,81 \text{ N/mm}^2)^2 - (-148,51 \text{ N/mm}^2 * (-81,81 \text{ N/mm}^2)) + 3(2,86 \text{ N/mm}^2)^2} = 128,93 \text{ N/mm}^2$

Su Karamba3D è possibile vedere quali sono le zone maggiormente sollecitate e soggette ad un maggior spostamento indicate dai vari colori. Nel caso della copertura parametrica costruita interamente con Grasshopper le sollecitazioni e gli spostamenti risultano maggiori nelle seguenti zone.

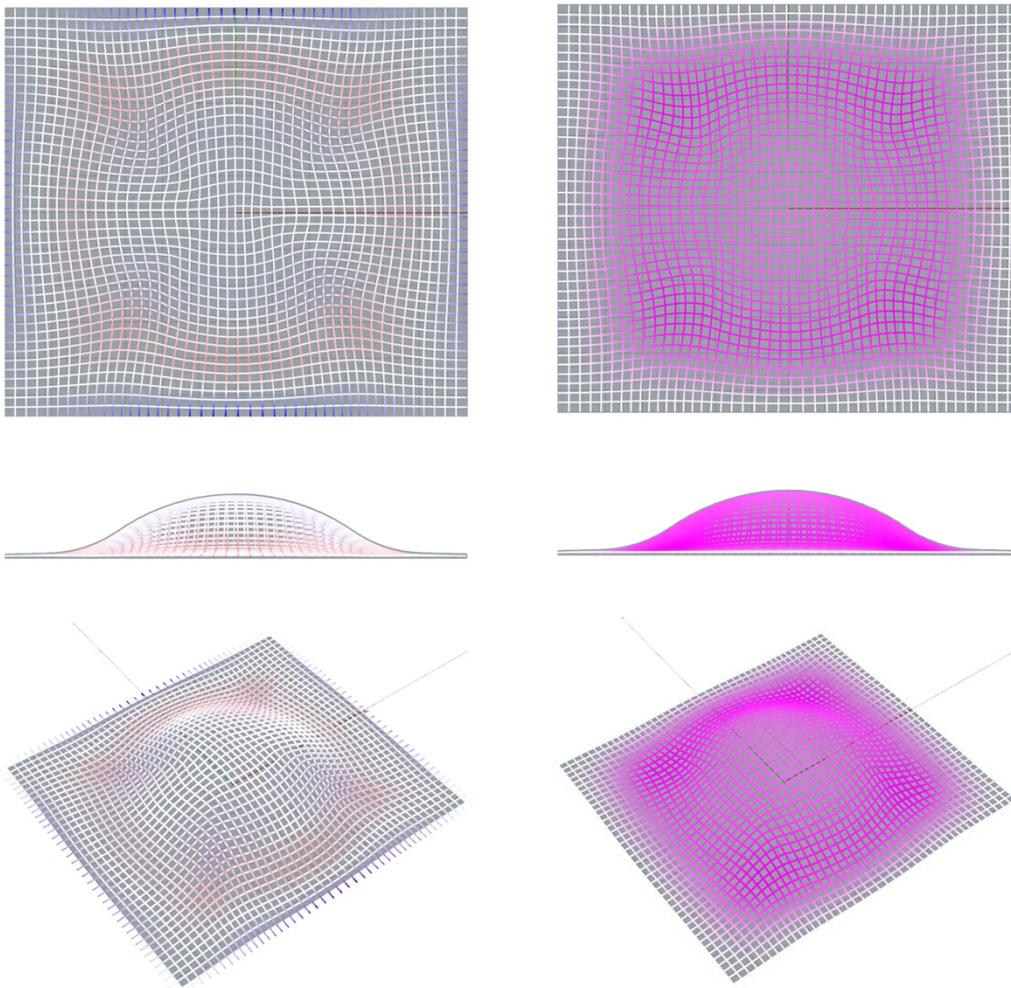
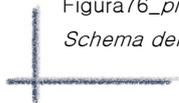


Figura76_pianta, vista frontale e assonometria della copertura parametrica soggetta a carico.
 Schema delle sollecitazioni (a sinistra) e spostamenti (a destra).



5.1.2 Analisi strutturale della copertura in form-finding con Kangaroo

Per la copertura costruita utilizzando il form-finding con Kangaroo, risulta verificata la sezione HEA 120.

Il valore massimo sul singolo nodo di sforzo normale calcolato è pari a $N = -424,46$ kN.

L'area della sezione risulta essere pari a $A = 25,30$ cm².

Viene calcolata la resistenza a compressione della copertura:

$$\sigma_x = \frac{N}{A} = \frac{424.460 \text{ N}}{2530 \text{ mm}^2} = 167,77 \text{ N/mm}^2 < f_{yk}/\gamma_{M0}$$

Il valore massimo di momento flettente calcolato risulta essere pari a $M = 3,5$ kNm.

Per il calcolo della tensione consideriamo il valore del modulo di resistenza, per tale sezione trasversale, pari a $W = 106$ cm³.

Viene calcolata la resistenza a flessione della copertura:

$$\sigma_z = \frac{M}{W} = \frac{3.500.000 \text{ Nmm}}{106.000 \text{ mm}^3} = 33,01 \text{ N/mm}^2 < f_{yk}/\gamma_{M0}$$

Si verifica la resistenza a pressoflessione della sezione:

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{W} = 167,77 \text{ N/mm}^2 + 33,01 \text{ N/mm}^2 = 200,78 \text{ N/mm}^2 < f_{yk}/\gamma_{M0}$$

Il valore massimo di taglio calcolato dall'analisi per il dato nodo è $T = 1,74$ kN.

Il momento statico S_x viene calcolato come:

$$S_x = y_G * A$$

Per una sezione di tipo HEA 120, $S_x = 57 \text{ mm} * 2530 \text{ mm}^2 = 144.210 \text{ mm}^3$.

Il momento di inerzia $I_x = 606 \text{ cm}^4$ e la larghezza della sezione $b = 120 \text{ mm}$.

Viene calcolata la resistenza alle sollecitazioni di taglio della copertura:

$$\tau = \frac{T * S_x}{I_x * b} = \frac{1.740 \text{ N} * 144.210 \text{ mm}^3}{6.060.000 \text{ mm}^4 * 120 \text{ mm}} = 0,34 \text{ N/mm}^2 < f_{yk}/\gamma_{M0}$$

Applichiamo, anche in questo caso, la formula di Von Mises per la verifica degli stati di sforzo nei seguenti punti:

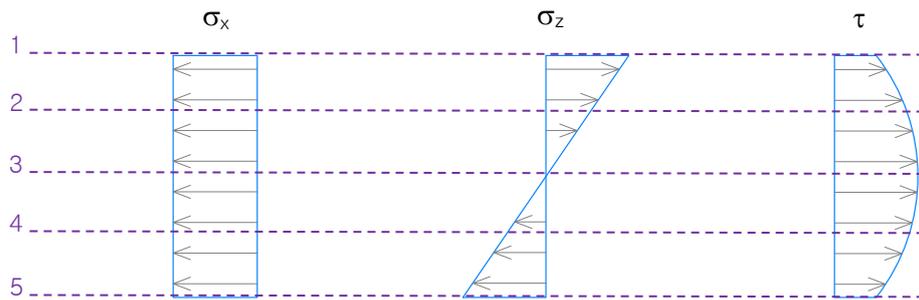


Figura77_diagramma delle tensioni

1. $\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x^2 \sigma_z^2 + 3\tau^2} < f_{yk}/\gamma_{M0}$
 $\sqrt{(-167,77 \text{ N/mm}^2)^2 + (33,01 \text{ N/mm}^2)^2 - (-167,77 \text{ N/mm}^2 * 33,01 \text{ N/mm}^2) + 3(0,34 \text{ N/mm}^2)^2} = 186,48 \text{ N/mm}^2$
2. $\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x^2 \sigma_z^2 + 3\tau^2} < f_{yk}/\gamma_{M0}$
 $\sqrt{(-167,77 \text{ N/mm}^2)^2 + (33,01/2 \text{ N/mm}^2)^2 - (-167,77 \text{ N/mm}^2 * 33,01/2 \text{ N/mm}^2) + 3(0,34 + 0,17 \text{ N/mm}^2)^2} = 176,70 \text{ N/mm}^2$
3. $\sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau^2} < f_{yk}/\gamma_{M0}$
 $\sqrt{(-167,77 \text{ N/mm}^2)^2 + 3(0,34 * 2 \text{ N/mm}^2)^2} = 167,77 \text{ N/mm}^2$
4. $\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x^2 \sigma_z^2 + 3\tau^2} < f_{yk}/\gamma_{M0}$
 $\sqrt{(-167,77 \text{ N/mm}^2)^2 + (-33,01/2 \text{ N/mm}^2)^2 - (-167,77 \text{ N/mm}^2 * (-33,01/2 \text{ N/mm}^2)) + 3(0,34 + 0,17 \text{ N/mm}^2)^2} = 160,15 \text{ N/mm}^2$
5. $\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x^2 \sigma_z^2 + 3\tau^2} < f_{yk}/\gamma_{M0}$
 $\sqrt{(-167,77 \text{ N/mm}^2)^2 + (-33,01 \text{ N/mm}^2)^2 - (-167,77 \text{ N/mm}^2 * (-33,01 \text{ N/mm}^2)) + 3(0,34 \text{ N/mm}^2)^2} = 153,94 \text{ N/mm}^2$

Anche in questo caso, nella figura successiva ricavata dal calcolo su Karamba3D è possibile stabilire quali sono le zone maggiormente sollecitate e soggette ad un maggior spostamento indicate dai colori più scuri.

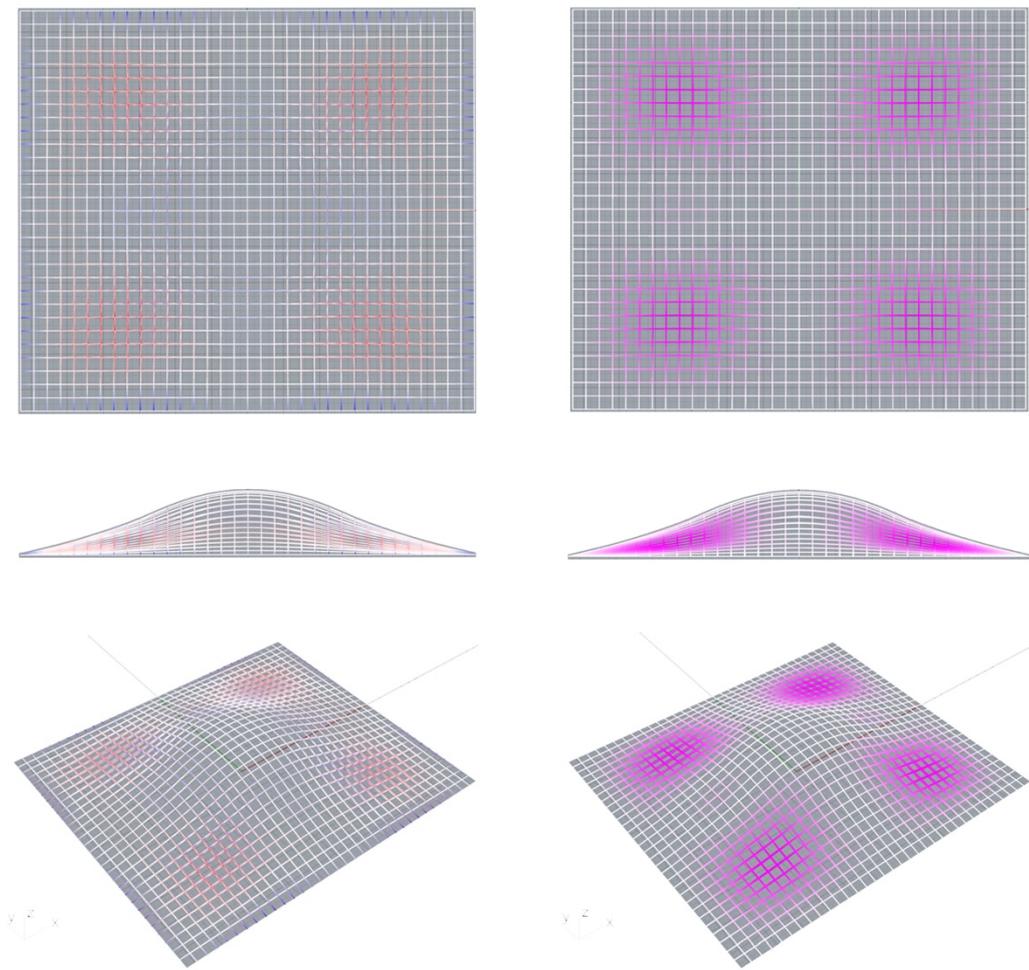
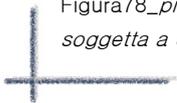


Figura78_pianta, vista frontale e assonometria della copertura in form-finding con Kangaroo soggetta a carico. Schema delle sollecitazioni (a sinistra) e spostamenti (a destra).



5.1.3 Analisi strutturale della copertura in form-finding con MRA

Come nel caso precedente, la sezione trasversale verificata per la copertura costruita utilizzando il form-finding con il Multi-body Rope Approach, è una HEA 120.

Il valore di sforzo normale massimo calcolato risulta essere pari a $N = -313$ kN. L'area della sezione risulta essere pari a $A = 25,30$ cm².

Per la verifica della resistenza a compressione segue il calcolo della tensione che dovrà essere inferiore al limite di snervamento:

$$\sigma_x = \frac{N}{A} = \frac{313.000 \text{ N}}{2530 \text{ mm}^2} = 123,71 \text{ N/mm}^2 < f_{yk}/\gamma_{M0}$$

Il valore del relativo momento flettente calcolato risulta essere pari a $M = 10$ kNm.

Il valore del modulo di resistenza per tale sezione trasversale risulta essere pari a $W = 106$ cm³.

Viene calcolata la resistenza a flessione della copertura:

$$\sigma_z = \frac{M}{W} = \frac{10.000.000 \text{ Nmm}}{106000 \text{ mm}^3} = 94,33 \text{ N/mm}^2 < f_{yk}/\gamma_{M0}$$

Viene verificata, anche in questo caso come negli altri precedenti, la resistenza a pressoflessione della sezione:

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{W} = 123,71 \text{ N/mm}^2 + 94,33 \text{ N/mm}^2 = 218,04 \text{ N/mm}^2 < f_{yk}/\gamma_{M0}$$

Il valore di taglio risulta essere pari a $T = -10$ kN.

Il momento statico S_x per il successivo calcolo e i restanti valori, eccetto il taglio, sono gli stessi della verifica precedente trattandosi della stessa sezione trasversale.

Viene calcolata la resistenza alle sollecitazioni di taglio della copertura:

$$\tau = \frac{T * S_x}{I_x * b} = \frac{10.000 \text{ N} * 144.210 \text{ mm}^3}{6.060.000 \text{ mm}^4 * 120 \text{ mm}} = 1,98 \text{ N/mm}^2 < f_{yk}/\gamma_{M0}$$

La combinazione delle tensioni nei successivi punti è pari a:

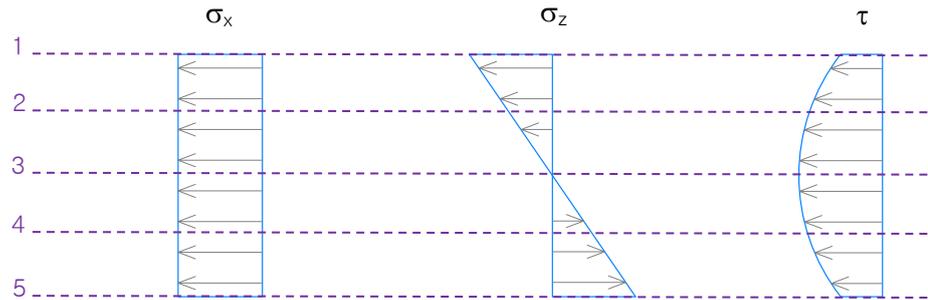


Figura79_diagramma delle tensioni

1. $\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_z + 3\tau^2} < f_{yk}/\gamma_{M0}$
 $\sqrt{(-123,71 \text{ N/mm}^2)^2 + (-94,33 \text{ N/mm}^2)^2 - (-123,71 \text{ N/mm}^2 * (-94,33 \text{ N/mm}^2)) + 3(-1,98 \text{ N/mm}^2)^2} = 112 \text{ N/mm}^2$
2. $\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_z + 3\tau^2} < f_{yk}/\gamma_{M0}$
 $\sqrt{(-123,71 \text{ N/mm}^2)^2 + (-94,33/2 \text{ N/mm}^2)^2 - (-123,71 \text{ N/mm}^2 * (-94,33/2 \text{ N/mm}^2)) + 3(-1,98 - 0,99 \text{ N/mm}^2)^2} = 173,38 \text{ N/mm}^2$
3. $\sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau^2} < f_{yk}/\gamma_{M0}$
 $\sqrt{(-123,71 \text{ N/mm}^2)^2 + 3(-1,98 * 2 \text{ N/mm}^2)^2} = 123,89 \text{ N/mm}^2$
4. $\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_z + 3\tau^2} < f_{yk}/\gamma_{M0}$
 $\sqrt{(-123,71 \text{ N/mm}^2)^2 + (94,33/2 \text{ N/mm}^2)^2 - (-123,71 \text{ N/mm}^2 * 94,33/2 \text{ N/mm}^2) + 3(-1,98 - 0,99 \text{ N/mm}^2)^2} = 152,93 \text{ N/mm}^2$
5. $\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_z + 3\tau^2} < f_{yk}/\gamma_{M0}$
 $\sqrt{(-123,71 \text{ N/mm}^2)^2 + (94,33 \text{ N/mm}^2)^2 - (-123,71 \text{ N/mm}^2 * 94,33 \text{ N/mm}^2) + 3(-1,98 \text{ N/mm}^2)^2} = 189,42 \text{ N/mm}^2$

Anche in questo caso sono riportati in figura in maniera evidente le zone maggiormente sollecitate e soggette ad un maggior spostamento; si nota come sia molto più simile allo stesso schema riportato con l'utilizzo di Kangaroo.

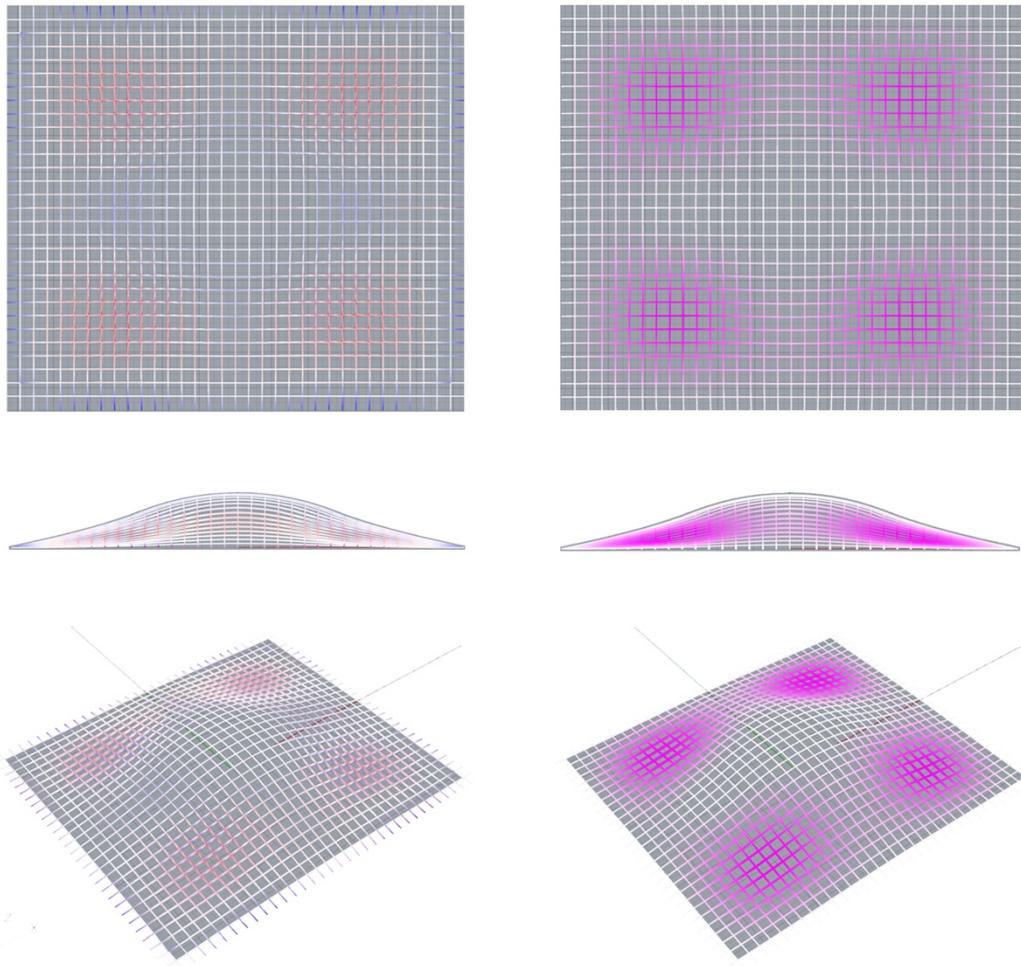
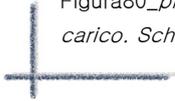


Figura80_pianta, vista frontale e assonometria della copertura in form-finding con MRA soggetta a carico. Schema delle sollecitazioni (a sinistra) e spostamenti (a destra).



Conclusioni

La presente tesi si è focalizzata sulla progettazione parametrica della copertura utilizzando la modellazione algoritmica e il form-finding e valutando i risultati ottenuti con le diverse metodologie.

Prima di arrivare alla definizione delle forme finali sono stati effettuati numerosi tentativi, modificando componenti e variabili; la modifica dei parametri è avvenuta in maniera rapida e soprattutto precisa, senza dover ricostruire il modello dal principio. Sicuramente la riduzione delle tempistiche è stato uno dei vantaggi principali di questo tipo di progettazione che è stato riscontrato sin da subito, evitando così operazioni manuali e ripetitive causa di errori.

La modellazione della copertura effettuata solo con Grasshopper si differenzia da quella effettuata con form-finding. La struttura finale è stata interamente disegnata utilizzando le componenti del plug-in, questo ovviamente ha richiesto un tempo di progettazione decisamente superiore rispetto a quello che è stato necessario per il form-finding. In quest'ultimo caso infatti, le dimensioni e la forma finale della copertura sono state raggiunte mediante l'applicazione e il bilanciamento di carichi.

Un altro dei vantaggi riscontrati è stato poter effettuare l'analisi strutturale direttamente utilizzando il modello finale costruito grazie a Karamba3D sempre presente come plug-in. Così facendo, anche in questo caso cambiando un parametro impostato all'inizio, veniva modificato secondo una reazione a catena anche l'analisi.

I risultati ottenuti dimostrano un distanziamento dei valori tra la modellazione parametrica e il form-finding; infatti nel primo caso risultano necessarie delle travi con una sezione trasversale maggiore rispetto al secondo caso. Questo è dovuto in parte perché nella prima modellazione, avendo potuto costruire il flesso passo per passo, si può notare come sia molto più accentuato, e quindi più vicino alla geometria iniziale della moschea; questo rende la struttura soggetta a sollecitazioni maggiori. Per le geometrie in form-finding invece, si sono dovuti bilanciare attentamente i carichi, soprattutto quelli rivolti verso il basso, per non rischiare che il flesso finisse al di sotto della linea di terra, ottenendo un flesso meno evidente.

Un'ulteriore motivazione di questa differenza è dovuta al fatto che la forma della copertura generata con form-finding viene data proprio dai carichi che agiscono affinché la struttura trovi il suo equilibrio; questo la rende quindi in grado di sopportare meglio i carichi stessi.

Tra il form-finding con Kangaroo e con la componente MRA, i valori ottenuti dall'analisi strutturale sono molto simili. Dal punto di vista applicativo, il

vantaggio che è stato riscontrato a favore della componente Kangaroo è stata la velocità di elaborazione dei dati rispetto all'altra componente, che generando un processo iterativo richiede dei tempi di calcolo molto più lunghi. Allo stesso tempo però con la componente per il Multi-body Rope Approach si ottiene un numero maggiore degli elementi che compongono la struttura più simili tra di loro rispetto a quelli ottenuti con Kangaroo.

Bibliografia e sitografia

Capitolo 1

- M. Dalsoglio, “La lezione dell’architettura islamica: ragioni, forme, protagonisti”, [tesi di laurea], Milano, Politecnico di Milano, 2012.
- F. Trad, “Architettura e decorazione delle moschee”, 23 Ottobre 2015, Dimensione Speranza, <http://dimensionesperanza.it/aree/ecumene/conoscere-l-islam/item/8085-architettura-e-decorazione-delle-moschee-franco-trad.html>
- E. Pulvirenti, “L’arte Islamica in tre tipi di moschea”, 3 Marzo 2017, Didattica Arte <https://www.didatticarte.it/Blog/?p=7872>
- M. Adams, “La grande Moschea di Djenne: il più grande edificio di fango al mondo”, Gennaio 2023, <https://it.ripleybelieves.com/great-mosque-of-djenn-largest-mud-building-in-world-7782>
- “La Grande Moschea di Cordoba: architettura, stile e altro” <https://www.mezquitadescordoba.com/it/mezquita-cordoba-architettura/>
- M. C. “La più antica moschea dell’Iran: Tarik Khane a Damghan”, 3 Febbraio 2020, Iranpertutti <https://www.iranpertutti.it/post/la-più-antica-moschea-dell-iran-tarik-khane-a-damghan>
- A. Gigamondo, “La moschea di Hassan II” <https://www.annagigamondo.com/2019/11/22/la-moschea-di-hassan-ii-2706/>
- <https://fragomeliandpartners.com/index.php/piedmont-mosque/>

Capitolo 2

- P. D’Angelo, “La tecnologia delle Gridshell: Sperimentazione di un sistema di copertura automontante”, [Dottorato in Tecnologia dell’Architettura], Napoli, Università degli studi di Napoli “Federico Secondo”, 2011
- M. Maurizio, “La decomposizione della forma architettonica”, 2016, <https://www.dibaio.com/de-composizione-forma-architettonica-maurizio-abeti/>
- M. Rossino, “Concezione e ottimizzazione delle strutture a guscio in muratura”, [tesi di laurea], Torino, Politecnico di Torino, 2018
- [M. Carrieri, “Membrane e gusci”, http://costruirecorrettamente.org/site/approfondimento/schede_meccanismi/index.php?doc_id=220].

- [“Strutture a guscio”, Università degli studi Mediterranea di Reggio Calabria, https://www.unirc.it/documentazione/materiale_didattico/1464_2014_377_21219.pdf]

Capitolo 3

- P. D’Angelo, “La tecnologia delle Gridshell: Sperimentazione di un sistema di copertura automontante”, [Dottorato in Tecnologia dell’Architettura], Napoli, Università degli studi di Napoli “Federico Secondo”, 2011
- M. Rossino, “Concezione e ottimizzazione delle strutture a guscio in muratura”, [tesi di laurea], Torino, Politecnico di Torino, 2018.
- P. Cassinello, “Museo Eduardo Torroja”, Dayton S.A., Madrid, 2016
- M. Miller, “AD Classic: Los Manantiales”, Aprile 2014, Archdaily, <https://www.archdaily.com/496202/ad-classics-los-manantiales-felix-candela>
- K. De Decker, “Timbrel Vaulting Using Cardboards Formwork” Dicembre 2011, <https://www.notechmagazine.com/2011/12/timbrel-vaulting-using-cardboard-formwork.html>
- K. J. Solanki, “Catalan Vaulting – una tecnica di costruzione in muratura”, <https://www.archweb.com/progettazione/pagina/volte-catalane/>
- B. Gao, T. Li, T. Ma, J. Ye, J. Becque, & I. Hajirasouliha, “A practical grid generation procedure for the design of free-form structures”, Febbraio 2018, University of Bath, https://purehost.bath.ac.uk/ws/portalfiles/portal/168443941/A_practical_grid_generation_procedure_for_the_design_of_free_form_structures.pdf
- “Japan Pavilion EXPO 2020” <https://www.world-architects.com/en/shigeru-ban-architects-tokyo/project/japan-pavilion-expo-2000>
- R. Miyake, I. Luna (a cura di), L. Gould (a cura di), “Shigeru Ban: Paper in Architecture”, Rizzoli Intl Pubns, 2009, pp. 165–198
- F. Castro, “Bamboo Sports Hall for Panyaden International School”: Chiangmai Life Construction”, Archdaily, <https://www.archdaily.com/877165/bamboo-sports-hall-for-panyaden-international-school-chiangmai-life-construction>
- P. Cuvilliers, C. Douthe, L. du Peloux, & R. Le Roy, “Hybrid structural skin: prototype of a GFRP elastic gridshell braced by a fiber-reinforced concrete envelope”, 2017, edisciplinas, <https://www.semanticscholar.org/paper/HYBRID-STRUCTURAL-SKIN%3A-PROTOTYPE-OF-A-GFRP-ELASTIC-Cuvilliers-Douthe/aa3b91267ae2eb3ab144dbabf68df2133d378fca>

- L. du Peloux, F. Tayeb, J. Caron, O. Baverel, “The Ephemeral Cathedral of Créteil: a 350 m² lightweight gridshell structure made of 2 kilometers of GFRP tubes”, <https://thinkshell.fr/wp-content/uploads/2015/06/20150324-article-v3.pdf>
- S. Ragusa “Senegal: la riscoperta dell’architettura tradizionale”, Gennaio 2022, *africarivista*, <https://www.africarivista.it/senegal-la-riscoperta-dellarchitettura-tradizionale/195918/>
- L. Morfini, “Fabrizio Carola e l’Africa: la cupola ogivale oltre i suoi confini” Giugno 2016, *Teknoring*, <https://www.teknoring.com/news/progettazione/fabrizio-carola-e-lafrica-la-cupola-ogivale-oltre-i-suoi-confini/>

Capitolo 4

- A. Tedeschi, “AAD_Algorithms-Aided Design: parametric strategies using grasshopper”, *Le Penseur*, settembre 2014
- A. Licari, “Il design parametrico per l’ottimizzazione di una copertura reticolare”, [tesi di laurea], Torino, Politecnico di Torino, 2021
- F. Deiana, “Combination of evolutionary algorithms and form-finding methods for the structural and shape optimization of a roof structure”, tesi di laurea], Torino, Politecnico di Torino, 2022
- A. Manuello, “Multi-body rope approach for grid shells: Form-finding and imperfection sensitivity”, 2020, Elsevier
- A. Manuello, J. Melchiorre, L. Sardone and G. Marano, Multi-body Rope Approach for the Form-Finding of Shape Optimized Grid Shell Structures, in: *WCCM-APCOM2022*.
URL https://www.scipedia.com/public/Manuello_et_al_2022a

Capitolo 5

- F. Deiana, “Combination of evolutionary algorithms and form-finding methods for the structural and shape optimization of a roof structure”, tesi di laurea], Torino, Politecnico di Torino, 2022
- A. Licari, “Il design parametrico per l’ottimizzazione di una copertura reticolare”, [tesi di laurea], Torino, Politecnico di Torino, 2021
- M. Salamino, “Field-Driven Optimization of an aggregated Free Form Structure”, Torino, Politecnico di Torino, 2020

Bibliografia e sitografia delle figure

Figura1_Moschea di Cordova, sala ipostila

Fonte: <https://www.didatticarte.it/Blog/?p=7872>

Figura2_moschea dello Scià, veduta dei quattro iwan

Fonte: <https://www.didatticarte.it/Blog/?p=7872>

Figura3_moschea di Tarik Khane

Fonte : <https://www.iranpertutti.it/post/la-più-antica-moschea-dell-iran-tarik-khane-a-damghan>

Figura4_minareto, ricostruzione

Fonte <https://www.iranpertutti.it/post/la-più-antica-moschea-dell-iran-tarik-khane-a-damghan>

Figura5_moschea del Solimano

Fonte: <https://www.archetravel.com/blog/moschea-di-solimano-istanbul-guida-visita/>

Figura6_moschea di Djennè

Fonte: <https://www.105.net/news/tutto-news/220362/ha-una-storia-di-secoli-ma-e-di-fango-e-la-moschea-di-djenne.html>

Figura7_moschea di Hassan II

Fonte: <https://www.annagigamondo.com/2019/11/22/la-moschea-di-hassan-ii-2706/>

Figura8_moschea dello sceicco Zayed

Fonte: <https://www.fabionodariphoto.com/moschea-sheikh-zayed-abu-dhabi/>

Figura9_moschea di Cristallo

Fonte: <https://sworld.co.uk/02/42112/photoalbum/malesia-la-moschea-di-cristallo...%20-%20Secret%20World>

Figura10_tipologia di moschea prevalente in Arabia e Nord Africa

Fonte: https://pars-edu.it/sites/default/files/La%20moschea_Malusardi.pdf

Figura11_tipologia di moschea prevalente in Africa sub-sahariana

Fonte: https://pars-edu.it/sites/default/files/La%20moschea_Malusardi.pdf

Figura12_tipologia di moschea prevalente in Iran e Asia centrale

Fonte: https://pars-edu.it/sites/default/files/La%20moschea_Malusardi.pdf

Figura13_tipologia di moschea prevalente in India

Fonte: https://pars-edu.it/sites/default/files/La%20moschea_Malusardi.pdf

Figura14_tipologia di moschea prevalente in area Ottomana

Fonte: https://pars-edu.it/sites/default/files/La%20moschea_Malusardi.pdf

Figura15_tipologia di moschea prevalente in Cina

Fonte: https://pars-edu.it/sites/default/files/La%20moschea_Malusardi.pdf

Figura16_tipologia di moschea prevalente nel sud-est asiatico

Fonte: https://pars-edu.it/sites/default/files/La%20moschea_Malusardi.pdf

Figura17_vista frontale del progetto della nuova moschea

Fonte: <https://fragomeliandpartners.com/index.php/piedmont-mosque/>

Figura18_Assonometria e pianta delle funzioni

Fonte: <https://fragomeliandpartners.com/index.php/piedmont-mosque/>

Figura19_Opzione 1 in alto: supporto circolare posto sulle volte; Opzione 2 in basso: supporto circolare posto sul terreno

Fonte: <https://fragomeliandpartners.com/index.php/piedmont-mosque/>

Figura20_Telaio a pannelli modulari della copertura

Fonte: <https://fragomeliandpartners.com/index.php/piedmont-mosque/>

Figura21_Volte in cemento armato

Fonte: <https://fragomeliandpartners.com/index.php/piedmont-mosque/>

Figura22_esempio per la comprensione del comportamento strutturale di elementi sottili

Fonte: <http://didaingcivile.altervista.org/files/Davide-Alfonsi-LM-PRN.pdf>

Figura23_volta a botte generata dalla traslazione dell'arco

Fonte: M. Rossino, "Concezione e ottimizzazione delle strutture a guscio in muratura", [tesi di laurea], Torino, Politecnico di Torino, 2018

Figura24_cupola generata dalla rotazione dell'arco

Fonte: M. Rossino, "Concezione e ottimizzazione delle strutture a guscio in muratura", [tesi di laurea], Torino, Politecnico di Torino, 2018

Figura25_membrana soggetta ad una forza ortogonale al suo piano

Fonte:

http://costruirecorrettamente.org/site/approfondimento/schede_meccanismi/index.php?doc_id=220

Figura26_inizio deformazione della membrana

Fonte:

http://costruirecorrettamente.org/site/approfondimento/schede_meccanismi/index.php?doc_id=220

Figura27_configurazione funicolare

Fonte:

http://costruirecorrettamente.org/site/approfondimento/schede_meccanismi/index.php?doc_id=220

Figura28_configurazione antifunicolare

Fonte:

http://costruirecorrettamente.org/site/approfondimento/schede_meccanismi/index.php?doc_id=220

Figura29_struttura a guscio resistente a compressione

Fonte:

http://costruirecorrettamente.org/site/approfondimento/schede_meccanismi/index.php?doc_id=220

Figura30_diverse tipologie di forme a guscio

Fonte: https://www.unirc.it/documentazione/materiale_didattico/1464_2014_377_21219.pdf

Figura31_distribuzione degli sforzi interni di un guscio sferico

Fonte: https://www.unirc.it/documentazione/materiale_didattico/1464_2014_377_21219.pdf

Figura32_contenimento delle azioni del guscio trasmesse alle fondazioni

Fonte: https://www.unirc.it/documentazione/materiale_didattico/1464_2014_377_21219.pdf

Figura33_facciata del mercato di Algeciras

Fonte: P. Cassinello, "Museo Eduardo Torroja", Dayton S.A., Madrid, 2016

Figura34_lucernario, vista dal basso

Fonte: P. Cassinello, "Museo Eduardo Torroja", Dayton S.A., Madrid, 2016

Figura35_schema grafico delle componenti architettoniche e strutturali del Mercato di Algeciras

Fonte: <http://ingenieria-civil.org/GOING/obra.php?id=87>

Figura36_copertura a guscio cilindrica del Fronton Recoletos, vista dei lucernari

Fonte: P. Cassinello, "Museo Eduardo Torroja", Dayton S.A., Madrid, 2016

Figura37_vista frontale, vista dall'alto e vista dall'interno della copertura del ristorante Los Manantiales

Fonte: https://www.archdaily.com/496202/ad-classics-los-manantiales-felix-candela/53493e7ec07a8073b4000066-ad-classics-los-manantiales-felix-candela-image?next_project=no

Figura38_differenza tra una volta tradizionale in mattoni (sopra) e una volta catalana (sotto)

Fonte: <https://www.archweb.com/progettazione/pagina/volte-catalane/>

Figura39_Fabbrica Batlló

Fonte: <https://www.archweb.com/progettazione/pagina/volte-catalane/>

Figura40_modello di costruzione della volta

Fonte: <https://www.notechmagazine.com/2011/12/timbrei-vaulting-using-cardboard-formwork.html>

Figura41_forma finale della volta in mattoni

Fonte: <https://www.semanticscholar.org/paper/Tile-vaulting-in-the-21-st-century-Mele/669b3b49e85a2621dbe8dd82f8887da2704c71d0>

Figura42_schema concettuale della costruzione della gridshell per la Mannheim Multihall

Fonte: <http://shells.princeton.edu/Mann1.html>

Figura43_Mannheim Multihall, vista dall'interno della struttura

Fonte: <https://mannheim-multihalle.de/en/architecture/>

Figura44_struttura a doppia curvatura del Weald & Downland Open Air Museum

Fonte: <https://www.burohappold.com/projects/weald-downland-gridshell/#>

Figura45_copertura in acciaio e vetro della Queen Elisabeth II Great Court

Fonte:

https://purehost.bath.ac.uk/ws/portalfiles/portal/168443941/A_practical_grid_generation_procedure_for_the_design_of_free_form_structures.pdf

Figura46_struttura del guscio del Japanese Pavillion in tubi di cartone

Fonte: <https://www.world-architects.com/en/shigeru-ban-architects-tokyo/project/japan-pavilion-expo-2000>

Figura47_struttura della Bamboo Sport Hall

Fonte: <https://www.archdaily.com/877165/bamboo-sports-hall-for-panyaden-international-school-chiangmai-life-construction>

Figura48_progetto della Ephemeral Cathedral con griglia in GFRP

Fonte: <https://thinkshell.fr/wp-content/uploads/2015/06/20150324-article-v3.pdf>

Figura49_cupole ogivali in terra cruda

Fonte: <https://www.teknoing.com/news/progettazione/fabrizio-carola-e-lafrica-la-cupola-ogivale-oltre-i-suoi-confini/>

Figura60_curva funicolare e la relativa forma invertita

Fonte: A. Tedeschi, "AAD_Algorithms-Aided Design: parametric strategies using grasshopper", Le Penseur, settembre 2014, pp. 354

Figura61_diverse forme di un arco al variare delle condizioni al contorno

Fonte: A. Tedeschi, "AAD_Algorithms-Aided Design: parametric strategies using grasshopper", Le Penseur, settembre 2014, pp. 354

Figura62_modello a catena sospesa finale della Mannheim Multihall di F. Otto

Fonte:

https://www.reddit.com/r/architecture/comments/kexr4f/mannheim_multihalle_germany_design_ed_by_frei_otto/

Figura63_componenti del Particles Spring System

Fonte: A. Tedeschi, "AAD_Algorithms–Aided Design: parametric strategies using grasshopper", Le Penseur, settembre 2014, pp. 362

Figura71_ griglia sospesa in laboratorio

Fonte: A. Manuello, "Multi–body rope approach for grid shells: Form–finding and imperfection sensitivity", 2020, Elsevier

Figura72_ forma sospesa (a sinistra) e forma capovolta (a destra)

Fonte: A. Manuello, J. Melchiorre, L. Sardone and G. Marano, Multi–body Rope Approach for the Form–Finding of Shape Optimized Grid Shell Structures, in: WCCM–APCOM2022.

URL https://www.scipedia.com/public/Manuello_et_al_2022a

Figura76_ esempio di ottimizzazione dimensionale

Fonte: F. Deiana, "Combination of evolutionary algorithms and form–finding methods for the structural and shape optimization of a roof structure", tesi di laurea], Torino, Politecnico di Torino, 2022, pp. 14

Figura77_ esempio di algoritmo dell'ottimizzazione di forma

Fonte: Fonte: F. Deiana, "Combination of evolutionary algorithms and form–finding methods for the structural and shape optimization of a roof structure", tesi di laurea], Torino, Politecnico di Torino, 2022, pp. 13

Figura78_ esempio di ottimizzazione di forma

Fonte: Fonte: F. Deiana, "Combination of evolutionary algorithms and form–finding methods for the structural and shape optimization of a roof structure", tesi di laurea], Torino, Politecnico di Torino, 2022, pp. 14

Figura79_ esempio di ottimizzazione topologica

Fonte: Fonte: F. Deiana, "Combination of evolutionary algorithms and form–finding methods for the structural and shape optimization of a roof structure", tesi di laurea], Torino, Politecnico di Torino, 2022, pp. 14